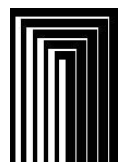


本庁舎の基礎杭及び地下連続壁の効果等に関する  
耐震性能の検証業務

報告書

2020年9月



株式会社 山下設計





# 本庁舎の基礎杭及び地下連続壁の効果等に関する耐震性能の検証業務 報告書

## 目次

|     |                                |       |
|-----|--------------------------------|-------|
| §1  | 検証概要                           |       |
| 1.1 | 目的.....                        | P1-1  |
| 1.2 | 検証項目.....                      | P1-1  |
| 1.3 | 建物概要.....                      | P1-2  |
| 1.4 | 検討方法とクライテリア.....               | P1-3  |
| §2  | 地盤調査結果及び地盤定数の設定                |       |
| 2.1 | 調査方法.....                      | P2-1  |
| 2.2 | 調査結果.....                      | P2-2  |
| 2.3 | 地盤定数の設定.....                   | P2-4  |
| §3  | 地中連続壁の耐震性能評価                   |       |
| 3.1 | 検討概要と地中連続壁の概要.....             | P3-1  |
| 3.2 | 地中連続壁間継手について.....              | P3-3  |
| 3.3 | 地盤変位に対する地中連続壁の検討結果.....        | P3-6  |
| §4  | 地震時の杭・建物と地盤の動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析 |       |
| 4.1 | 解析モデル概要.....                   | P4-1  |
| 4.2 | 各種パラメータの設定.....                | P4-6  |
| 4.3 | 自由地盤の応答解析結果.....               | P4-20 |
| 4.4 | 動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析結果.....      | P4-22 |
| §5  | 動的相互作用を考慮した杭の耐震性安全性検証          |       |
| 5.1 | 検討概要.....                      | P5-1  |
| 5.2 | 検証用変位及び時刻の選定.....              | P5-2  |
| 5.3 | 杭の変位増分解析.....                  | P5-7  |
| 5.4 | 杭の検証結果.....                    | P5-14 |
| §6  | まとめ .....                      | P6-1  |



## § 1 検証概要



## 1. 検証概要

### 1.1. 目的

本庁舎が現行の建築基準法が定める耐震性能を有しておらず耐震改修が困難であるという「平成 29 年度本庁舎整備計画作成業務委託」（以下、H29 年度耐震安全検証と称す）の調査結果に対する「庁舎整備に関する特別委員会」に招致された参考人（以下、参考人と称す）の意見を踏まえ、基礎杭の密集効果や地下連続壁の効果に関して定量的な算出を試みることで、あらためて耐震性能を検証することを目的とする。

### 1.2. 検証項目

- (1) 告示波作成における、基礎杭の密集配置や地下連続壁による表層地盤による地震動の増幅に対する低減効果の定量的な算定
- (2) 地下連続壁による杭に作用する力の低減効果①  
地下連続壁が変形しないことで、杭に作用する地盤の変形による力に対する低減効果の定量的な算定
- (3) 地下連続壁による杭に作用する力の低減効果②  
地下連続壁が地震力の一部を負担することで、杭が負担する地震力に対する低減効果の定量的な算定
- (4) その他の定量的な算定  
地下連続壁の内側で PS 検層を行い杭と連続壁の効果を直接計測し、告示波を用いて時刻歴応答解析を行う。
- (5) 基礎杭の耐震性能の評価  
(1) (2) (3) (4) の結果に基づき、基礎杭の耐震性能の有無について評価する。

### 1.3. 建物概要

表 1-1 建物概要

|      |                     | 備考       |
|------|---------------------|----------|
| 所在地  | 熊本市中央区手取本町1番1号      |          |
| 用途地域 | 商業地域                |          |
| 防火地域 | 防火地域                |          |
| 建蔽率  | 80%                 |          |
| 容積率  | 600%                |          |
| 敷地面積 | 10,377㎡             | 計画通知資料より |
| 用途   | 庁舎                  | 計画通知資料より |
| 高さ   | 64.1m               | 計画通知資料より |
| 階数   | 行政棟 地下2階 地上15階 塔屋2階 | 計画通知資料より |
|      | 議会棟 地上6階 地下なし       |          |
| 建築面積 | 5583.54㎡            | 計画通知資料より |
| 延べ面積 | 39,686.57㎡          | 計画通知資料より |
| 構造   | 行政棟 S造一部SRC造及びRC造   |          |
|      | 議会棟 SRC造一部S造        |          |
| 基礎   | 場所打ちコンクリート杭（ベント工法）  |          |
| 竣工   | 昭和56年10月30日         |          |



市役所全景（熊本市ホームページより）

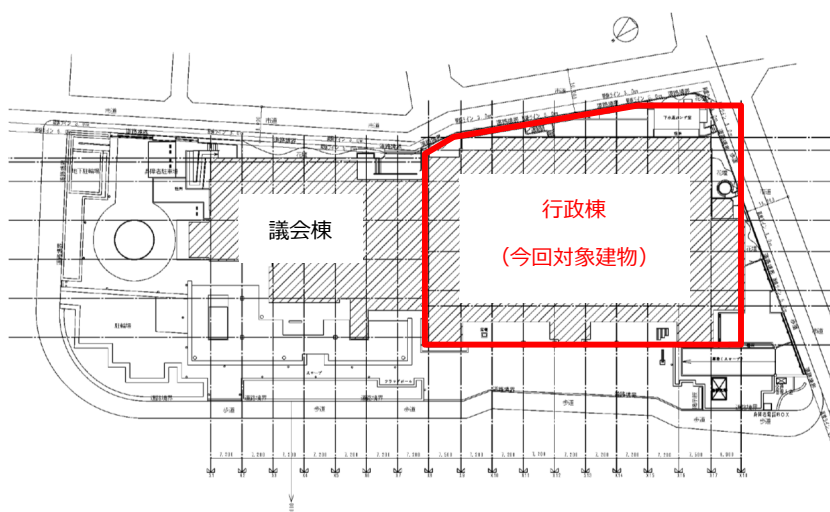


図 1-1 配置図

## 1.4. 検討方法とクライテリア

検討項目と内容を以下に示す。

### (1) 地中連続壁による地震力の低減効果の検討

地中連続壁に L2 地震時地盤変位を作用させ、発生応力と耐力を比較し、地中連続壁の安全性を確認する。

検討により、地中連続壁の安全性が確認されれば、地中連続壁による地震力の低減効果が期待できるため、次項以降の検討にその影響を考慮する。

### (2) 地震時の杭・建物と地盤の動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析

杭基礎と建物の地上・地下を一体としてモデル化し、地盤変位による応力と建物の地上・地下の慣性力による応力を時刻歴で評価する。図 1-2 に連成系モデルの概念図を示す。本検討では、H29 年度耐震安全性検証において層間変形角の目標値を超えていた、レベル 2 告示波を検討用地震動とする。

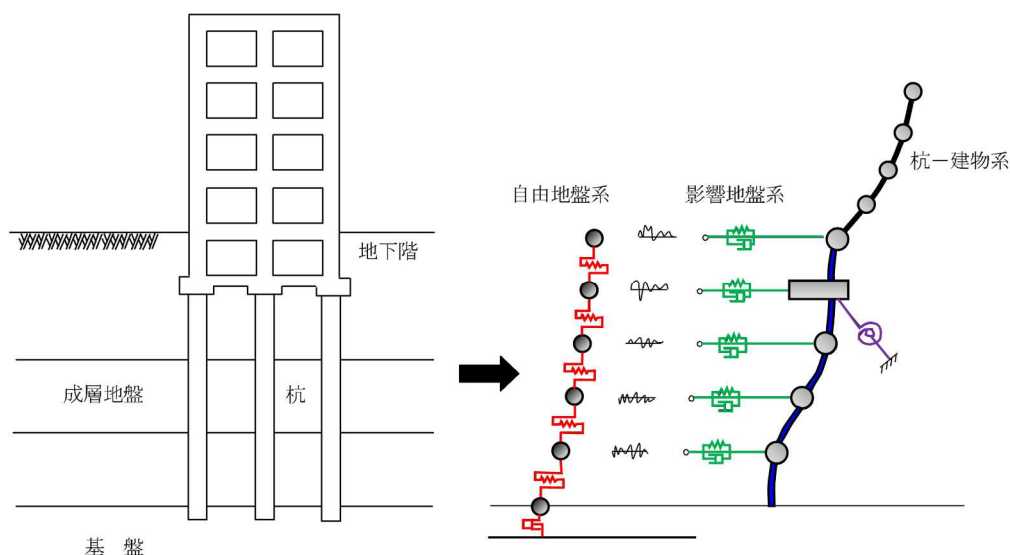


図 1-2 連成系モデルの概念図

本検討では大地震時を想定し、レベル 2 地震動に対する設計クライテリアについて表 1-2 に示す。なお、解析モデルは竣工図を基に作成する(劣化・損傷の影響は考慮しない)。

表 1-2 設計クライテリア

| 項目   |       | 目標値            |
|------|-------|----------------|
| 上部構造 | 層間変形角 | 1/100以下※1      |
| 杭    | 破壊形式  | 鉛直力支持能力を失わない※2 |

※1：H29年度耐震安全検証を基に設定

※2：杭の「せん断破壊」、「軸圧縮破壊」、「杭頭及び杭中間部の2点以上での曲げ降伏」が生じない。参考文献7)を基に設定

## § 2 地盤調査結果及び地盤定数の設定





## 2. 地盤調査結果及び地盤定数の設定

### 2.1. 調査方法

行政棟位置での地盤の特性を調査するために、行政棟の近傍 1 箇所にて地盤調査を実施した。今回調査の位置を図 2-1 に示す。

調査内容は下記の通りである。

#### (1) ボーリング調査：延べ深度 26.0m

油圧式ロータリーボーリング機械を使用し、標準貫入試験を併用しながら外径  $\phi 86\text{mm}$  のノンコアボーリングを実施した。

#### (2) 標準貫入試験：計 21 回

深度 1m 毎に試験を行い、貫入量が 30cm となる総打撃回数 N 値を測定する。N 値の最大値は 60 とする。試験方法は JIS A 1219 に基づき実施する。

#### (3) 弾性波速度検層（PS 検層）：21m

ボーリング孔 No.R01 において実施した。PS 検層は地盤内を伝播する弾性波（P 波、S 波）速度の深さ方向の分布を測定する。

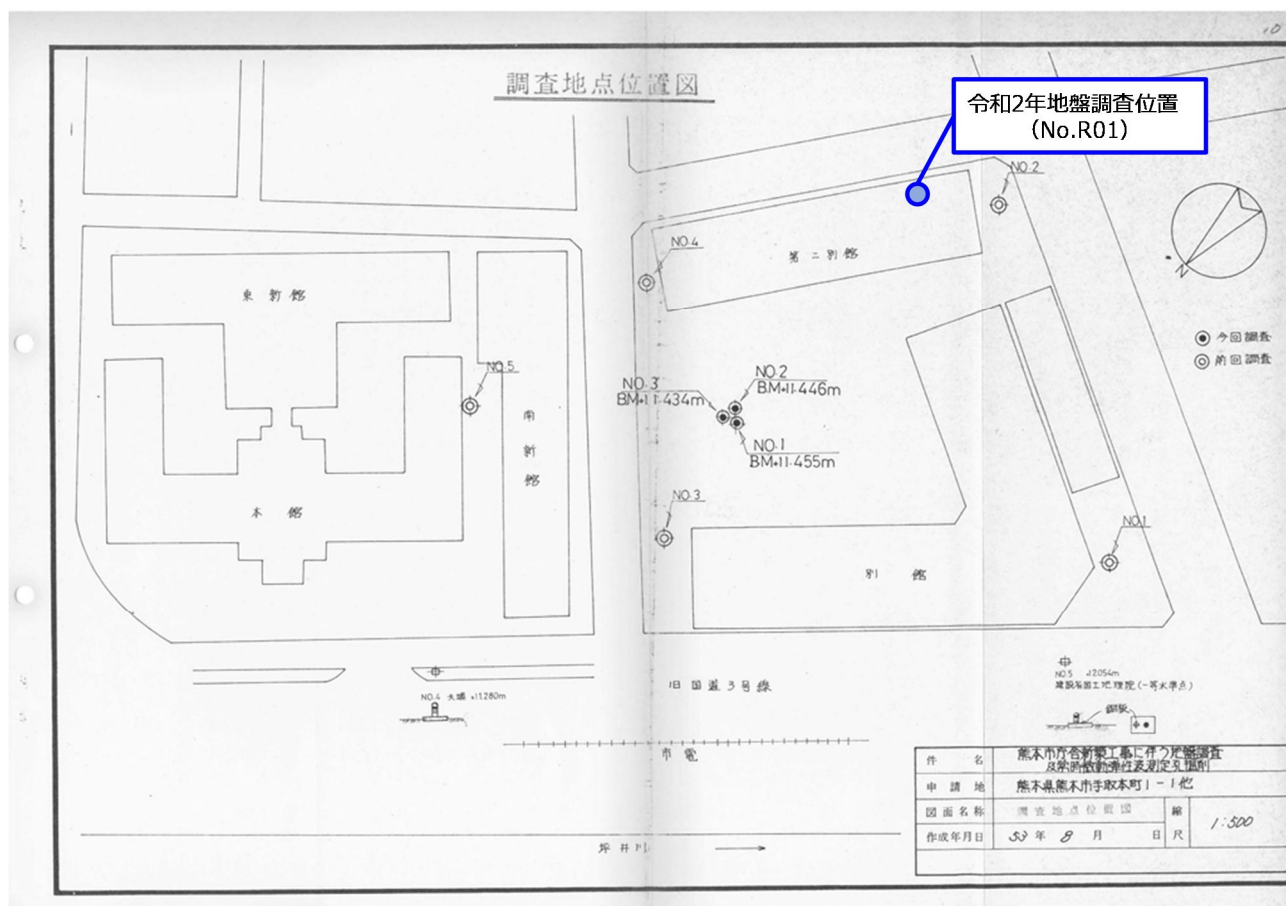


図 2-1 地盤調査位置図

## 2.2. 調査結果

### 2.2.1. 地盤構成及びN値

調査地の地盤構成を総括すると、深度 20m 付近から分布する第四紀更新世の小金峰山岩類を実質的な基盤として、その上位に第四紀更新世～完新世の未固結堆積物（洪積層・沖積層）が分布する。調査結果を図 2-2 に示す。図 2-2 には、昭和 53 年に行った既存 No.6 の結果も共に示す。

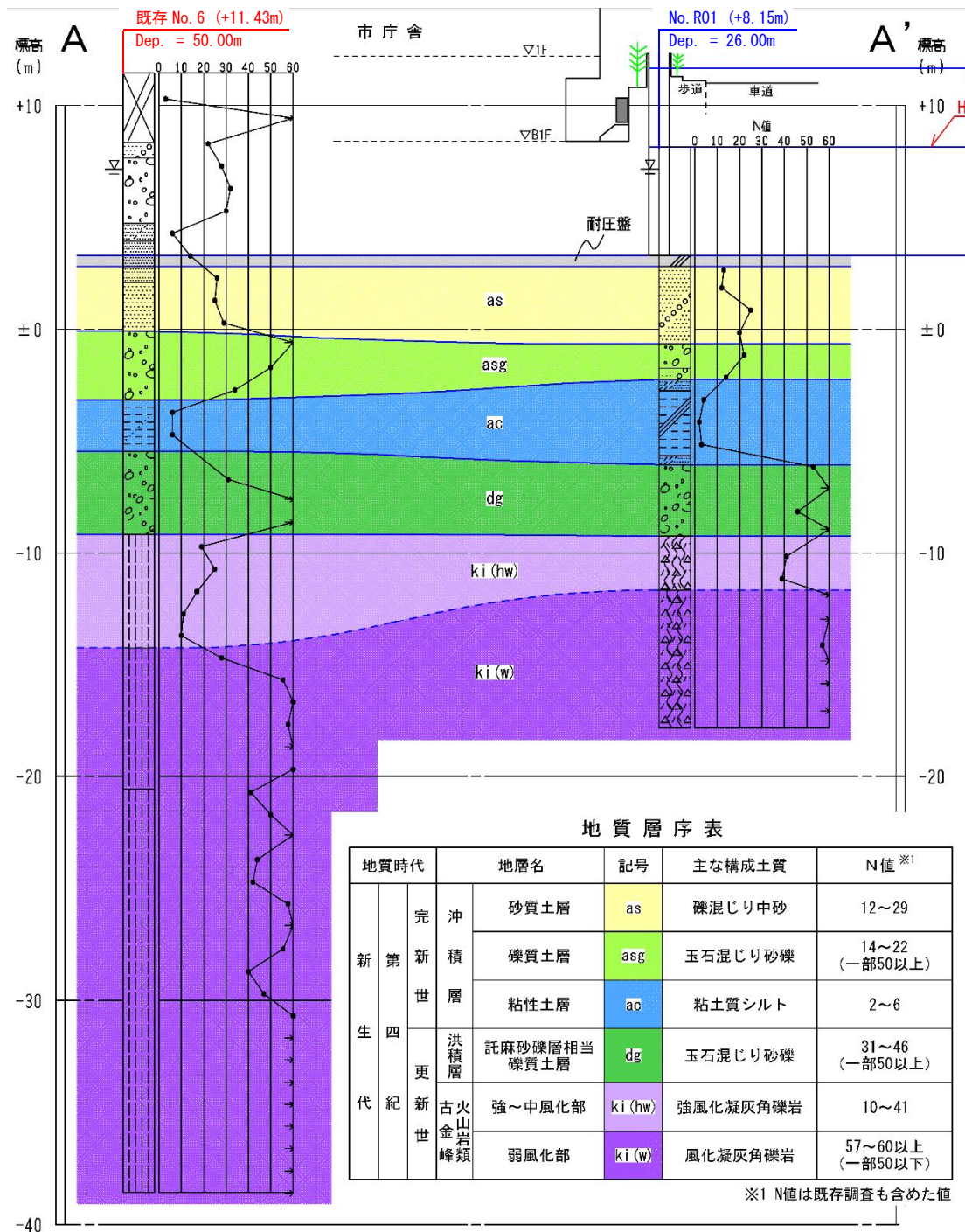


図 2-2 ボーリング柱状図及び地層構成表

### 2.2.2. PS 検層結果

PS 検層結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 PS 検層結果一覧表

| 深度<br>GL-(m)  | 湿潤密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | P波速度<br>(m/s) | S波速度<br>(m/s) | ポアソン比 | 剛性率<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | ヤング率<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|------------------------------|---------------|---------------|-------|-----------------------------|------------------------------|
| 5.35 ～ 8.80   | 1.80                         | 1,520         | 200           | 0.491 | 72,000                      | 214,700                      |
| 8.80 ～ 10.40  | 2.00                         | 1,700         | 270           | 0.487 | 145,800                     | 433,600                      |
| 10.40 ～ 10.90 | 1.70                         |               |               |       | 123,900                     | 368,600                      |
| 10.90 ～ 13.80 |                              | 1,590         | 160           | 0.495 | 43,500                      | 130,100                      |
| 13.80 ～ 14.20 |                              |               |               |       | 232,700                     | 688,800                      |
| 14.20 ～ 17.40 | 2.00                         | 1,880         | 370           | 0.480 | 273,800                     | 810,400                      |
| 17.40 ～ 19.80 | 1.90                         | 1,990         | 360           | 0.483 | 246,200                     | 730,400                      |
| 19.80 ～ 25.00 | 2.00                         | 2,070         | 490           | 0.470 | 480,200                     | 1,412,000                    |

## 2.3. 地盤定数の設定

### 2.3.1. 方針

今回の地盤調査結果及び既存の地盤調査結果を踏まえ、検討に使用する地盤モデルを設定する。

地盤調査位置図を図 2-3 に示す。本検討に用いる地盤構成及びN 値は、本庁舎直下に位置する昭和 53 年地盤調査のボーリング No.6 とする。地震動の伝わりやすさを示す Vs 値は、昭和 53 年、平成 29 年及び令和 2 年の地盤調査結果をもとに、それぞれの地盤に対応した値を使用する。

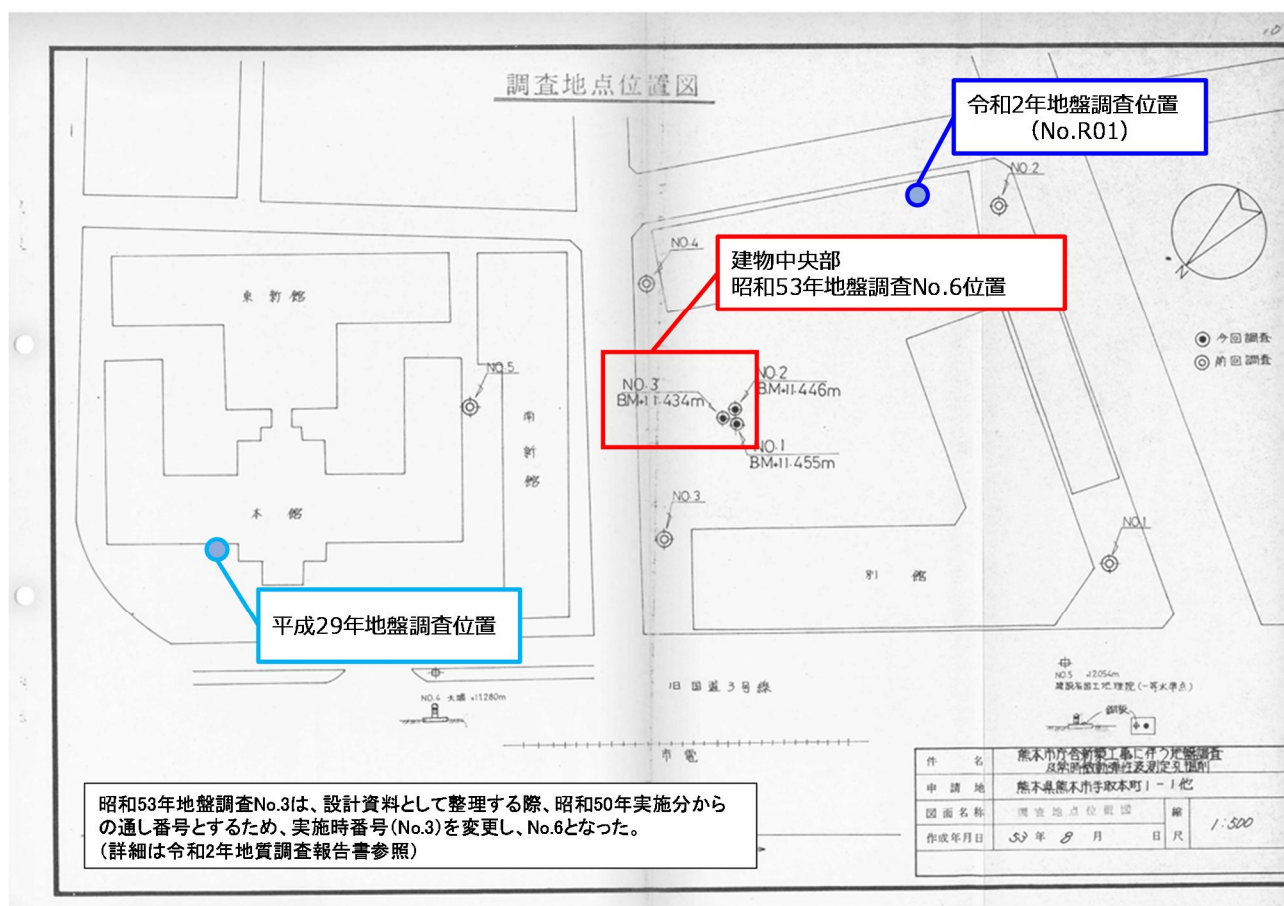


図 2-3 地盤調査位置図

(「熊本市庁舎新築工事に伴う敷地地盤の常時微動および弾性波速度調査 報告書  
昭和 53 年 10 月」抜粋、加筆)



2.3.2. 地盤定数の設定

昭和 53 年の地盤構成及び採用した Vs 値と平成 29 年及び令和 2 年の Vs 値の比較を図 2-4～図 2-6 に示す。各土質の Vs は概ね令和 2 年の調査結果を用いるが、下記 2 点については、工学的な判断を行い、既存の調査結果の値を使用する。

- ① 深さ 20.6m～25.7m の粘土質砂礫は、平成 29 年、令和 2 年共に N 値 10～20 程度の砂礫層がないため、昭和 53 年の Vs 値を採用する。
- ② 深さ 25.7m～32.0m は昭和 53 年調査結果では、砂礫の記載であるが、N 値や出現する深さから平成 29 年及び令和 2 年調査結果の風化岩と同じ地盤であると判断した。

表 2-2 に地盤調査結果の一覧を示す。時刻歴応答解析に用いる地盤定数の採用した箇所を表 2-3 で示す。

表 2-3 に時刻歴応答解析に用いる地盤定数を示す。以降の検討は表 2-3 の値を用いて検討を行う。

表 2-2 地盤調査結果一覧

| S53年          |     |         |    |    |    |    |    |          |       | H29年  |      |         | R2年 |         |
|---------------|-----|---------|----|----|----|----|----|----------|-------|-------|------|---------|-----|---------|
| 深度            | 層厚  | 土質名称    | N値 |    |    |    |    | 平均<br>N値 | Vs    | Vs    | 土質名称 | Vs      | 土質  |         |
| (m)           | (m) |         |    |    |    |    |    |          | (m/s) | (m/s) |      | (m/s)   |     |         |
| 0.00 ~ 3.10   | 3.1 | 埋土      | 3  |    |    |    |    | 3        | 28    | 230   | 180  | 埋土      | -   |         |
| 3.10 ~ 3.80   | 0.7 | 礫混じり砂   | 22 |    |    |    |    | 22       |       | 230   | 250  | 砂礫      | 200 | 礫混じり中砂  |
| 3.80 ~ 6.70   | 2.9 | 砂礫      | 28 | 32 | 30 |    |    | 30       |       | 230   | 250  | 砂礫      | 200 | 礫混じり中砂  |
| 6.70 ~ 7.50   | 0.8 | シルト混り細砂 | 6  |    |    |    |    | 6        |       | 230   | 190  | シルト     | 270 | 玉石混じり砂礫 |
| 7.50 ~ 9.35   | 1.9 | 細砂      | 14 | 26 |    |    |    | 20       |       | 230   | 280  | 砂礫      | 270 | 玉石混じり砂礫 |
| 9.35 ~ 11.50  | 2.2 | 中砂      | 25 | 29 |    |    |    | 27       |       | 230   | 280  | 中砂      | 270 | 礫混じり中砂  |
| 11.50 ~ 14.60 | 3.1 | 砂礫      | 50 | 50 | 34 |    |    | 45       |       | 230   | 280  | 中砂      | 270 | シルト質細砂  |
| 14.60 ~ 16.90 | 2.3 | 砂混りシルト  | 6  | 6  |    |    |    | 6        |       | 150   | 150  | 粘土質シルト  | 160 | 粘土質シルト  |
| 16.90 ~ 20.60 | 3.7 | 玉石混り砂礫  | 31 | 50 | 50 |    |    | 44       |       | 380   | 370  | 玉石混じり砂礫 | 370 | 玉石混じり砂礫 |
| 20.60 ~ 25.70 | 5.1 | 粘土質砂礫   | 19 | 25 | 17 | 11 | 10 | 16       |       | 220   | 350  | 強風化岩    | 360 | 強風化岩    |
| 25.70 ~ 32.00 | 6.3 | 砂礫      | 28 | 50 | 50 | 50 | 50 | 46       | 520   | 520   | 風化岩  | 490     | 風化岩 |         |

赤字：検討用モデルに採用した数値

表 2-3 時刻歴応答解析に用いる地盤定数

| 検討用地盤構成       |     |         |       |       |                      |
|---------------|-----|---------|-------|-------|----------------------|
| 深度            | 層厚  | 土質名称    | 平均 N値 | Vs    | 密度                   |
| (m)           | (m) |         |       | (m/s) | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0.00 ～ 3.10   | 3.1 | 埋土      | 3     | 180   | 1.84                 |
| 3.10 ～ 3.80   | 0.7 | 礫混じり砂   | 22    | 200   | 1.84                 |
| 3.80 ～ 6.70   | 2.9 | 砂礫      | 30    | 200   | 1.84                 |
| 6.70 ～ 7.50   | 0.8 | シルト混り細砂 | 6     | 200   | 1.84                 |
| 7.50 ～ 9.35   | 1.9 | 細砂      | 20    | 270   | 1.84                 |
| 9.35 ～ 11.50  | 2.2 | 中砂      | 27    | 270   | 1.84                 |
| 11.50 ～ 14.60 | 3.1 | 砂礫      | 45    | 270   | 1.84                 |
| 14.60 ～ 16.90 | 2.3 | 砂混りシルト  | 6     | 160   | 1.45                 |
| 16.90 ～ 20.60 | 3.7 | 玉石混り砂礫  | 44    | 370   | 2.04                 |
| 20.60 ～ 25.70 | 5.1 | 強風化岩    | 16    | 220   | 1.94                 |
| 25.70 ～ 32.00 | 6.3 | 風化岩     | 46    | 490   | 2.14                 |



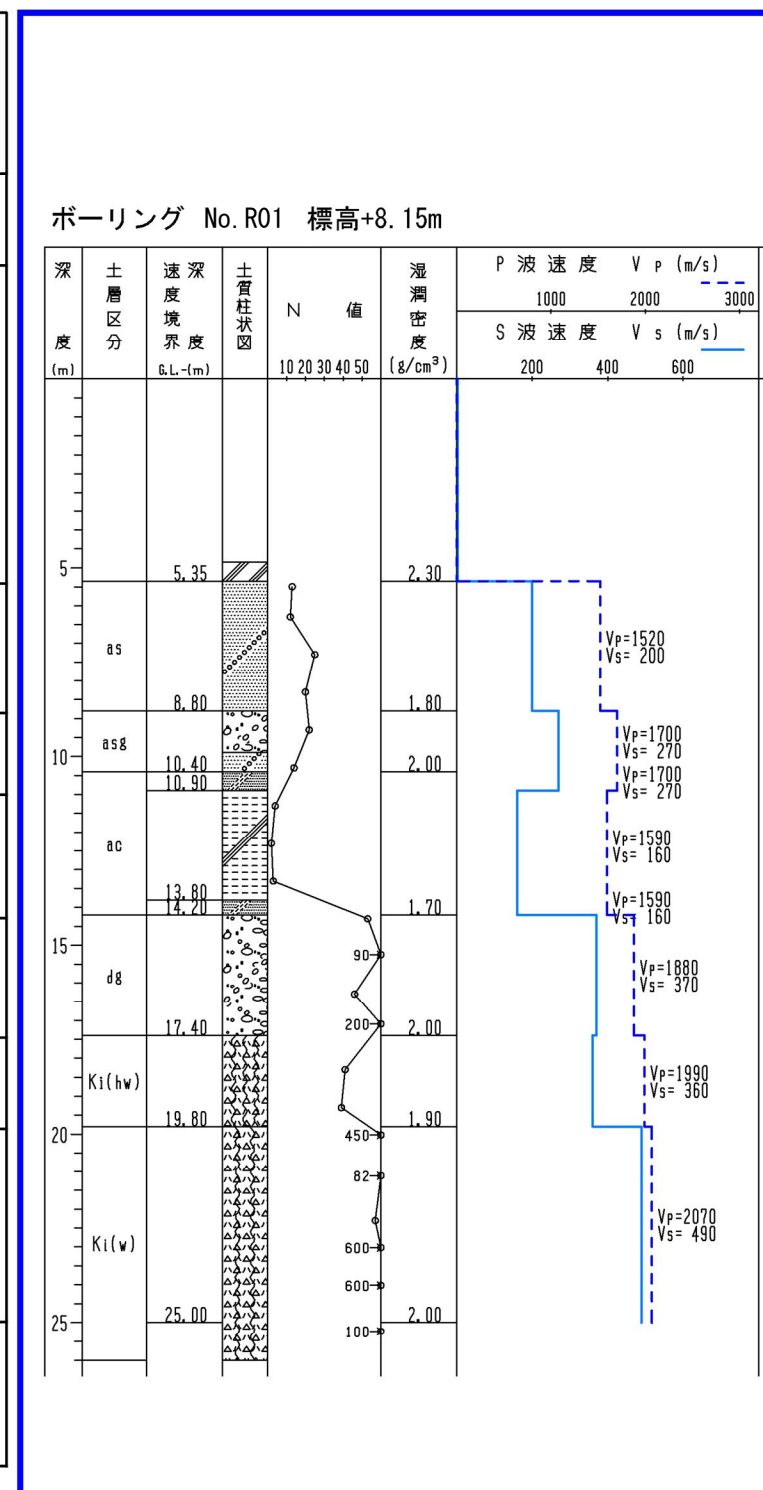
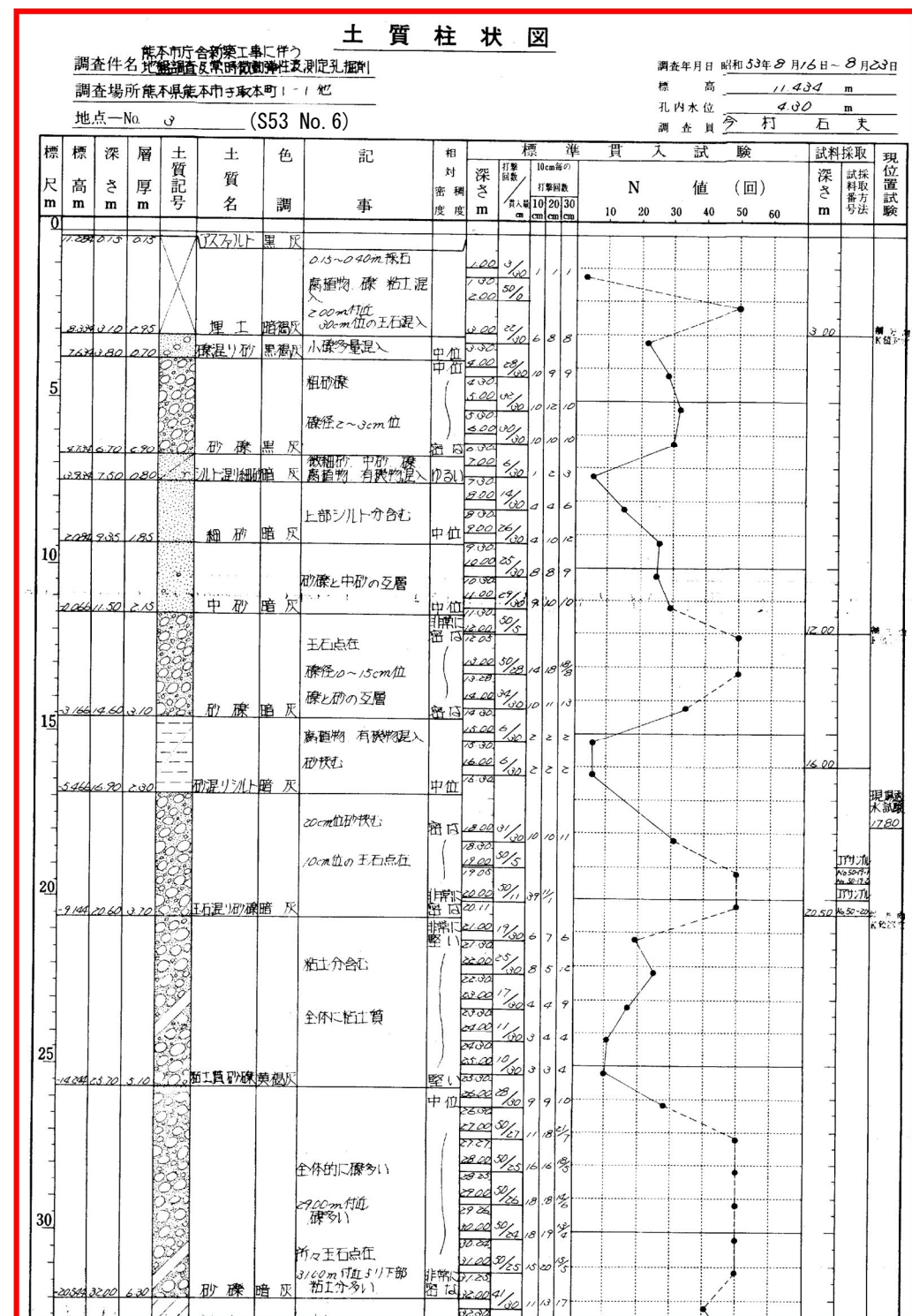
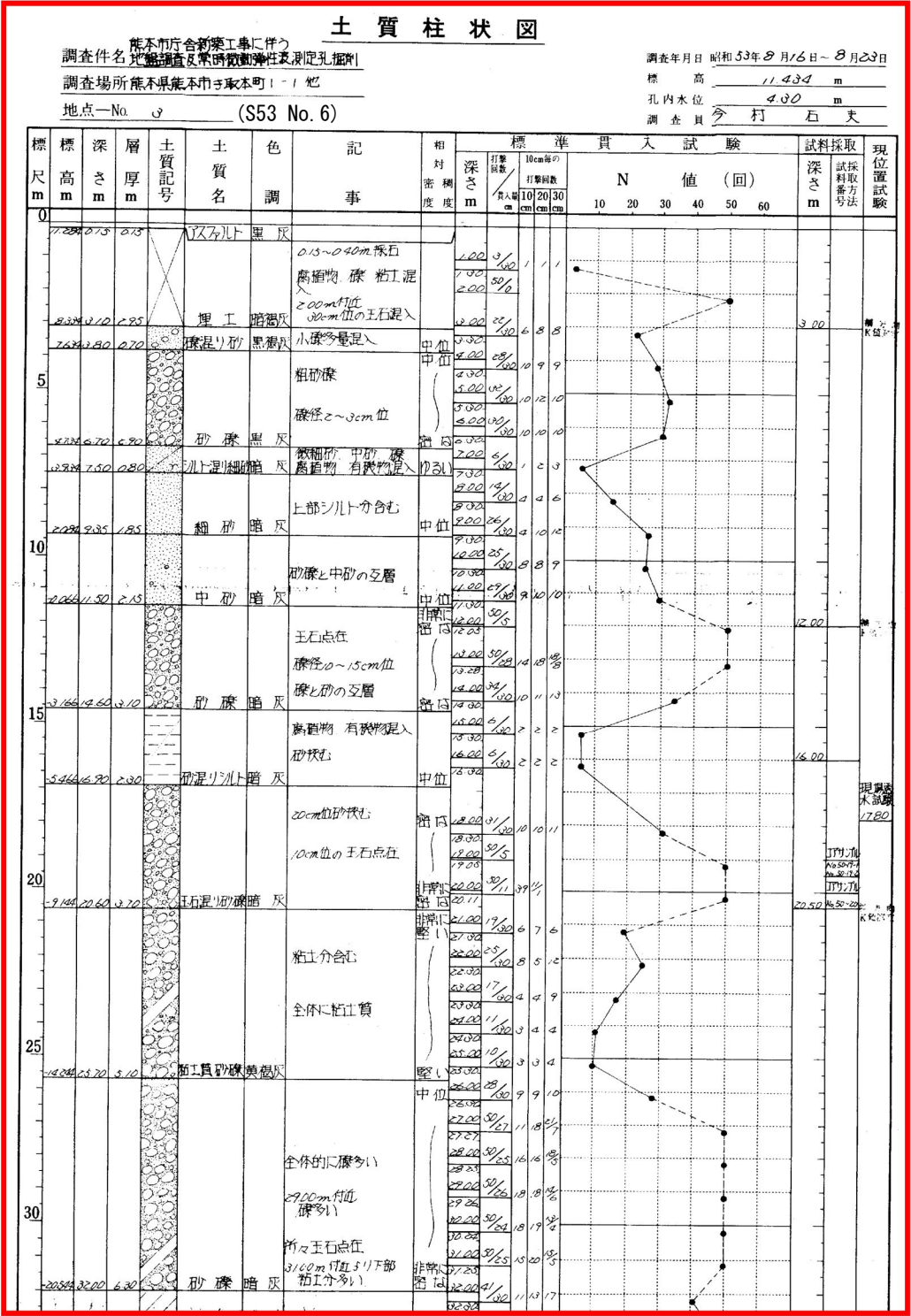


図 2-4 地盤構成と Vs 比較 (左: 昭和 53 年、右: 令和 2 年、赤字: 採用値)







| PS検層結果<br>Vs (m/s) |     |      |     |
|--------------------|-----|------|-----|
| S53                | 採用  | 地層対応 | H29 |
| -                  | 180 | ←    | 180 |
| 230                | 200 |      | 250 |
|                    |     |      | 190 |
|                    | 270 |      | 280 |
| 150                | 160 |      | 150 |
| 380                | 370 |      | 190 |
|                    |     |      | 370 |
| 220                | 220 |      |     |
| 520                | 490 |      | 350 |
|                    |     |      | 520 |

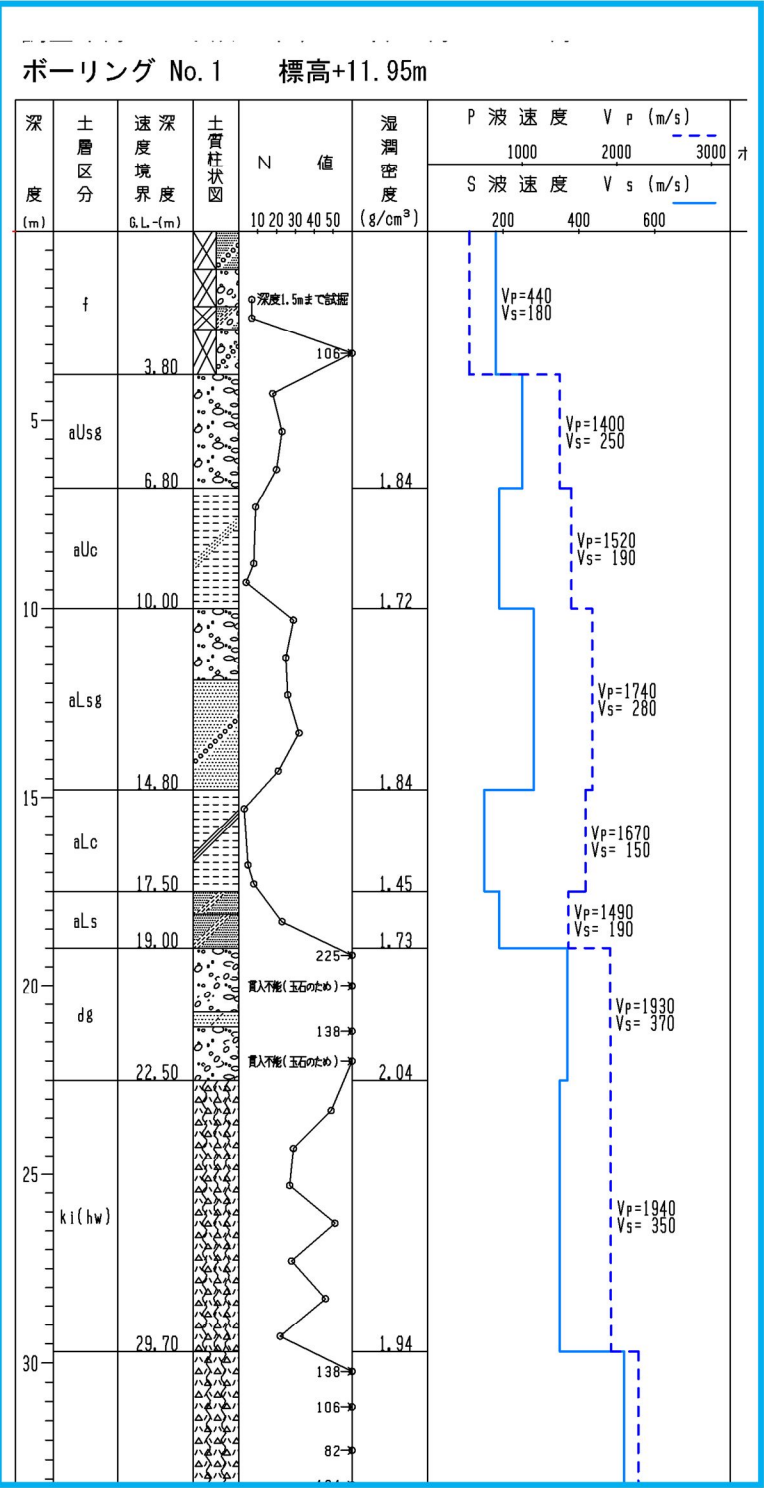


図 2-5 地盤構成と Vs 比較 (左: 昭和 53 年、右: 平成 29 年、赤字: 採用値)



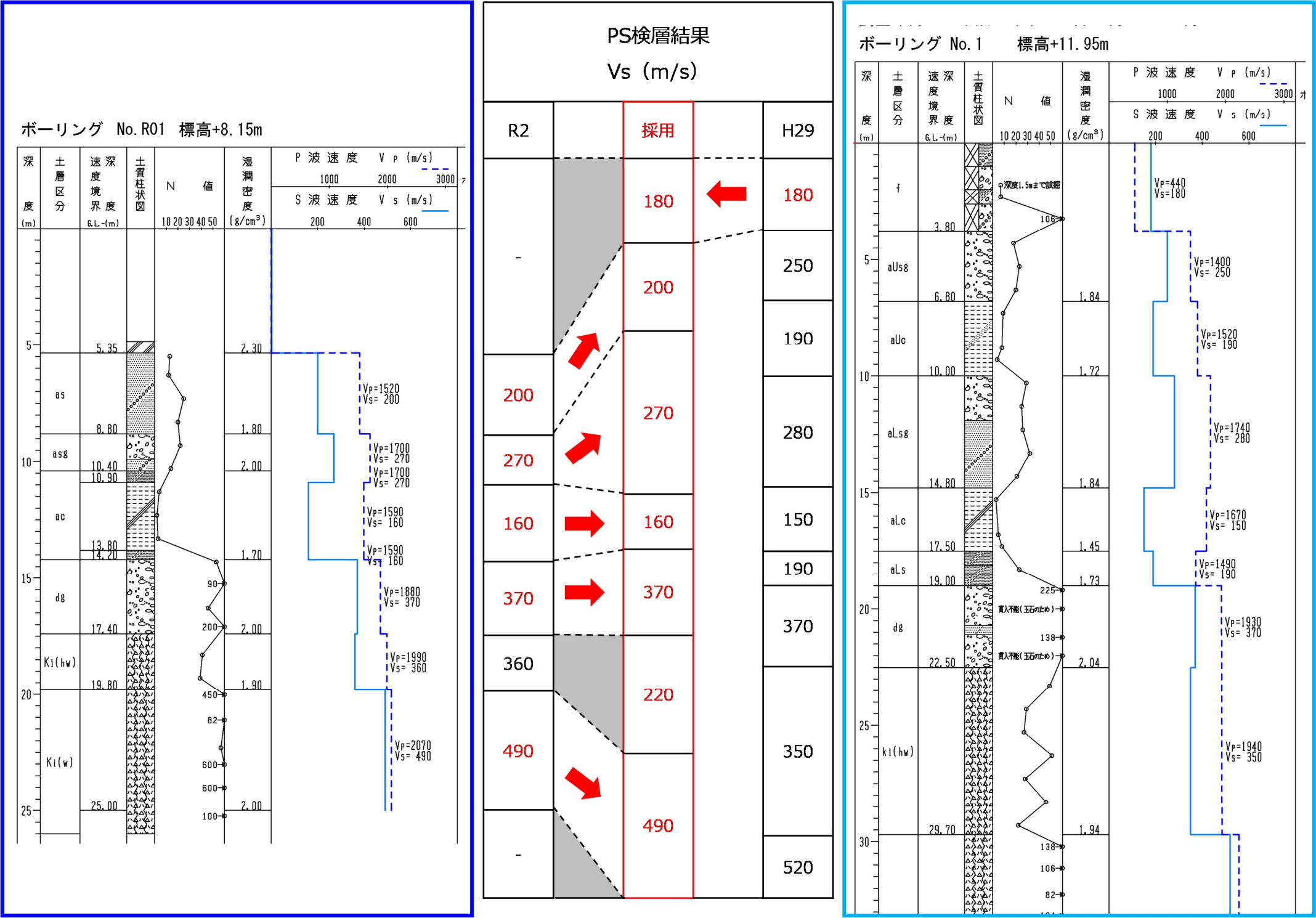


図 2-6 地盤構成と  $V_s$  比較 (左: 令和 2 年、右: 平成 29 年、赤字: 採用値)



### § 3 地中連続壁の耐震性能評価





### 3. 地中連続壁の耐震性能評価

#### 3.1. 検討概要と地中連続壁の概要

地中連続壁による地震力の低減効果として、図 3-1 に示す地盤変位の低減効果や、図 3-2 の慣性力の低減効果が考えられる。これらの低減効果を発揮する前提条件として、大地震時の地盤変位に対して地中連続壁が健全である必要がある。本検討では、地中連続壁に L2 地震時地盤変位を作用させ、発生応力と耐力を比較して、地中連続壁の安全性を確認する。

地中連続壁の配置を図 3-3 に、地中連続壁の配筋図を図 3-4 に示す。

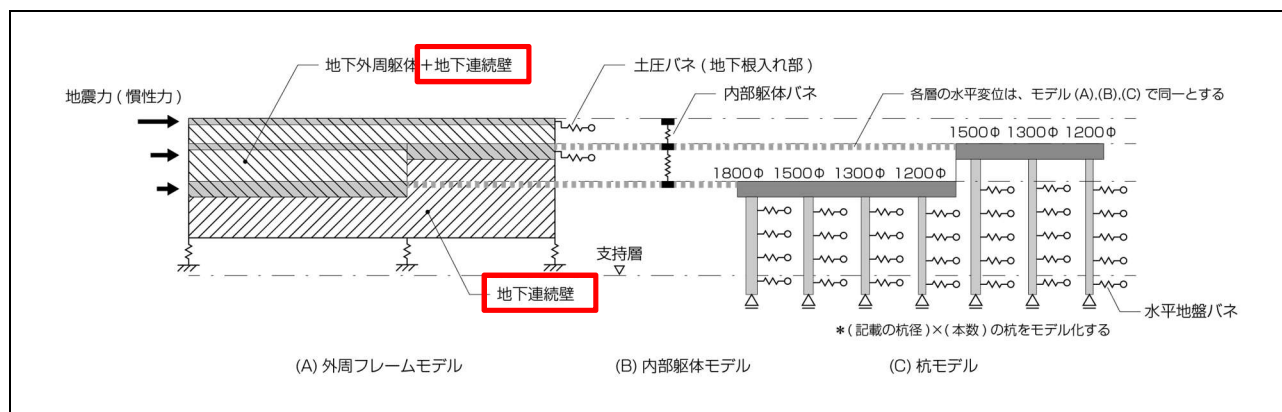
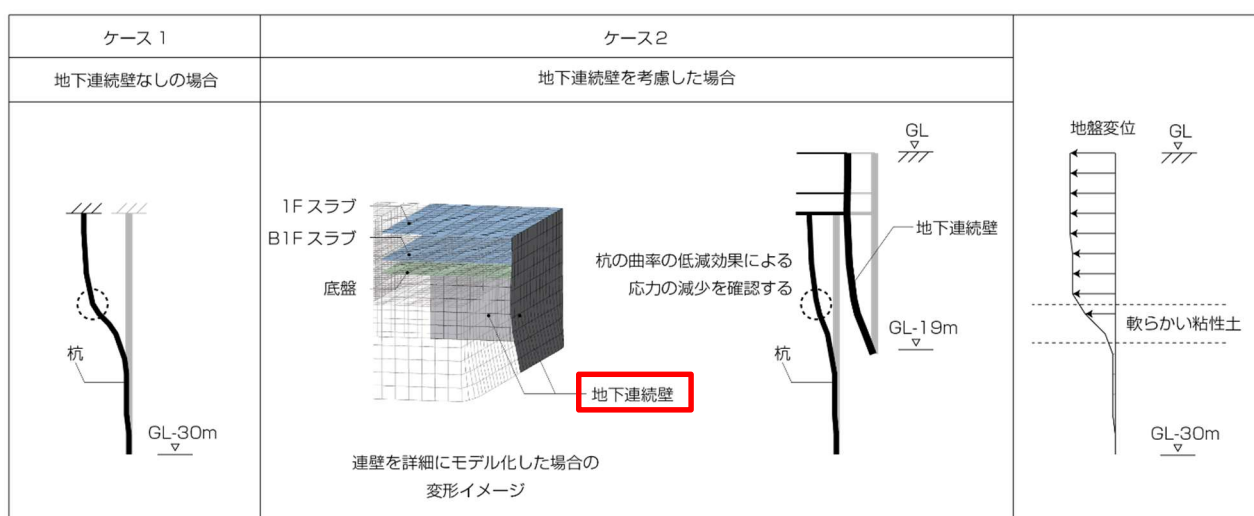


図 3-2 地中連続壁を考慮した地震力に対する解析モデル



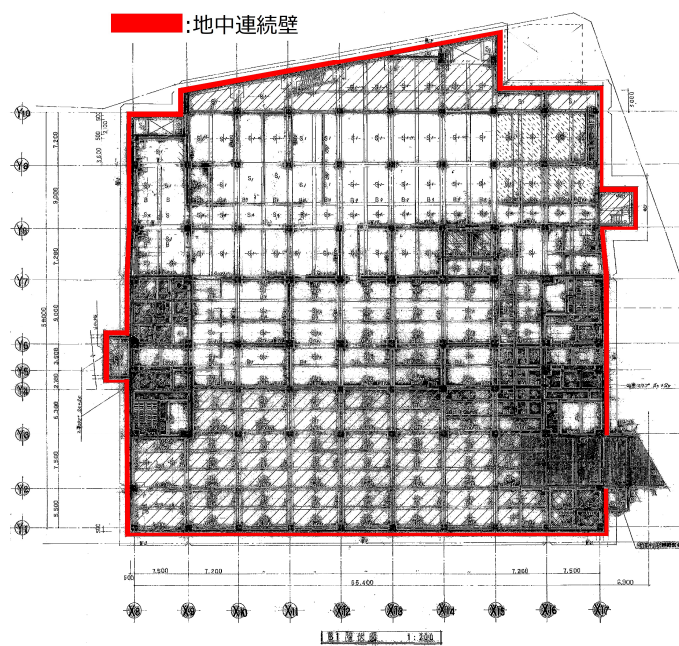


図 3-3 B1 階伏図

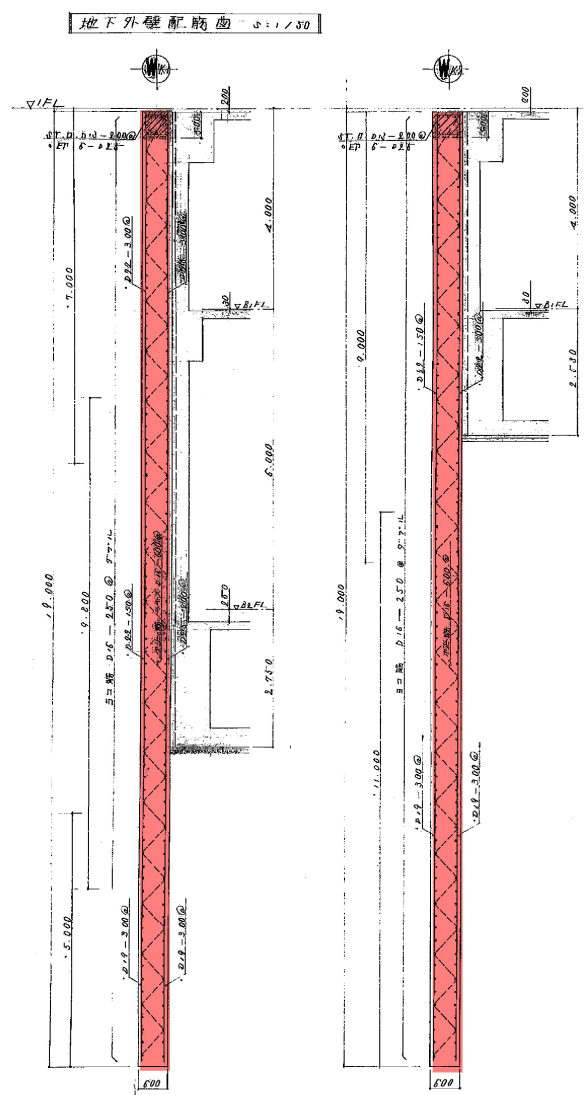


図 3-4 地中連続壁配筋図（立断面図）

### 3.2. 地中連続壁間継手について

地中連続壁の施工方法を図 3-5 に示す。地中連続壁は水平方向に分割された壁（エレメント）毎に施工を行う。1 列目の壁を掘削→鉄筋挿入→コンクリート打設した後、隣の 2 列目に移動して同じ手順を繰り返すことで、連続した壁を施工する。

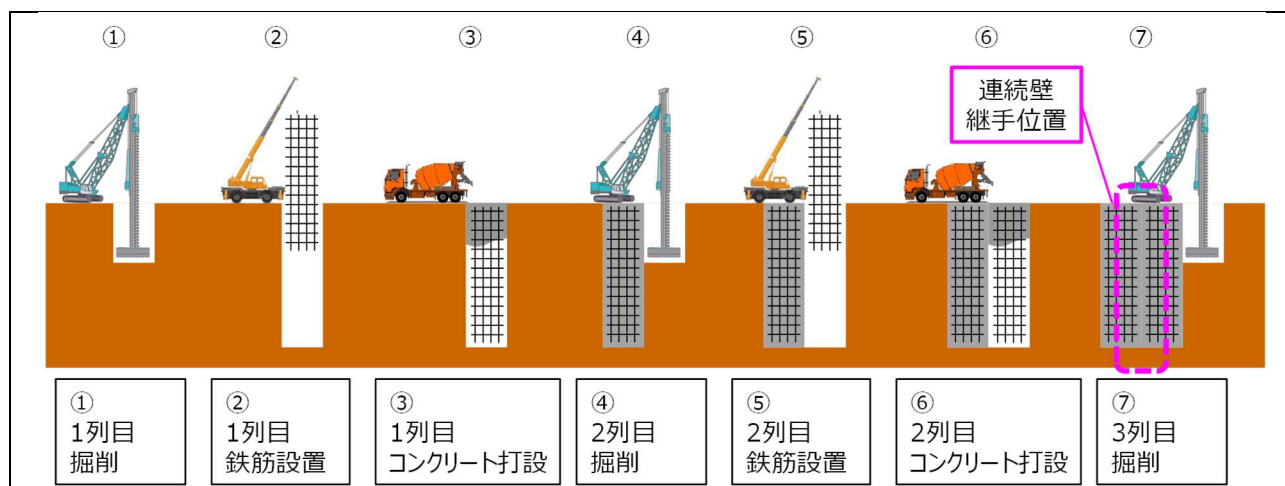


図 3-5 地中連続壁の施工方法概要

図 3-6 に地中連続壁継手位置の部材断面図を示す。地中連続壁内の鉄筋は、深さ方向の鉄筋（縦筋）は連続して配筋されるが、幅方向（水平筋）の配筋は、工法によって異なる。

地中連続壁の工法は、水平筋がエレメント毎に分断され、継手位置には鉄筋が配筋されない工法（図中(a)）と継手位置にも鉄筋を配筋し、鉄筋がエレメント間に作用する力を負担できる工法（図中(b)）の 2 つに大きく分類される。このうち、(b)の水平筋定着が可能な工法は、平成初期に普及した工法であるとともに、本庁舎の施工時の写真(図 3-7)から判断し、本庁舎の地中連続壁の工法は図 3-6(a)の水平筋重ね継手無しとして検討を行う。

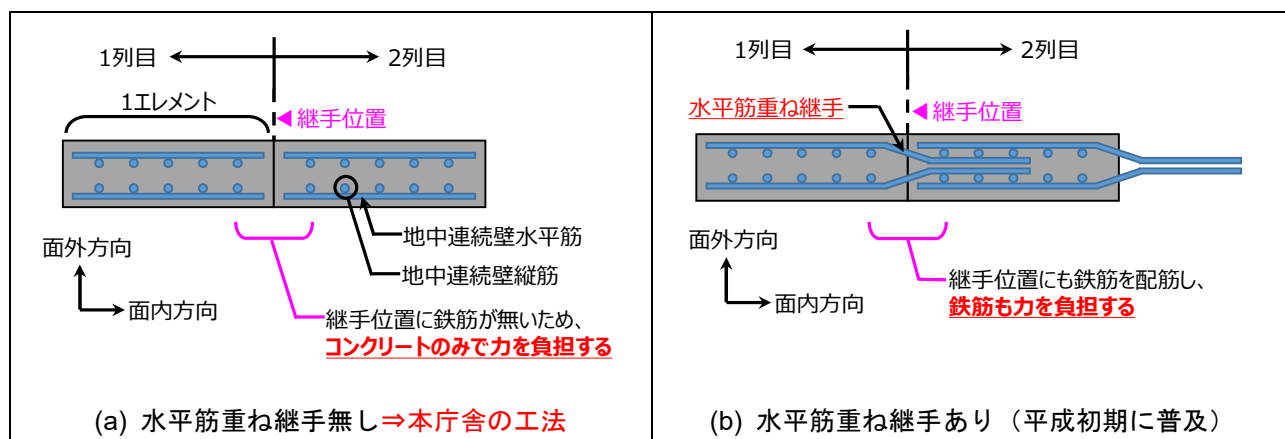


図 3-6 地中連続壁継手位置の部材断面図

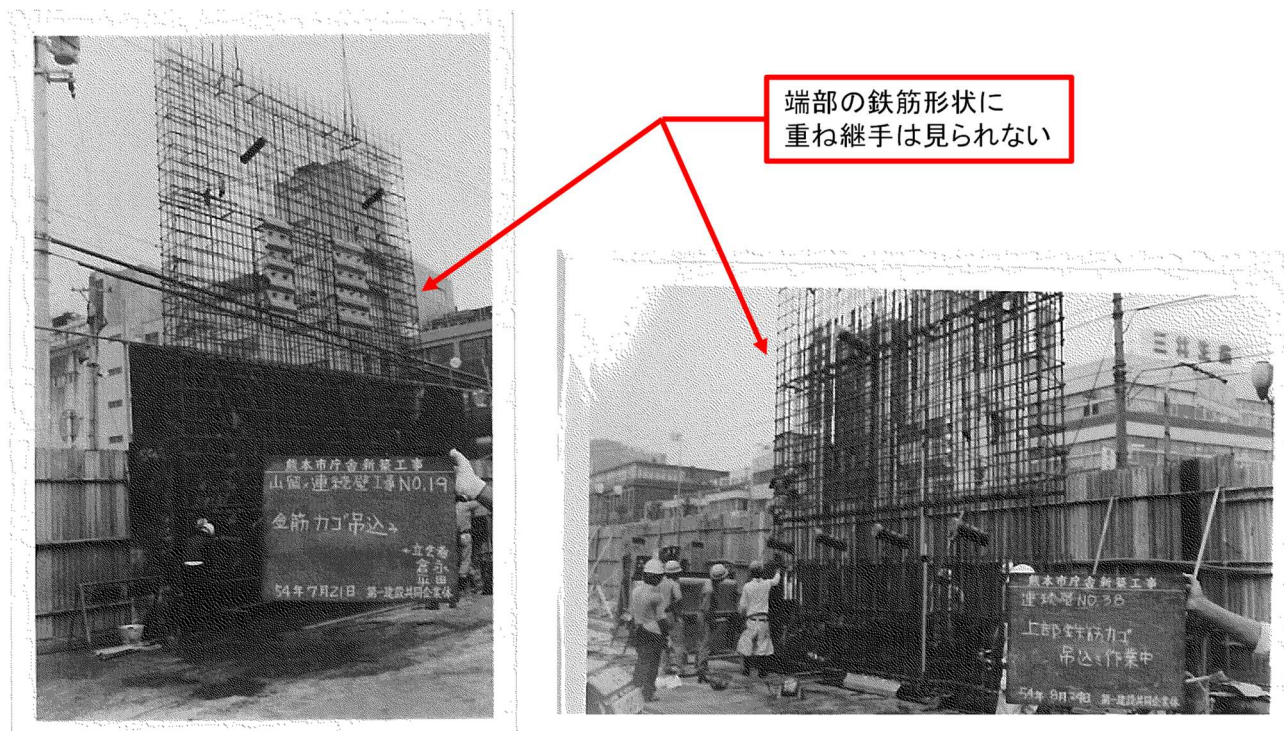
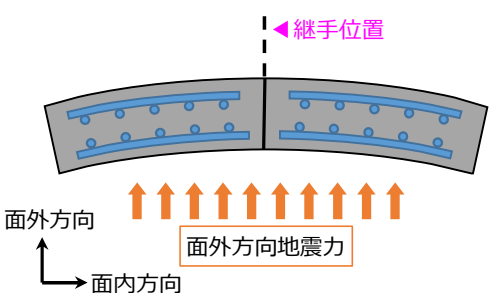
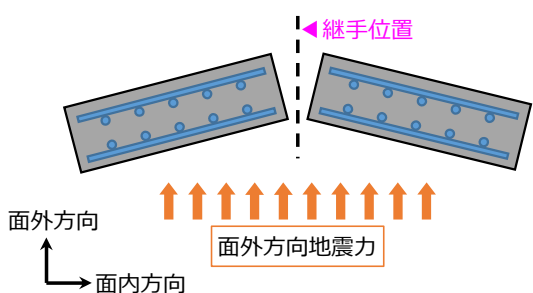
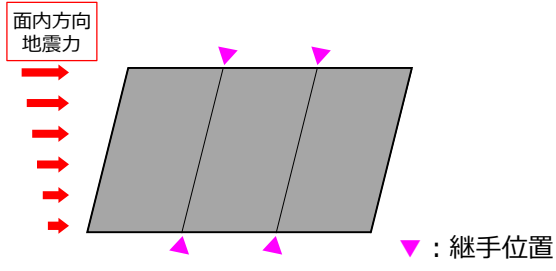
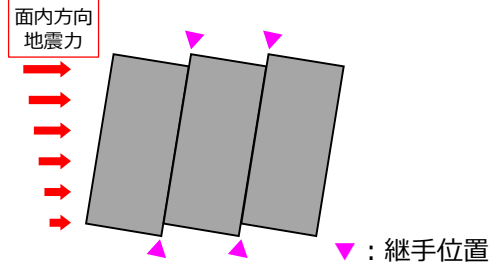


図 3-7 本庁舎地中連続壁施工写真

水平筋の重ね継手が無い地中連続壁では、継手部に作用するエレメント間の応力の伝達はコンクリートのみで行われる。表 3-1 上段に示すように、地震時に地中連続壁の面外方向に地盤変位が作用すると、地中連続壁は大きく曲がり、壁に曲げモーメントが発生する。継手位置において、曲げモーメントが伝達可能であれば、地震時に連続壁が一体となって抵抗できるが、伝達できない場合では、壁エレメント毎に別々に抵抗することとなり、耐震性能は小さくなる。

以降では、大地震時の地中連続壁の健全性の確認を行った後、耐震性能の評価を行う。

表 3-1 継手性能と地震時挙動

| 面外方向地震時挙動（平面） | 面外方向曲げモーメントを伝達できる場合                                                                                                                               | 面外方向曲げモーメントを伝達できない場合                                                                                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|               |  <p>継手位置</p> <p>面外方向</p> <p>面内方向</p> <p>面外方向地震力</p>             |  <p>継手位置</p> <p>面外方向</p> <p>面内方向</p> <p>面外方向地震力</p>                   |
| 面内方向地震時挙動（立面） |  <p>面内方向地震力</p> <p>▼：継手位置</p> <p>地震時に一体的な挙動</p> <p>⇒耐震性能 大</p> |  <p>面内方向地震力</p> <p>▼：継手位置</p> <p>地震時にエレメント毎に別々な挙動</p> <p>⇒耐震性能 小</p> |



### 3.3. 地盤変位に対する地中連続壁の検討

#### 3.3.1. 継手部の検討

##### (1) 検討内容

地中連続壁のモデルに大地震時の地盤変位を作用させ、継手位置における応力を確認する。継手部の応力をコンクリートのみで負担可能か否かで、地中連続壁の一体性を確認する。応力解析には、midas iGen Ver.881（マイダスアイティジャパン）を用いる。

##### (2) モデル概要

図 3-8 に地中連続壁の解析モデルを示す。竣工図に基づき形状をモデル化し、地下躯体と一体となっている部分は、地下躯体の梁・壁の剛性を考慮する。連壁上端はローラー支持、下端は自由とする。また、スラブの取り付けレベルは剛床仮定とする。

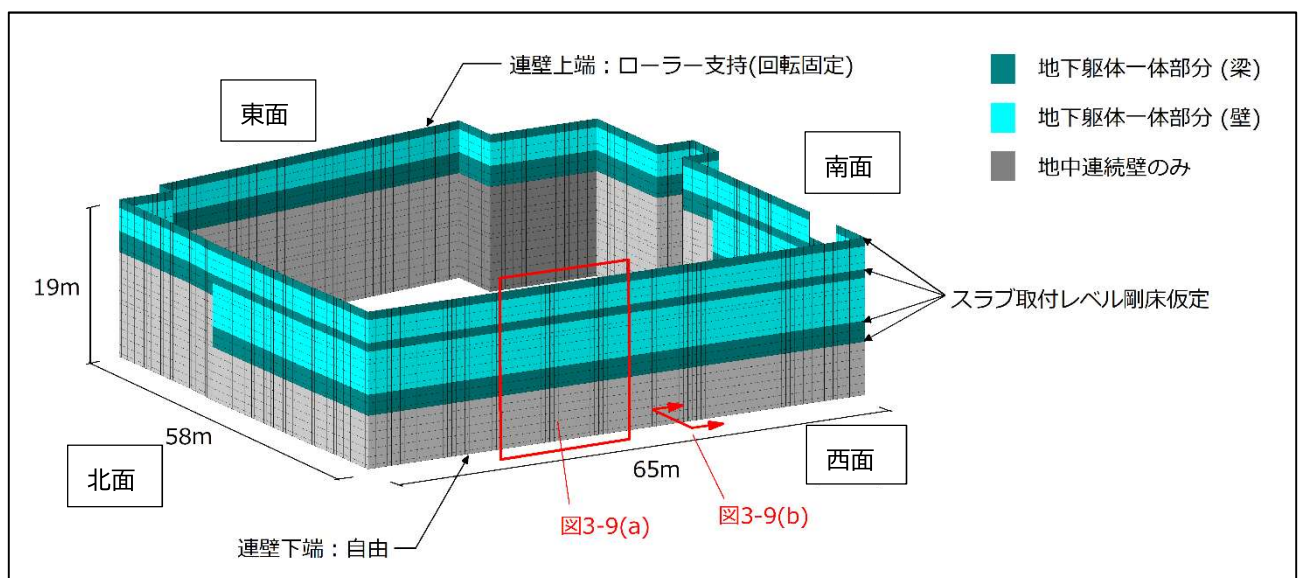


図 3-8 地中連続壁の解析モデル（全体）

図 3-9(a)に解析モデルの立面図を示す。継手位置での応力を確認するため、エレメント幅を図 3-7 に示す施工時の写真から 8.3m 程度と仮定する。以下に、エレメント幅（継手位置間隔）の算出根拠を示す。

<エレメント幅（継手位置間隔）の算出>

- ・地中連続壁の縦筋間隔 : 300 mm（構造図より）
- ・1 エレメントの縦筋本数 : 28 本(ダブル)（図 3-7 より）
- ・両端のかぶり厚 : 200 mm

上記の条件から、エレメント幅を以下のように仮定する。

$$300 \times (28 - 1) + 200 = 8300 \text{ mm} \rightarrow \underline{8.3 \text{ m}}$$

図 3-9(b)に水平地盤ばねと地盤変位の概念図を示す。検討する壁面の面外方向に地盤変位を水平地盤バネを介して作用させる。水平地盤バネの算出方法は、次節(3)に示す。地盤変位は、第4章に示す応答変位が最大となる「レベル2 告示波 JMAKobe-NS」の自由地盤の応答解析結果を用いる。

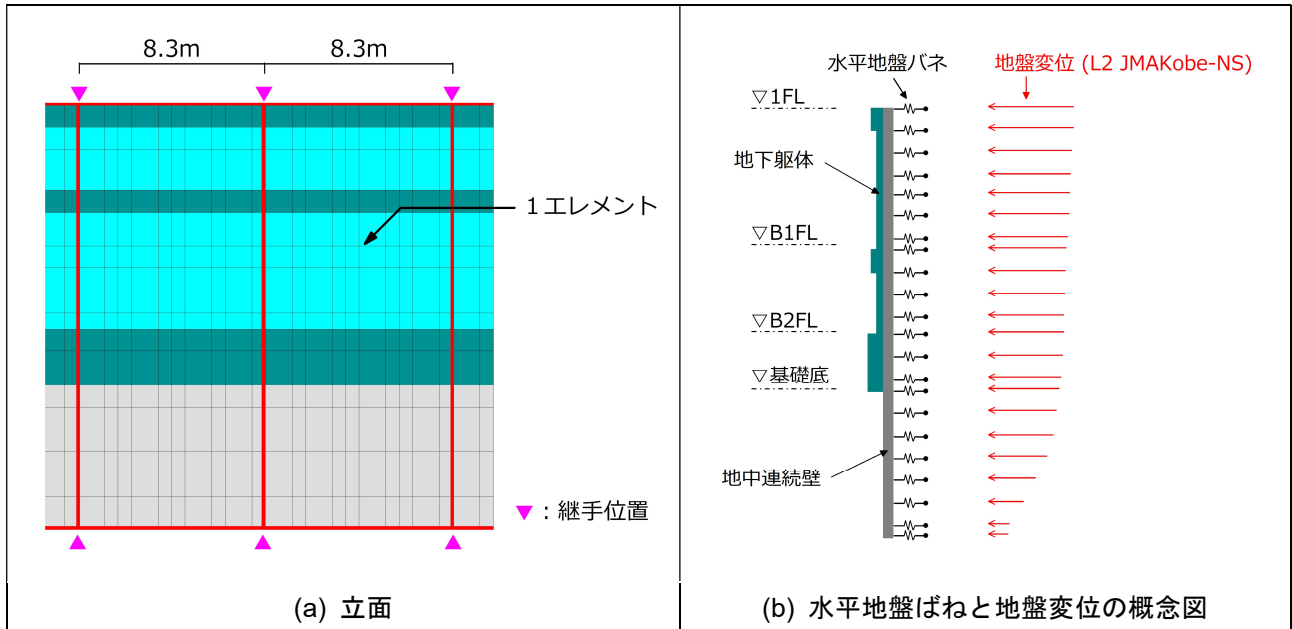


図 3-9 地中連続壁の解析モデル（詳細）

### (3) 水平地盤ばね（水平地盤反力係数）の算出

水平地盤ばねは、『建築基礎構造設計指針』（2019 年改訂版、以下「基礎指針」と記す）に記載されている、水平地盤反力係数の評価式に基づき算出する。以下に基礎指針の評価式を示す。

地盤の水平地盤反力度 $p$  (kN/m<sup>2</sup>) と杭水平変位 $y$  (m) との関係は下式及び図 3-10 のようになる。

$$p = k_h y$$

$k_h$  (kN/m<sup>3</sup>) : 杭水平変位 $y$  (m) 時の水平地盤反力係数

$$0.0 \leq \bar{y} \leq 0.1 \text{ の場合} : k_h = 3.16 k_{h0}$$

$$0.1 < \bar{y} \text{ の場合} : k_{h0} = \frac{k_{h0}}{\sqrt{\bar{y}}} = \frac{k_{h0}}{\sqrt{\frac{y}{y_0}}} = \frac{k_{h0}}{\sqrt{\frac{y}{0.01}}}$$

$k_{h0}$  (kN/m<sup>3</sup>) : 基準水平地盤反力係数（基準水平変位 0.01m に対応した水平地盤反力係数）

$\bar{y}$  : 無次元化水平変位 (=  $y/y_0$ )

$y_0$  (m) : 基準水平変位 (=0.01)

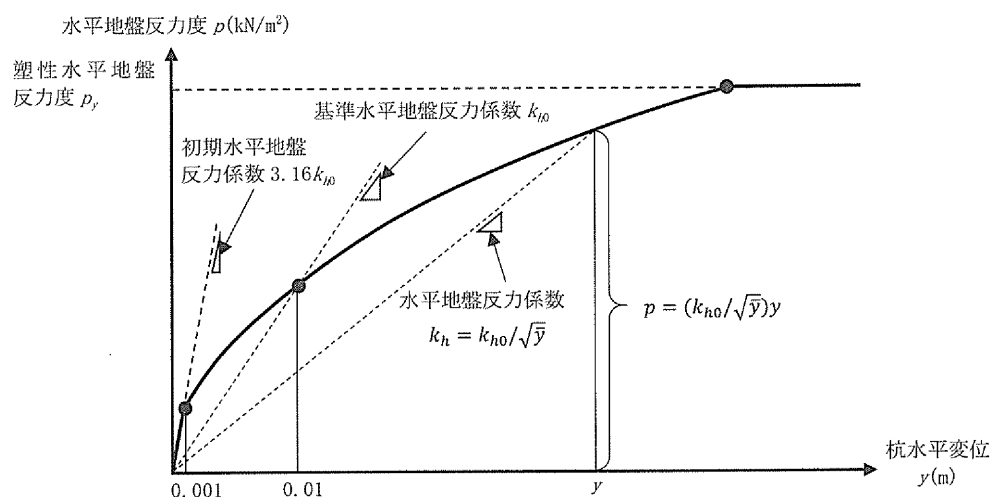


図 3-10 水平地盤反力度と杭水平変位の関係

上記のように、水平地盤反力係数は、地盤の非線形性により、杭の水平変位の増加に伴い低減する。基準水平地盤反力係数 $k_{h0}$ は、以下のように算出する。

$$k_h = k_{h0} = \alpha \xi E_0 \bar{B}^{-\frac{3}{4}} = \alpha \xi E_0 \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

$\alpha$  (1/m) : 80

$\xi$  : 群杭係数

$B$  (m) : 杭径 (=FEM 要素幅 600mm)

$\bar{B}$  : 無次元化杭径

$B_0$  (m) : 杭径の基準値 (=0.01)

$E_0$  (kN/m²) : 地盤の変形係数

$E_0$ は、対象土層の平均 N 値より  $E_0 = 700N$ で推定する。

本検討では、水平地盤ばねを弾性とし、連壁と地盤の相対変位が 0.01m ( $k_h/k_{h0} = 1$ ) であるときの地盤反力係数 $k_h$ の値を用いることとする。

表 3-2 に、本検討で使用する水平地盤反力係数、地盤変位（レベル 2 告示波 JMAKobe-NS）の値を示す。

表 3-2 水平地盤バネ及び地盤変位

| 深度<br>[m] | N値 | E <sub>0</sub><br>[kN/m <sup>2</sup> ] | α<br>[1/m] | ξ | B<br>[m] | K <sub>h</sub> =K <sub>h0</sub><br>[kN/m <sup>3</sup> ] | 地盤変位<br>[cm] |
|-----------|----|----------------------------------------|------------|---|----------|---------------------------------------------------------|--------------|
| 0.00      | 3  | 2,100                                  | 80         | 1 | 0.6      | 7,793                                                   | 8.70         |
| 1.00      | 3  | 2,100                                  | 80         | 1 | 0.6      | 7,793                                                   | 8.68         |
| 2.00      | 50 | 35,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 129,881                                                 | 8.66         |
| 3.00      | 22 | 15,400                                 | 80         | 1 | 0.6      | 57,148                                                  | 8.64         |
| 3.83      | 28 | 19,600                                 | 80         | 1 | 0.6      | 72,733                                                  | 8.63         |
| 4.83      | 32 | 22,400                                 | 80         | 1 | 0.6      | 83,124                                                  | 8.57         |
| 5.83      | 30 | 21,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 77,928                                                  | 8.51         |
| 6.33      | 30 | 21,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 77,928                                                  | 8.49         |
| 7.33      | 6  | 4,200                                  | 80         | 1 | 0.6      | 15,586                                                  | 8.43         |
| 8.33      | 14 | 9,800                                  | 80         | 1 | 0.6      | 36,367                                                  | 8.37         |
| 9.33      | 26 | 18,200                                 | 80         | 1 | 0.6      | 67,538                                                  | 8.32         |
| 10.05     | 25 | 17,500                                 | 80         | 1 | 0.6      | 64,940                                                  | 8.27         |
| 11.05     | 29 | 20,300                                 | 80         | 1 | 0.6      | 75,331                                                  | 8.22         |
| 12.05     | 50 | 35,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 129,881                                                 | 8.14         |
| 12.55     | 50 | 35,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 129,881                                                 | 8.11         |
| 13.55     | 50 | 35,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 129,881                                                 | 8.02         |
| 14.55     | 34 | 23,800                                 | 80         | 1 | 0.6      | 88,319                                                  | 7.92         |
| 15.55     | 6  | 4,200                                  | 80         | 1 | 0.6      | 15,586                                                  | 5.60         |
| 16.55     | 6  | 4,200                                  | 80         | 1 | 0.6      | 15,586                                                  | 2.68         |
| 17.55     | 31 | 21,700                                 | 80         | 1 | 0.6      | 80,526                                                  | 1.55         |
| 18.55     | 31 | 21,700                                 | 80         | 1 | 0.6      | 80,526                                                  | 1.51         |
| 19.00     | 50 | 35,000                                 | 80         | 1 | 0.6      | 129,881                                                 | 1.50         |



#### (4) 検討結果

東西南北各方向の解析結果を図 3-11～図 3-14 に示す。図中(a) に地盤変位を作用させたときの面外方向の曲げモーメント図、(b) に地盤変位入力位置を表した平面図を示す。図中の赤、青で塗られた部分がコンクリートの曲げひび割れモーメントを超える部分であることを示す。コンクリートの曲げひび割れモーメントは、以下のように算出する。

＜コンクリートの曲げひび割れモーメントの算出＞

面外方向における、コンクリート（厚さ 600mm）の単位幅あたりの曲げひび割れモーメント  $M_{cr}$  は、

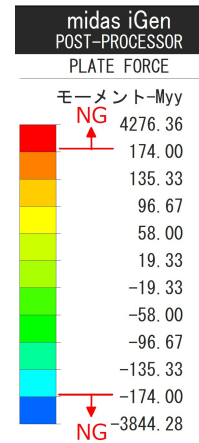
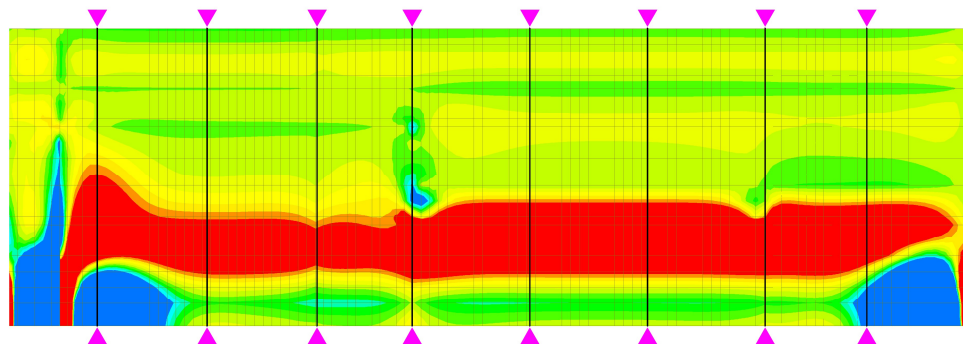
$$M_{cr} = \sigma_t \times Z = 0.56\sqrt{\sigma_B} \times Z = 0.56 \times \sqrt{27} \times (1000 \times 600^2/6) \times 10^{-6} = 174 \text{ kNm/m}$$

$\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) (= 27 N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_t$  : コンクリートの曲げ引張強度 (N/mm<sup>2</sup>) (= 0.56 $\sqrt{\sigma_B}$ )

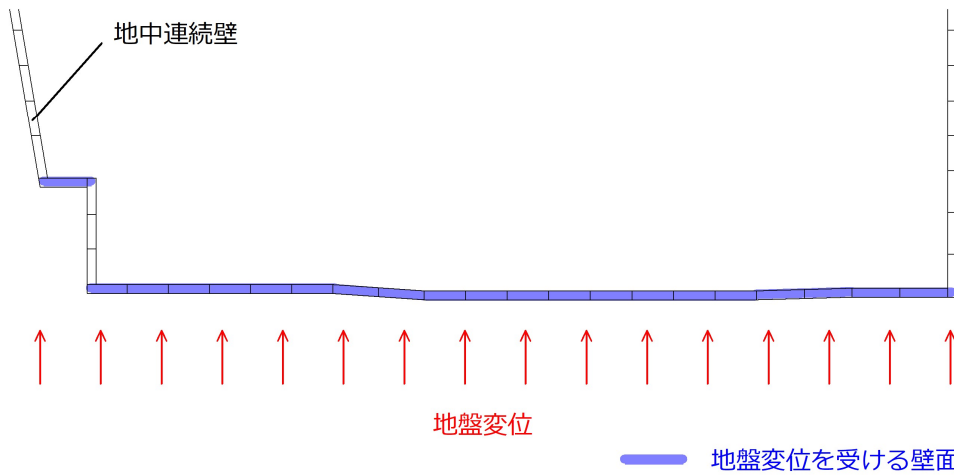
$Z$  : 断面係数 (mm<sup>3</sup>) (=  $B \times D^2/6 = 1000 \times 600^2/6$ )

検討の結果、コンクリートの曲げひび割れモーメントを超える継手が多く存在しており、全ての面で地盤変位による曲げモーメントをコンクリートのみで負担できない結果となった。よって、地中連続壁は、地震時にエレメント毎に別々な挙動を示すと判断する。



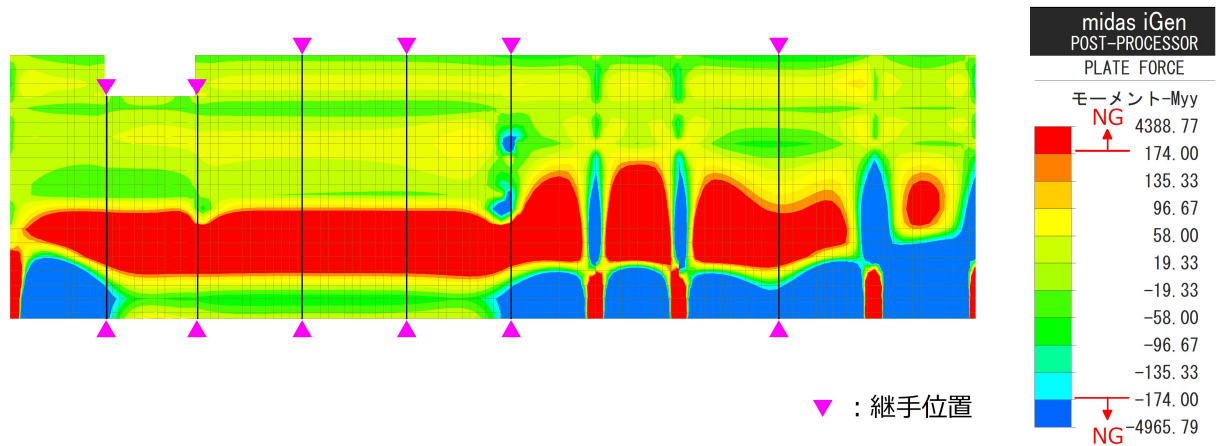
▼ : 継手位置

(a) 面外方向曲げモーメント図（立面）

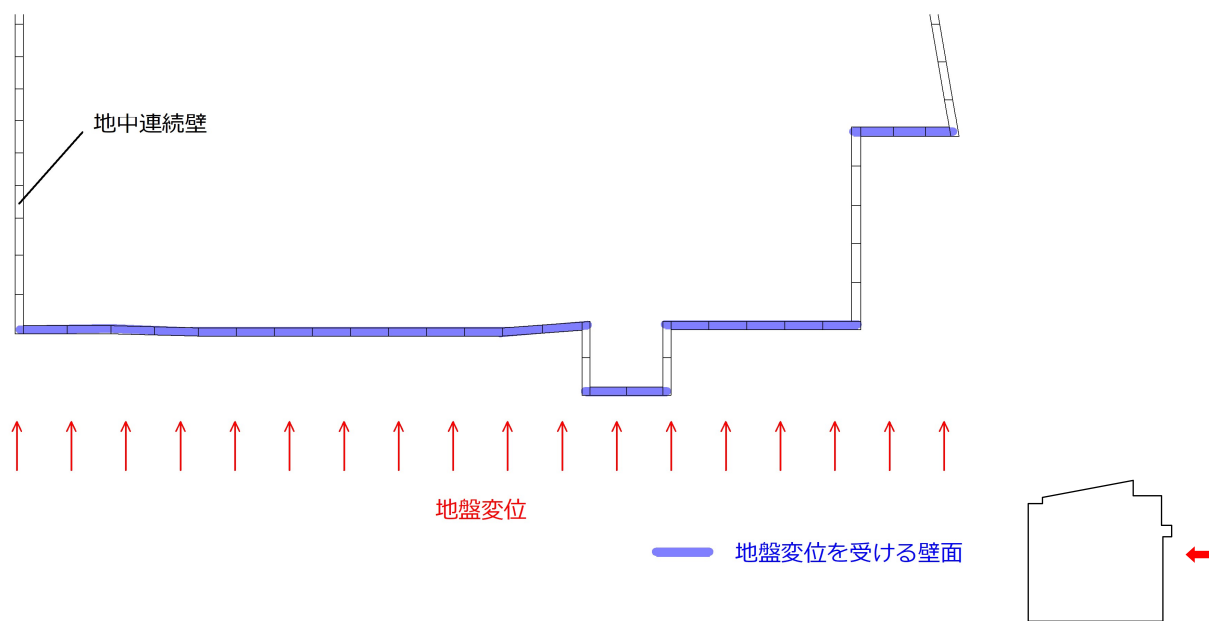


(b) 地盤変位入力位置図（平面）

図 3-11 解析結果（北面）



(a) 面外方向曲げモーメント図（立面）



(b) 地盤変位入力位置図（平面）

図 3-12 解析結果（南面）

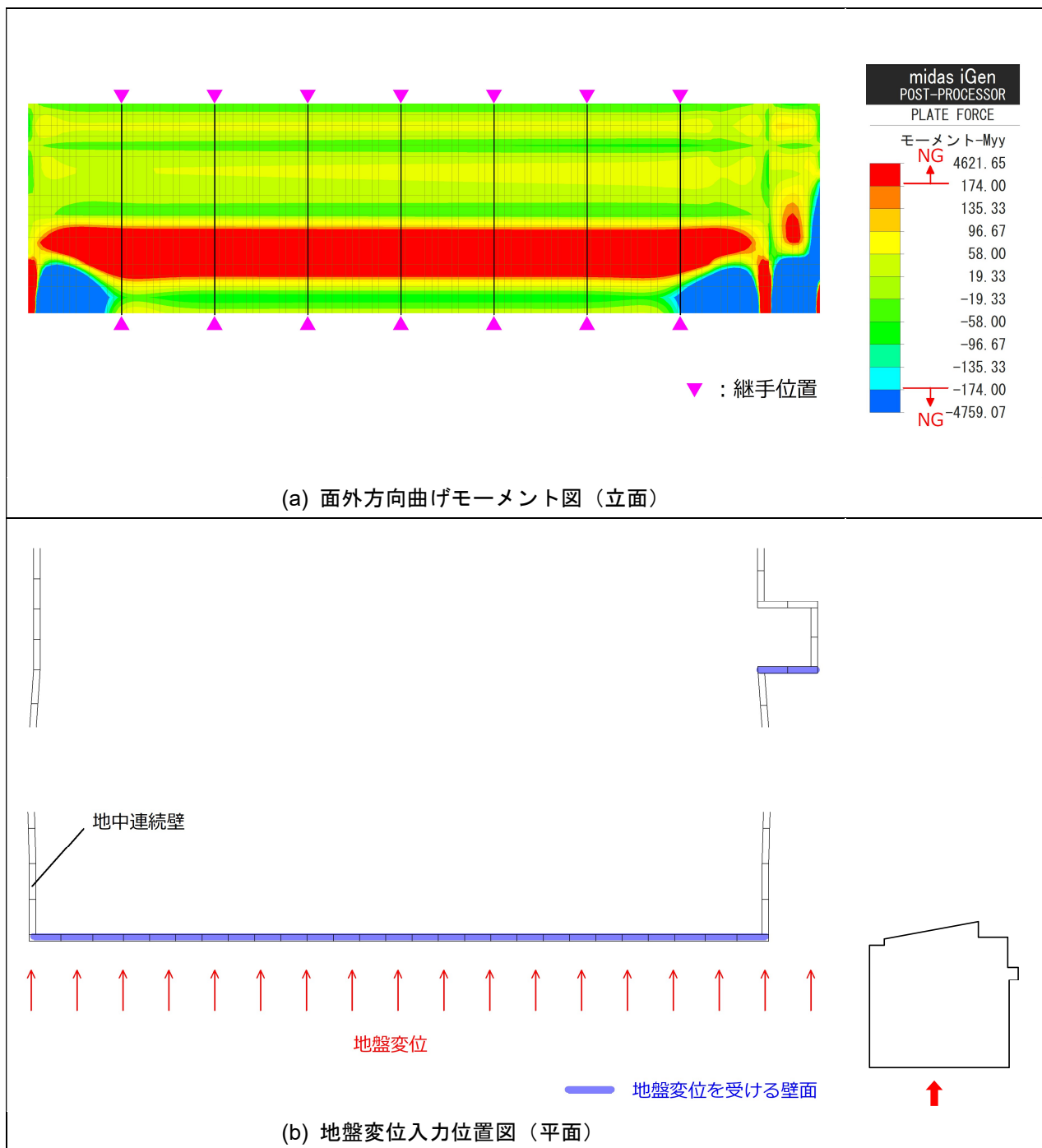
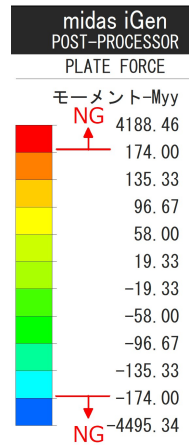
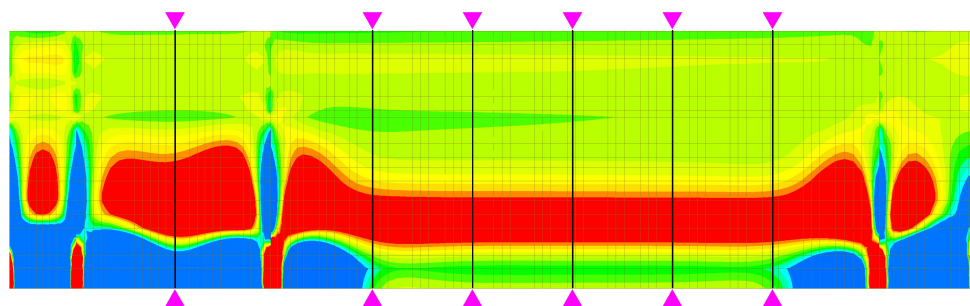
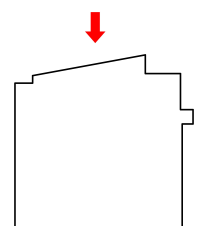
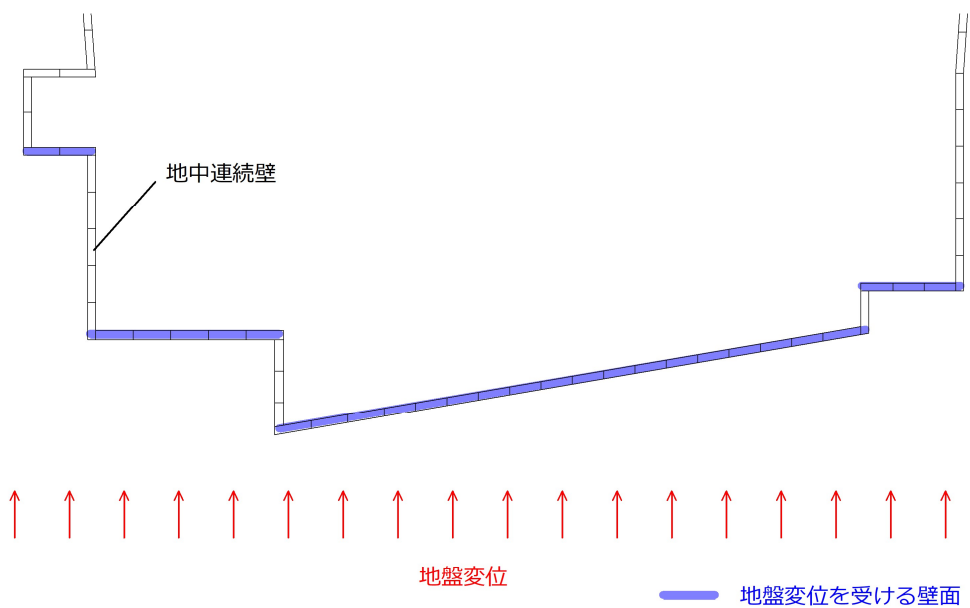


図 3-13 解析結果 (西面)



▼ : 継手位置

(a) 面外方向曲げモーメント図（立面）



(b) 地盤変位入力位置図（平面）

図 3-14 解析結果（東面）

### 3.3.2. エLEMENT単体の検討

#### (1) 検討内容・モデル概要

地中連続壁 1 ELEMENTのモデルに大地震時の地盤変位を作用させ、発生する応力を地中連続壁の縦筋が負担可能か否かを確認する。

図 3-15 に解析モデル図を示す。地中連続壁 1 ELEMENTを地下躯体の梁・壁の剛性を考慮した線材としてモデル化し、面外方向に図 3-9 と同様の水平地盤バネと地盤変位を入力する。応力解析には、midas iGen Ver.881 (マイダスアイティジャパン) を用いる。

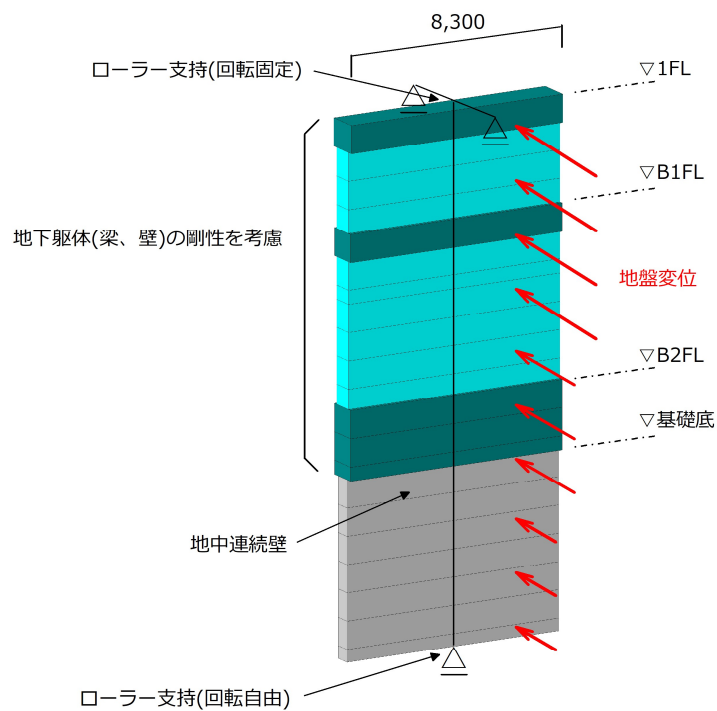


図 3-15 地中連続壁 1 ELEMENTの解析モデル

## (2) 検討結果

図 3-16 に解析結果を示す。地中連続壁に発生する単位幅あたりの最大曲げモーメントMは、

$$M = 14,698 / 8.3 = 1,771 \text{ kNm/m}$$

竣工図より、地中連続壁の縦筋は D19@300 であることから、単位幅あたりの降伏曲げモーメントMuは、

$$Mu = 287 \times 1000 / 300 \times 345 \times 1.1 \times 0.9 \times 600 \times 10^6 = 196 \text{ kNm/m} < 1,771 \text{ kNm/m}$$

以上より、面外方向地震時において、発生曲げモーメントが曲げ耐力を上回る結果となった。よって、地中連続壁は、面外方向地震時に発生応力が耐力を超過する。

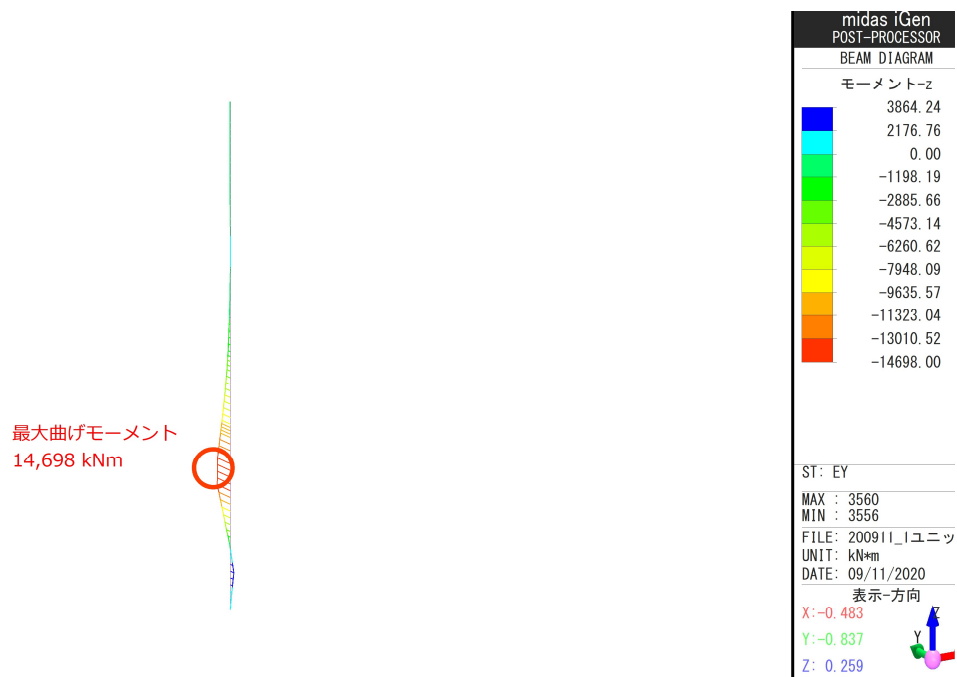


図 3-16 地中連続壁 1 エLEMENTの検討結果

### 3.3.3. 総括

地中連続壁に大地震時（L2 地震時）の地盤変位を作用させた結果、発生応力が壁の曲げ耐力を上回る結果となり、地中連続壁は、大地震時の杭に作用する力の低減効果はない。

## § 4 地震時の杭・建物と地盤の動的相互作用を考慮した 時刻歴応答解析





## 4. 地震時の杭・建物と地盤の動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析

### 4.1. 解析モデル概要

図 4-1 に本検討で用いる動的相互作用を考慮した連成系解析モデルの概念図を示す。動的相互作用とは、杭基礎と建物の地上・地下を一体としてモデル化し、杭には先端部だけではなく、杭中間部にも地盤からの強制変位（時刻歴）を入力することで、地盤変位による応力と建物の地上・地下の慣性力による応力を時刻歴で評価する方法である。

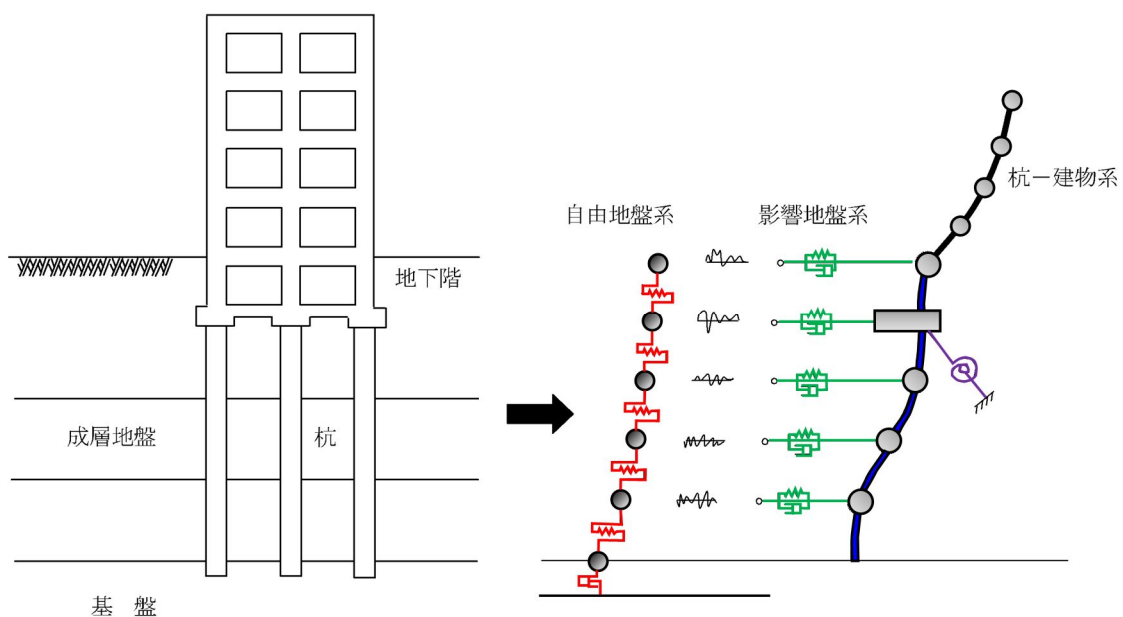


図 4-1 連成系モデルの概念図

本検証で用いる解析モデルは、質点系の解析モデルであり、建物は各階で、杭・地盤は深さ方向に約 1.0m 間隔で重量・剛性・減衰を集約する。

2 章で設定した地盤定数を表 4-1 に、解析モデルの地盤物性を表 4-2 に示す。杭・地盤を 1.0.m 間隔で分割する際に、異なる地層に跨る場合の各物性値は、層厚に対する平均値とした。急激に Vs 値が小さくなる砂混りシルト層（GL-14.6m～16.9m）は、その影響を適切に考慮するため、深さ方向の分割厚さを調整し、解析モデルの層が砂混りシルト層を跨がない様設定した。（表 4-2 地層番号 6～8）。

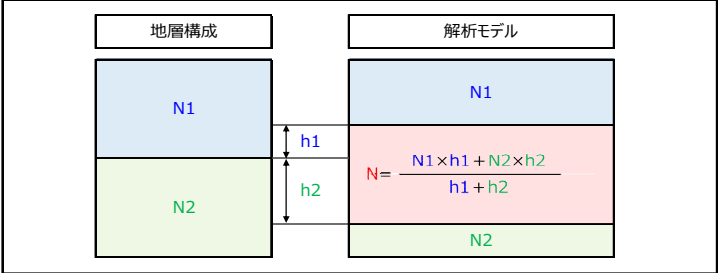
表 4-1 地盤定数

| 検討用地盤         |     |         |          |       |                      |
|---------------|-----|---------|----------|-------|----------------------|
| 深度            | 層厚  | 土質名称    | 平均<br>N値 | Vs    | 密度                   |
| (m)           | (m) |         |          | (m/s) | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 0.00 ～ 3.10   | 3.1 | 埋土      | 3        | 180   | 1.84                 |
| 3.10 ～ 3.80   | 0.7 | 礫混じり砂   | 22       | 200   | 1.84                 |
| 3.80 ～ 6.70   | 2.9 | 砂礫      | 30       | 200   | 1.84                 |
| 6.70 ～ 7.50   | 0.8 | シルト混り細砂 | 6        | 200   | 1.84                 |
| 7.50 ～ 9.35   | 1.9 | 細砂      | 20       | 270   | 1.84                 |
| 9.35 ～ 11.50  | 2.2 | 中砂      | 27       | 270   | 1.84                 |
| 11.50 ～ 14.60 | 3.1 | 砂礫      | 45       | 270   | 1.84                 |
| 14.60 ～ 16.90 | 2.3 | 砂混りシルト  | 6        | 160   | 1.45                 |
| 16.90 ～ 20.60 | 3.7 | 玉石混り砂礫  | 44       | 370   | 2.04                 |
| 20.60 ～ 25.70 | 5.1 | 強風化岩    | 16       | 220   | 1.94                 |
| 25.70 ～ 32.00 | 6.3 | 風化岩     | 46       | 490   | 2.14                 |

表 4-2 解析モデル

|       | 深度              | 層厚    | 地層<br>番号 | 層<br>番号 | 階<br>番号 | 物性値             |            |             | 土質名称             | 動的変形特性<br><br>(G/G0, h-γ曲線) |
|-------|-----------------|-------|----------|---------|---------|-----------------|------------|-------------|------------------|-----------------------------|
|       |                 |       |          |         |         | N値              | Vs         | 密度          |                  |                             |
|       | (m)             | (m)   |          |         |         |                 | (m/s)      | (g/cm³)     |                  |                             |
| B1    | 0.000 ~ 3.800   | 3.8   | 1        | 2       | 2       | <u>7</u>        | <u>184</u> | <u>1.84</u> | 埋土,礫混じり砂         | 黄色本 (砂質土)                   |
| B2    | 3.800 ~ 11.175  | 7.375 | 2        | 1       | 1       | <u>24</u>       | <u>235</u> | <u>1.84</u> | 砂礫,シルト混り細砂,細砂,中砂 | 黄色本 (砂質土)                   |
| 基礎    | 11.175 ~ 12.650 | 1.475 | 3        | 0       | -1      | <u>41</u>       | <u>270</u> | <u>1.84</u> | 中砂,砂礫            | 黄色本 (砂質土)                   |
| 杭     | 12.650 ~ 13.650 | 1     | 4        | -1      | -2      | 45              | 270        | 1.84        | 砂礫               | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 13.650 ~ 14.600 | 0.95  | 5        | -2      | -3      | 45              | 270        | 1.84        | 砂礫               | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 14.600 ~ 15.370 | 0.77  | 6        | -3      | -4      | 6               | 160        | 1.45        | 砂混りシルト           | H29_2-A-3                   |
|       | 15.370 ~ 16.130 | 0.76  | 7        | -4      | -5      | 6               | 160        | 1.45        | 砂混りシルト           | H29_2-A-3                   |
|       | 16.130 ~ 16.900 | 0.77  | 8        | -5      | -6      | 6               | 160        | 1.45        | 砂混りシルト           | H29_2-A-3                   |
|       | 16.900 ~ 17.900 | 1     | 9        | -6      | -7      | 44              | 370        | 2.04        | 玉石混り砂礫           | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 17.900 ~ 18.900 | 1     | 10       | -7      | -8      | 44              | 370        | 2.04        | 玉石混り砂礫           | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 18.900 ~ 19.900 | 1     | 11       | -8      | -9      | 44              | 370        | 2.04        | 玉石混り砂礫           | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 19.900 ~ 20.900 | 1     | 12       | -9      | -10     | <u>36</u>       | <u>325</u> | <u>2.01</u> | 玉石混り砂礫,強風化岩      | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 20.900 ~ 21.900 | 1     | 13       | -10     | -11     | 16              | 220        | 1.94        | 強風化岩             | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 21.900 ~ 22.900 | 1     | 14       | -11     | -12     | 16              | 220        | 1.94        | 強風化岩             | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 22.900 ~ 23.900 | 1     | 15       | -12     | -13     | 16              | 220        | 1.94        | 強風化岩             | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 23.900 ~ 24.900 | 1     | 16       | -13     | -14     | 16              | 220        | 1.94        | 強風化岩             | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 24.900 ~ 25.900 | 1     | 17       | -14     | -15     | <u>22</u>       | <u>274</u> | <u>1.98</u> | 強風化岩,風化岩         | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 25.900 ~ 26.900 | 1     | 18       | -15     | -16     | 46              | 490        | 2.14        | 風化岩              | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 26.900 ~ 27.900 | 1     | 19       | -16     | -17     | 46              | 490        | 2.14        | 風化岩              | 黄色本 (砂質土)                   |
|       | 27.900 ~ 29.000 | 1.1   | 20       | -17     | -18     | 46              | 490        | 2.14        | 風化岩              | 黄色本 (砂質土)                   |
| 工学的基礎 |                 |       |          |         |         | (000:層厚に対する平均値) |            |             |                  |                             |

異なる地層に跨る場合の層厚に対する平均値算出概要



砂混りシルト層 (GL-14.6m~16.9m) の扱い

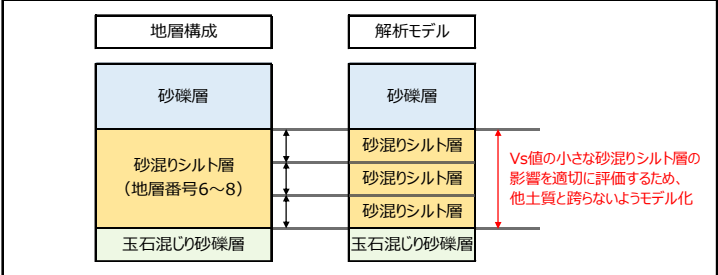


図 4-2 に解析モデルの概要を示す。解析モデルは、自由地盤系と杭・建物系（連成系）の 2 つの系で構成される。自由地盤系は「自由地盤ばね」1 種類でモデル化する。連成系は、建物を各階で集約した「上部構造ばね」、杭を約 1.0m 間隔で集約した「杭ばね」、基礎下の地盤の剛性・減衰を考慮した「建物下地盤ばね」、建物周囲の地盤の剛性・減衰を考慮した「影響地盤ばね」、の 4 種類で構成される。各ばねに設定した数値とその算出根拠は 4.2 節で示す。

動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析は、まず自由地盤系の工学的基盤に地震動を入力し、自由地盤の時刻歴応答解析を行う。次に連成系の工学的基盤に地震動を入力すると共に、自由地盤の解析で得られた各質点の強制変位を、影響地盤ばねを介して時刻歴で杭に作用させる。

解析に用いる地震動は、告示波「極めて稀に発生する地震動」とし、Hachinohe-NS、JMAKOBÉ-NS、Random の位相とした 3 波とする。

解析はそれぞれ下記のプログラムを用いて行う。

|            |                                               |
|------------|-----------------------------------------------|
| 自由地盤系      | : k-SHAKE+ for Windows Version 7.0.1（構造計画研究所） |
| 杭・建物系（連成系） | : RESP-S Version 1.02（構造計画研究所）                |

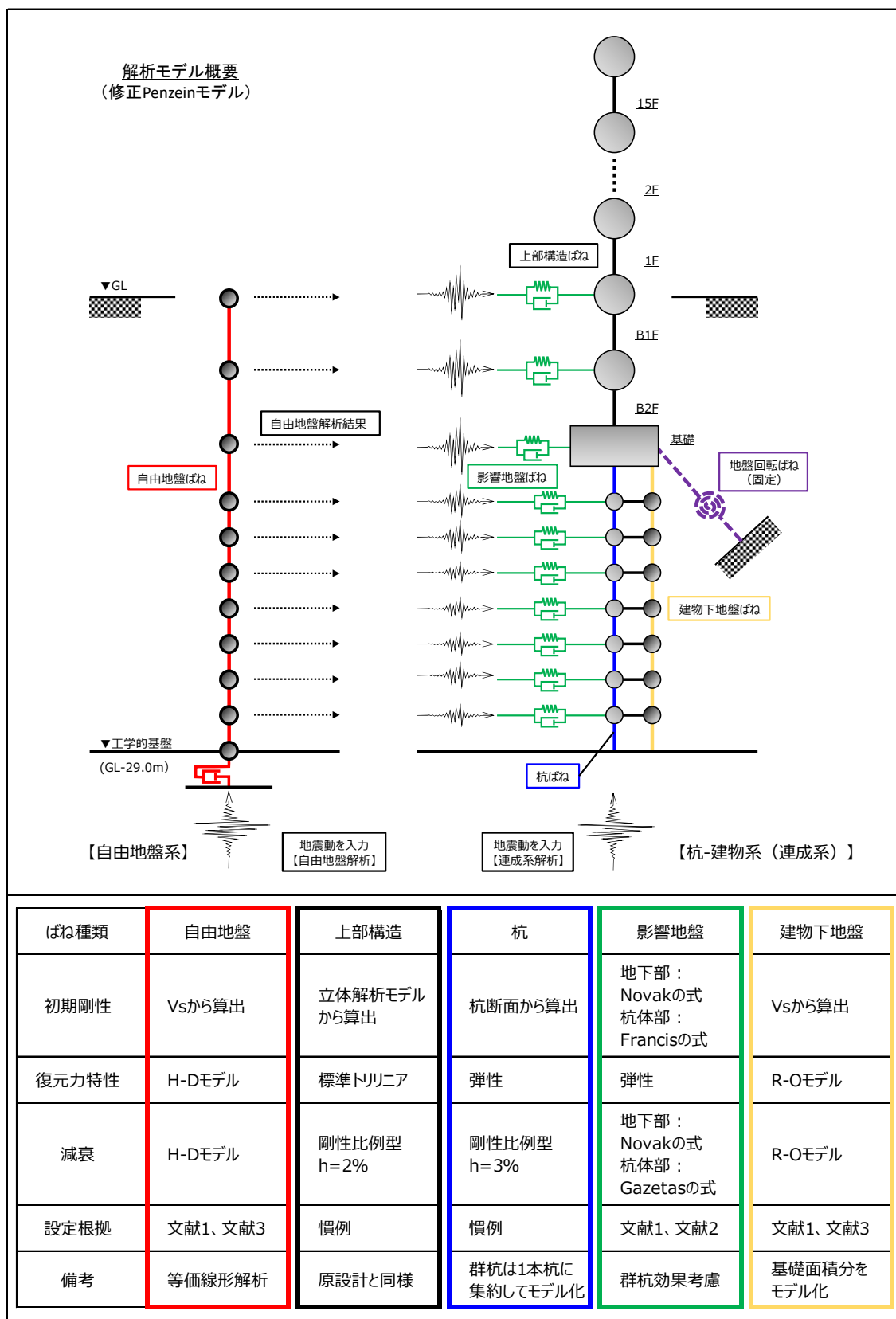


図 4-2 動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析モデル概要

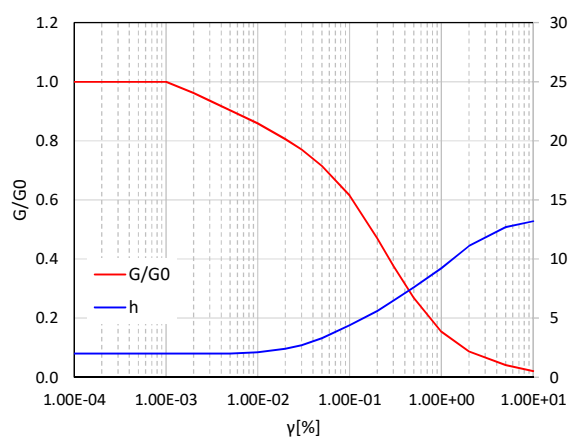
## 4.2. 各種パラメータの設定

### 4.2.1. 自由地盤

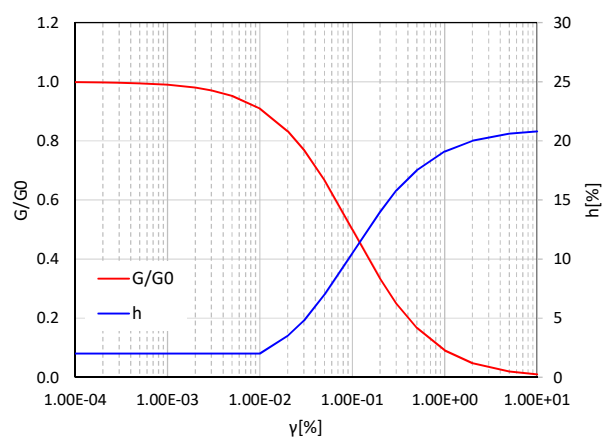
自由地盤の解析モデルは、表 4-2 に示す値を使用し、表 4-3 の設定とした。土の動的変形特性は、平成 29 年度調査 No.2 の採取資料（H29-2-A-3）と文献（2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（建築行政情報センター、2015）以降 黄色本）を適用した。せん断剛性比  $G/G_0$  と減衰係数  $h$  の歪み依存曲線を図 4-3 及び表 4-4 に示す。

表 4-3 自由地盤解析モデルと初期剛性、動的変形特性

| 深度<br>(m)       | 層厚<br>(m) | 地層<br>番号 | 物性値         |                    |                      | 土質名称                | 動的変形特性<br>( $G/G_0, h-\gamma$ 曲線) |
|-----------------|-----------|----------|-------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------------|
|                 |           |          | Vs<br>(m/s) | 密度<br>( $g/cm^3$ ) | 初期剛性<br>( $kN/m^2$ ) |                     |                                   |
| 0.000 ~ 3.800   | 3.8       | 1        | 184         | 1.84               | 62,295               | 埋土, 礫混じり砂           | 黄色本 (砂質土)                         |
| 3.800 ~ 11.175  | 7.375     | 2        | 235         | 1.84               | 101,614              | 砂礫, シルト混り細砂, 細砂, 中砂 | 黄色本 (砂質土)                         |
| 11.175 ~ 12.650 | 1.475     | 3        | 270         | 1.84               | 134,136              | 中砂, 砂礫              | 黄色本 (砂質土)                         |
| 12.650 ~ 13.650 | 1         | 4        | 270         | 1.84               | 134,136              | 砂礫                  | 黄色本 (砂質土)                         |
| 13.650 ~ 14.600 | 0.95      | 5        | 270         | 1.84               | 134,136              | 砂礫                  | 黄色本 (砂質土)                         |
| 14.600 ~ 15.370 | 0.77      | 6        | 160         | 1.45               | 37,120               | 砂混りシルト              | H29_2-A-3                         |
| 15.370 ~ 16.130 | 0.76      | 7        | 160         | 1.45               | 37,120               | 砂混りシルト              | H29_2-A-3                         |
| 16.130 ~ 16.900 | 0.77      | 8        | 160         | 1.45               | 37,120               | 砂混りシルト              | H29_2-A-3                         |
| 16.900 ~ 17.900 | 1         | 9        | 370         | 2.04               | 279,276              | 玉石混り砂礫              | 黄色本 (砂質土)                         |
| 17.900 ~ 18.900 | 1         | 10       | 370         | 2.04               | 279,276              | 玉石混り砂礫              | 黄色本 (砂質土)                         |
| 18.900 ~ 19.900 | 1         | 11       | 370         | 2.04               | 279,276              | 玉石混り砂礫              | 黄色本 (砂質土)                         |
| 19.900 ~ 20.900 | 1         | 12       | 325         | 2.01               | 212,306              | 玉石混り砂礫, 強風化岩        | 黄色本 (砂質土)                         |
| 20.900 ~ 21.900 | 1         | 13       | 220         | 1.94               | 93,896               | 強風化岩                | 黄色本 (砂質土)                         |
| 21.900 ~ 22.900 | 1         | 14       | 220         | 1.94               | 93,896               | 強風化岩                | 黄色本 (砂質土)                         |
| 22.900 ~ 23.900 | 1         | 15       | 220         | 1.94               | 93,896               | 強風化岩                | 黄色本 (砂質土)                         |
| 23.900 ~ 24.900 | 1         | 16       | 220         | 1.94               | 93,896               | 強風化岩                | 黄色本 (砂質土)                         |
| 24.900 ~ 25.900 | 1         | 17       | 274         | 1.98               | 148,650              | 強風化岩, 風化岩           | 黄色本 (砂質土)                         |
| 25.900 ~ 26.900 | 1         | 18       | 490         | 2.14               | 513,814              | 風化岩                 | 黄色本 (砂質土)                         |
| 26.900 ~ 27.900 | 1         | 19       | 490         | 2.14               | 513,814              | 風化岩                 | 黄色本 (砂質土)                         |
| 27.900 ~ 29.000 | 1.1       | 20       | 490         | 2.14               | 513,814              | 風化岩                 | 黄色本 (砂質土)                         |



H29-2-A-3 (粘性土)



黄色本 (砂質土)

図 4-3 動的変形特性

表 4-4 動的変形特性

| 歪(%)     | G/G0             |              | h(%)             |              |
|----------|------------------|--------------|------------------|--------------|
|          | H29-2-A-3<br>粘性土 | 黄色本<br>(砂質土) | H29-2-A-3<br>粘性土 | 黄色本<br>(砂質土) |
| 1.00E-04 | 1.000            | 0.999        | 2.0              | 2.0          |
| 2.00E-04 | 1.000            | 0.998        | 2.0              | 2.0          |
| 3.00E-04 | 1.000            | 0.997        | 2.0              | 2.0          |
| 5.00E-04 | 1.000            | 0.995        | 2.0              | 2.0          |
| 1.00E-03 | 1.000            | 0.990        | 2.0              | 2.0          |
| 2.00E-03 | 0.962            | 0.980        | 2.0              | 2.0          |
| 3.00E-03 | 0.936            | 0.971        | 2.0              | 2.0          |
| 5.00E-03 | 0.903            | 0.952        | 2.0              | 2.0          |
| 1.00E-02 | 0.859            | 0.909        | 2.1              | 2.0          |
| 2.00E-02 | 0.806            | 0.833        | 2.4              | 3.5          |
| 3.00E-02 | 0.771            | 0.769        | 2.7              | 4.8          |
| 5.00E-02 | 0.715            | 0.667        | 3.3              | 7.0          |
| 1.00E-01 | 0.615            | 0.500        | 4.4              | 10.5         |
| 2.00E-01 | 0.471            | 0.333        | 5.6              | 14.0         |
| 3.00E-01 | 0.377            | 0.250        | 6.5              | 15.8         |
| 5.00E-01 | 0.269            | 0.167        | 7.6              | 17.5         |
| 1.00E+00 | 0.154            | 0.091        | 9.2              | 19.1         |
| 2.00E+00 | 0.087            | 0.048        | 11.1             | 20.0         |
| 5.00E+00 | 0.041            | 0.020        | 12.7             | 20.6         |
| 1.00E+01 | 0.021            | 0.010        | 13.2             | 20.8         |



#### 4.2.2. 上部構造

##### (1) 上部構造の重量及び復元力特性

上部構造モデルは一貫計算ソフト Super Build/SS3（ユニオンシステム株式会社）を用いてモデル化を行う。解析モデルは H29 年度耐震安全性検証で用いられたモデルと同じものとする。

地上の復元力特性は、水平外力分布を原設計時の設計用せん断力分布として静的増分解析を行い、下記手順により、Tri-Linear に置換した。

- ・ 第 1 折れ点荷重は、割線剛性が初期剛性の 95% になった荷重とし、その変形は初期剛性を延長して求める。
- ・ 第 3 点は 1/100 程度に設定し、その点までの包絡面積がスケルトンカーブの包絡面積と等しくなるように第 2 折れ点を求める。（下図における (A) = (B)）
- ・ なお、B1F、最上階など、剛性が高く、層間変形角が非常に小さい層においては、静的増分解析の最終ステップの層間変形角を第 3 点とする。
- ・ 第 3 勾配は、第 3 点の接線勾配とする。

また、履歴特性は S 造主体とし、標準型として設定した。

地下躯体は弾性とする。

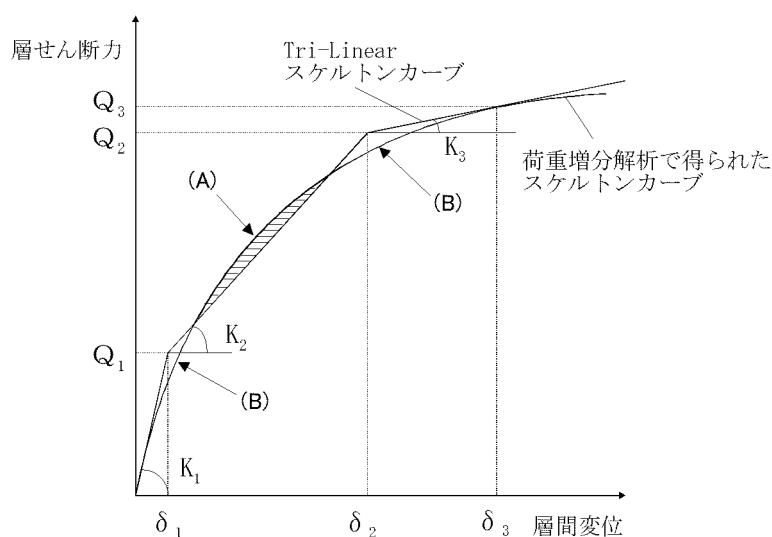


図 4-4 復元力特性のモデル化

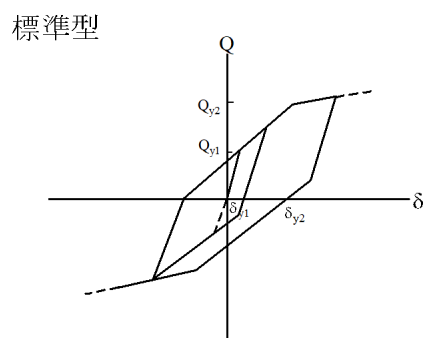


図 4-5 標準型 履歴特性

上部構造の重量諸元を表 4-5、上部構造の復元力特性を表 4-6 に示す。最下層の基礎重量は、基礎重量に杭頭部分の重量分を加算した。

表 4-5 上部構造の重量諸元

| モデル入力 |    | 建物 | モデル入力  | 上部構造    |        | 下部杭・地盤 | モデル入力重量       |
|-------|----|----|--------|---------|--------|--------|---------------|
| 階     | 層  | 階  | 階高(cm) | 実階高(cm) | Wi(kN) | 杭W(kN) | 合計WEIT(kN)    |
| 17    | 17 | 15 | 600    | 600     | 11529  |        | <b>11529</b>  |
| 16    | 16 | 14 | 450    | 450     | 20636  |        | <b>20636</b>  |
| 15    | 15 | 13 | 380    | 380     | 14403  |        | <b>14403</b>  |
| 14    | 14 | 12 | 380    | 380     | 12546  |        | <b>12546</b>  |
| 13    | 13 | 11 | 380    | 380     | 12456  |        | <b>12456</b>  |
| 12    | 12 | 10 | 380    | 380     | 12485  |        | <b>12485</b>  |
| 11    | 11 | 9  | 380    | 380     | 12485  |        | <b>12485</b>  |
| 10    | 10 | 8  | 380    | 380     | 12532  |        | <b>12532</b>  |
| 9     | 9  | 7  | 380    | 380     | 12561  |        | <b>12561</b>  |
| 8     | 8  | 6  | 380    | 380     | 12586  |        | <b>12586</b>  |
| 7     | 7  | 5  | 380    | 380     | 12613  |        | <b>12613</b>  |
| 6     | 6  | 4  | 380    | 380     | 12629  |        | <b>12629</b>  |
| 5     | 5  | 3  | 380    | 380     | 32101  |        | <b>32101</b>  |
| 4     | 4  | 2  | 450    | 450     | 25275  |        | <b>25275</b>  |
| 3     | 3  | 1  | 450    | 450     | 24215  |        | <b>24215</b>  |
| 2     | 2  | B1 | 380    | 500     | 71921  |        | <b>71921</b>  |
| 1     | 1  | B2 | 737.5  | 500     | 81522  |        | <b>81522</b>  |
| -1    | 0  | 基礎 | 147.5  |         | 101807 | 6233   | <b>108040</b> |

表 4-6 上部構造の復元力特性

| 階  | X方向     |         |         |            |        |         |            |
|----|---------|---------|---------|------------|--------|---------|------------|
|    | 第 1 剛性  | 第 1 点荷重 | 第2剛性    | 剛性低下率      | 第2点荷重  | 第3剛性    | 剛性低下率      |
|    | (kN/cm) | Q1(kN)  | (kN/cm) | $\alpha_2$ | Q2(kN) | (kN/cm) | $\alpha_3$ |
| 15 | 10459   | 13144   | 3355    | 0.321      | 15078  | 10      | 0.001      |
| 14 | 12201   | 20377   | 4615    | 0.378      | 23964  | 12      | 0.001      |
| 13 | 13814   | 25683   | 3897    | 0.282      | 29425  | 1494    | 0.108      |
| 12 | 14262   | 29432   | 3446    | 0.242      | 33298  | 746     | 0.052      |
| 11 | 15292   | 32394   | 3267    | 0.214      | 36167  | 792     | 0.052      |
| 10 | 15714   | 33590   | 3917    | 0.249      | 38116  | 1144    | 0.073      |
| 9  | 16407   | 35110   | 4232    | 0.258      | 40119  | 1270    | 0.077      |
| 8  | 17418   | 36651   | 4424    | 0.254      | 42107  | 1223    | 0.070      |
| 7  | 18126   | 37673   | 5222    | 0.288      | 43628  | 1074    | 0.059      |
| 6  | 19785   | 39010   | 6552    | 0.331      | 45867  | 566     | 0.029      |
| 5  | 21172   | 39232   | 7735    | 0.365      | 46834  | 834     | 0.039      |
| 4  | 24026   | 40180   | 8929    | 0.372      | 47986  | 1330    | 0.055      |
| 3  | 46247   | 42684   | 26082   | 0.564      | 57772  | 12400   | 0.268      |
| 2  | 32298   | 47306   | 19242   | 0.596      | 64879  | 32      | 0.001      |
| 1  | 43894   | 52700   | 23749   | 0.541      | 71646  | 44      | 0.001      |
| B1 | 660000  |         |         |            |        |         |            |
| B2 | 649000  |         |         |            |        |         |            |

| 階  | Y方向     |         |         |            |        |         |            |
|----|---------|---------|---------|------------|--------|---------|------------|
|    | 第 1 剛性  | 第 1 点荷重 | 第2剛性    | 剛性低下率      | 第2点荷重  | 第3剛性    | 剛性低下率      |
|    | (kN/cm) | Q1(kN)  | (kN/cm) | $\alpha_2$ | Q2(kN) | (kN/cm) | $\alpha_3$ |
| 15 | 9482    | 16322   | 3680    | 0.388      | 17152  | 9       | 0.001      |
| 14 | 10217   | 22760   | 4470    | 0.438      | 27262  | 10      | 0.001      |
| 13 | 13878   | 25852   | 5577    | 0.402      | 32942  | 1817    | 0.131      |
| 12 | 15286   | 27970   | 6045    | 0.395      | 36706  | 1672    | 0.109      |
| 11 | 16449   | 29139   | 6836    | 0.416      | 38626  | 2454    | 0.149      |
| 10 | 17542   | 30479   | 7235    | 0.412      | 41069  | 2365    | 0.135      |
| 9  | 19821   | 32885   | 7525    | 0.380      | 43969  | 1916    | 0.097      |
| 8  | 21450   | 34171   | 8055    | 0.376      | 45949  | 1903    | 0.089      |
| 7  | 22492   | 34011   | 8797    | 0.391      | 46493  | 2299    | 0.102      |
| 6  | 24011   | 34013   | 9506    | 0.396      | 47939  | 2308    | 0.096      |
| 5  | 25725   | 34329   | 9943    | 0.387      | 50555  | 1008    | 0.039      |
| 4  | 29512   | 36384   | 12252   | 0.415      | 50976  | 2135    | 0.072      |
| 3  | 45975   | 45912   | 18411   | 0.400      | 63721  | 2742    | 0.060      |
| 2  | 37155   | 45072   | 17103   | 0.460      | 70445  | 3284    | 0.088      |
| 1  | 51379   | 51756   | 23675   | 0.461      | 77517  | 7249    | 0.141      |
| B1 | 704700  |         |         |            |        |         |            |
| B2 | 628800  |         |         |            |        |         |            |

## (2) 上部構造の減衰

構造体の内部減衰は瞬間剛性比例型とし、以下の減衰マトリクスで表現される。

減衰定数は、 $h=2.0\%$ とする。

$$[C] = \frac{2h_1}{\omega_1} [K]$$

$[K]$ : 主体構造の瞬間剛性マトリクス

$h_1$ : 主体構造の内部粘性減衰の減衰定数 ( $=0.02$ )

$\omega_1$ : 1 次固有円振動数

固有周期は建物のみの固有周期とする。

## 4.2.3. 杭

### (1) 杭体のモデル化及び剛性

杭は多数本数、多種類の杭径が存在するが、1 本に集約してモデル化を行う。

剛性は杭断面から算出し、弾性とする。表 4-7 に杭体の諸元を示す。

なお、杭先端部の支持層は強固であり沈下量が僅かであることと、杭体の軸伸縮量も小さいと想定されるため、基礎底のロッキングは考慮しないモデルとした。

表 4-7 杭体の諸元

| 杭径 B(cm)  |                       | 120         | 130         | 150           | 180         | 各階合計          | 集約モデル<br>総合計  |
|-----------|-----------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| 断面積       | Ap(cm <sup>2</sup> )  | 11,310      | 13,273      | 17,671        | 25,447      |               |               |
| 断面二次モーメント | Ip(cm <sup>4</sup> )  | 10,178,760  | 14,019,848  | 24,850,489    | 51,529,974  |               |               |
| 重量        | W(kN/m/本)             | 27.1        | 31.9        | 42.4          | 61.1        |               |               |
| 杭本数       | n(本)                  |             |             |               |             |               |               |
|           | B1階                   | 12          | 8           | 17            |             | 37            |               |
|           | B2階                   | 17          | 11          | 90            | 4           | 122           | 159           |
| 断面積       | ΣAp(cm <sup>2</sup> ) |             |             |               |             |               |               |
|           | B1階                   | 135,717     | 106,186     | 300,415       |             | 542,317       |               |
|           | B2階                   | 192,265     | 146,006     | 1,590,431     | 101,788     | 2,030,490     | 2,572,807     |
| 断面二次モーメント | ΣIp(cm <sup>4</sup> ) |             |             |               |             |               |               |
|           | B1階                   | 122,145,122 | 112,158,785 | 422,458,309   | 0           | 656,762,216   |               |
|           | B2階                   | 173,038,923 | 154,218,329 | 2,236,543,989 | 206,119,894 | 2,769,921,135 | 3,426,683,351 |
| 重量        | ΣW(kN/m)              |             |             |               |             |               |               |
|           | B1階                   | 326         | 255         | 721           | 0           | 1,302         |               |
|           | B2階                   | 461         | 350         | 3,817         | 244         | 4,873         | 6,175         |

### (2) 杭体の減衰

杭体の減衰は剛性比例型とし、減衰定数は  $h=3.0\%$ とする。

#### 4.2.4. 建物下地盤

##### (1) 剛性及び減衰

建物下地盤は、杭と同一挙動となる地盤の支配面積（建築面積）分の地盤をモデル化する。せん断剛性比  $G/G_0$  と減衰係数  $h$  の歪み依存曲線の設定は自由地盤と同様とし、図 4-3 及び表 4-4 を用いる。支配面積を考慮した初期剛性の値を表 4-8 に示す。

表 4-8 建物下地盤初期剛性

|    | 深度              | 層厚    | 地層<br>番号 | 層<br>番号 | 階<br>番号 | 物性値 |             |                            | 初期剛性                      |              |
|----|-----------------|-------|----------|---------|---------|-----|-------------|----------------------------|---------------------------|--------------|
|    |                 |       |          |         |         | N値  | Vs<br>(m/s) | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | G<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | K<br>(kN/mm) |
|    | (m)             | (m)   |          |         |         |     |             |                            |                           |              |
| B1 | 0.000 ~ 3.800   | 3.8   | 1        | 2       | 2       | 7   | 184         | 1.84                       | 62,295                    | 69,903       |
| B2 | 3.800 ~ 11.175  | 7.375 | 2        | 1       | 1       | 24  | 235         | 1.84                       | 101,614                   | 58,751       |
| 基礎 | 11.175 ~ 12.650 | 1.475 | 3        | 0       | -1      | 41  | 270         | 1.84                       | 134,136                   | 387,774      |
| 杭  | 12.650 ~ 13.650 | 1     | 4        | -1      | -2      | 45  | 270         | 1.84                       | 134,136                   | 571,967      |
|    | 13.650 ~ 14.600 | 0.95  | 5        | -2      | -3      | 45  | 270         | 1.84                       | 134,136                   | 602,070      |
|    | 14.600 ~ 15.370 | 0.77  | 6        | -3      | -4      | 6   | 160         | 1.45                       | 37,120                    | 205,562      |
|    | 15.370 ~ 16.130 | 0.76  | 7        | -4      | -5      | 6   | 160         | 1.45                       | 37,120                    | 208,267      |
|    | 16.130 ~ 16.900 | 0.77  | 8        | -5      | -6      | 6   | 160         | 1.45                       | 37,120                    | 205,562      |
|    | 16.900 ~ 17.900 | 1     | 9        | -6      | -7      | 44  | 370         | 2.04                       | 279,276                   | 1,190,855    |
|    | 17.900 ~ 18.900 | 1     | 10       | -7      | -8      | 44  | 370         | 2.04                       | 279,276                   | 1,190,855    |
|    | 18.900 ~ 19.900 | 1     | 11       | -8      | -9      | 44  | 370         | 2.04                       | 279,276                   | 1,190,855    |
|    | 19.900 ~ 20.900 | 1     | 12       | -9      | -10     | 36  | 325         | 2.01                       | 212,306                   | 905,291      |
|    | 20.900 ~ 21.900 | 1     | 13       | -10     | -11     | 16  | 220         | 1.94                       | 93,896                    | 400,380      |
|    | 21.900 ~ 22.900 | 1     | 14       | -11     | -12     | 16  | 220         | 1.94                       | 93,896                    | 400,380      |
|    | 22.900 ~ 23.900 | 1     | 15       | -12     | -13     | 16  | 220         | 1.94                       | 93,896                    | 400,380      |
|    | 23.900 ~ 24.900 | 1     | 16       | -13     | -14     | 16  | 220         | 1.94                       | 93,896                    | 400,380      |
|    | 24.900 ~ 25.900 | 1     | 17       | -14     | -15     | 22  | 274         | 1.98                       | 148,650                   | 633,858      |
|    | 25.900 ~ 26.900 | 1     | 18       | -15     | -16     | 46  | 490         | 2.14                       | 513,814                   | 2,190,944    |
|    | 26.900 ~ 27.900 | 1     | 19       | -16     | -17     | 46  | 490         | 2.14                       | 513,814                   | 2,190,944    |
|    | 27.900 ~ 29.000 | 1.1   | 20       | -17     | -18     | 46  | 490         | 2.14                       | 513,814                   | 1,991,767    |

##### (2) 復元力特性

建物下地盤の復元力特性は、Ramberg-Osgood モデル（R・O モデル）とする。図 4-6 に R・O モデルの履歴曲線とその関数を示す。

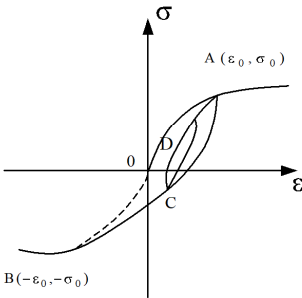
| 復元力特性タイプ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 備考 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 106      | <p><u>Ramberg - Osgood 型</u></p>  <p>骨格曲線 (0→A)</p> $ \sigma  = G_0  \varepsilon  - \alpha \frac{ \sigma ^r}{\sigma_y^{r-1}}$ $G_0 = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y};$ <p>荷重曲線 (A→B)</p> $ \sigma_c  = G_0  \varepsilon  - \alpha \frac{ \sigma ^r}{\sigma_y^{r-1}}$ $\sigma_c = (\sigma - \sigma_0) / 2$ $\varepsilon_c = (\varepsilon - \varepsilon_0) / 2$ <p><math>\sigma_y</math> = 降伏応力度<br/> <math>\varepsilon_y</math> = 降伏歪度</p> |    |

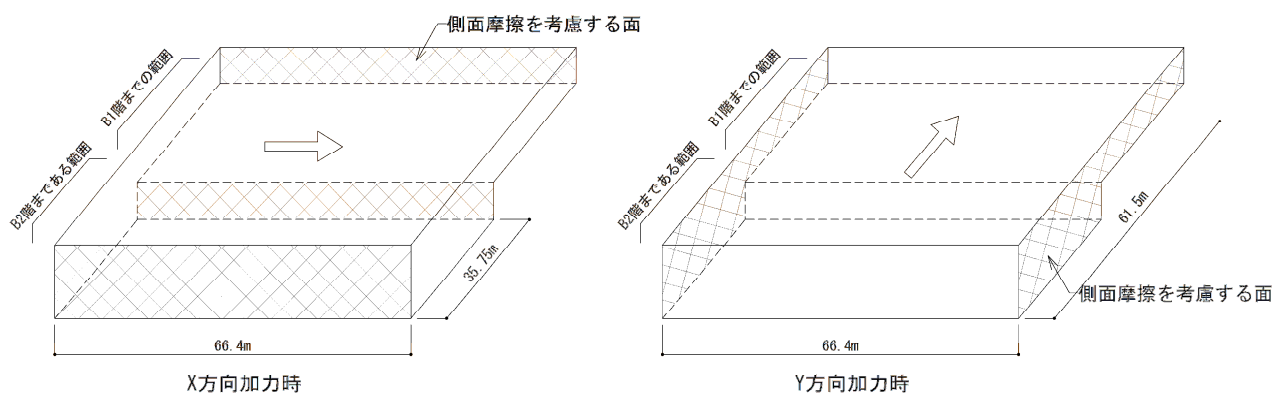
図 4-6 復元力特性 (R・O モデル)

#### 4.2.5. 影響地盤

##### (1) 地下部

地下部側面地盤バネ及び減衰は、地下階を等価な円形断面とみなし、弾性波動論解 Novak の式<sup>文献 1)</sup>により算定する。本建物は B1 階と B2 階で基礎形状が異なるが、等価な円断面は一つであるため、加力時の側面摩擦面範囲を考慮して X 加力方向、Y 加力方向それぞれで円断面を設定した。(図 4-7)

Novak バネを算出するための諸条件を表 4-9 に、算出された側面地盤バネを図 4-8 に示す。バネ剛性の振動数特性の定数化は実部の静的値 (0Hz 付近) とし、減衰係数は虚部の低振動数領域 (5Hz 以下) の下限値を用いた。採用した値を表 4-10 に示す。



|     | 建物基礎形状 |       | 等価円半径 | 備考                      |
|-----|--------|-------|-------|-------------------------|
|     | Bx(m)  | By(m) | ro(m) |                         |
| X方向 | 66.4   | 35.75 | 27.49 | X方向加力時は、B2階部分の面積        |
| Y方向 | 66.4   | 61.5  | 36.05 | Y方向加力時は、B1階部分の面積 (基礎全体) |

図 4-7 等価円断面の設定

表 4-9 Novak バネの算出条件

| 階  | モデル階高 | Vs    | 採用Vs' | 層厚    | 密度            | ポアソン比 |
|----|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|
|    | (m)   | (m/s) | (m/s) | Dp(m) | $\rho(t/m^3)$ | $\nu$ |
| B1 | 3.8   | 184   | 184   | 1.90  | 1.84          | 0.455 |
| B2 | 7.375 | 235   | 200   | 5.59  | 1.84          | 0.489 |
| 基礎 | 1.475 | 270   | 270   | 4.43  | 1.84          | 0.487 |

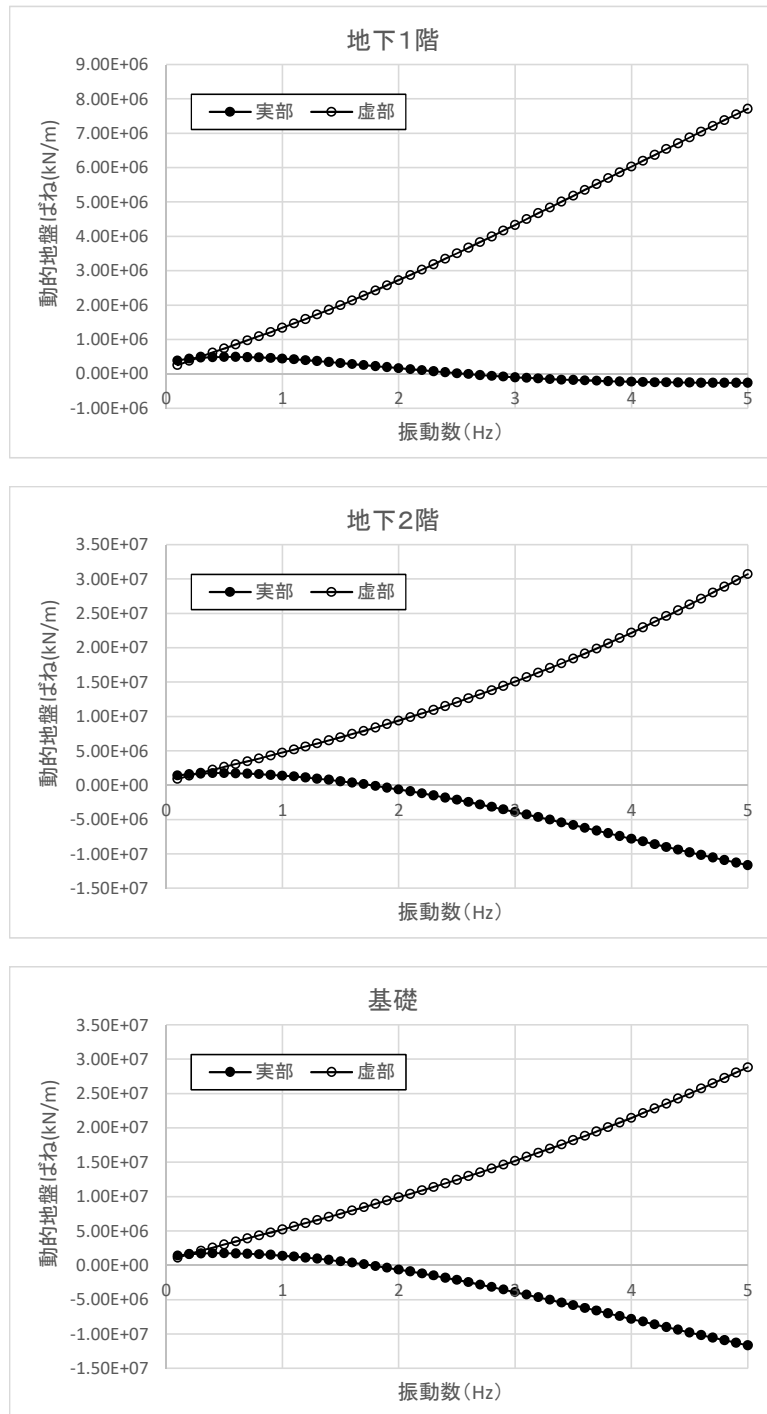


図 4-8 Novak 法による地下側面地盤バネ

表 4-10 採用した地下側面地盤バネ値及び減衰係数

|    | X加力時           |                  | Y加力時           |                  |
|----|----------------|------------------|----------------|------------------|
|    | バネ定数<br>(kN/m) | 減衰係数<br>(kN・s/m) | バネ定数<br>(kN/m) | 減衰係数<br>(kN・s/m) |
| B1 | 3.87E+05       | 2.52E+05         | 4.08E+05       | 2.95E+05         |
| B2 | 1.41E+06       | 9.13E+05         | 1.49E+06       | 1.07E+06         |
| 基礎 | 1.92E+06       | 1.12E+06         | 2.02E+06       | 1.29E+06         |



## (2) 杭体部の特性

### a) 杭周辺地盤のバネ剛性

Francis の式<sup>文献 1),2)</sup>により算出し、群杭効果を考慮する。以下に単杭の場合の Francis の式を示す。

$$k_{fSi} = \frac{1.3E_{Si}}{1 - \nu_{Si}^2} \left( \frac{E_{Si}B^4}{E_p I_p} \right)^{1/12}$$

ここで、 $k_{Si}$  : i 層の水平方向の地盤バネ定数 (kN/m<sup>2</sup>)

$E_{Si}$  : i 層の地盤の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)

本検討では、文献 2)、文献 5)を参考に、 $E_{Si} = 16N(kg/cm^2)$  (砂地盤) とする。

$\nu_{Si}$  : i 層の地盤のポアソン比

B、 $E_p$ 、 $I_p$  : 杭径 (m)、杭のヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)、断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

本建物の場合、杭径が数種類あるため、バネ定数に用いる杭径は、断面二次モーメントが等価となるような杭径を設定する。

解析モデルでは杭周地盤バネは各節点に取り付けるため、各節点に取り付く水平の杭周地盤バネのバネ定数 $k'_{Si}$ は、i 層の層厚を  $H_i$ 、節点に隣接する 2 層の支配層厚を乗じることにより、下式で表される。

$$k'_{fSi} = 0.5 \{ k_{fS(i-1)} \cdot H_{i-1} + k_{fSi} \cdot H_i \}$$

群杭効果を考慮した地盤バネ定数 $k_{Gi}$ は、各 i 層で設定したバネ定数に杭本数と群杭係数を乗じることによって考慮できるため、下式で表される。

$$k'_{fGi} = k'_{fSi} \cdot N_p \cdot e, \quad e = \beta_H^{4/3}$$

ここで、 $N_p$  : 総杭本数、 $\beta_H$  : 群杭係数である。

### b) 群杭係数の算出

群杭係数 $\beta_H$ は、多数本杭に対して提案されている評価式<sup>文献 1),4)</sup>として下式を用いて算出する。ただしこの評価法は、地盤は均質な表層地盤と支持地盤からなる 2 層地盤の検討結果に基づいたものであるため、本検討では表層地盤の特性として、杭頭付近の地盤特性の層厚平均とする。

$$\beta_H = N_p^{-a}$$

$$a = 0.9f_x + 1/\{5 + (65B/H)^{1.5}\}$$

$$f_x = \left[ 0.3 + \{0.16 - 4(B/H)^2\} \log \left( \frac{E_p}{E_s} \right) \right] (B/S)^{0.75}$$

ここで、 $N_p$  : 総杭本数、H : 杭長 (m)、 $E_p$  : 杭のヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)、 $E_s$  : 表層地盤 (均質地盤) の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>) である。

c) 減衰係数

Gazeas の式<sup>文献 1),2)</sup>により算出し、下式に示す。

$$C_{gSi} = 2\rho_i B(V_{Lai} + V_{Si})$$

ここで、 $C_{gSi}$  : i 層の減衰係数

$\rho_i$  : i 層のポアソン比

$V_{Lai}$  : i 層の Lysmer の波動速度 ( $= \frac{3.4V_{Si}}{\pi(1-\nu_{Si})}$ )

$V_{Si}$  : i 層のせん断波速度

減衰係数は群杭効果が小さいとして群杭係数を 1 とし、下式で表わされる。

$$C_{gBi} = C_{gSi} \cdot N_p$$

$$C'_{gBi} = C'_{gSi} \cdot N_p$$

ただし、杭が密に配置された場合は減衰係数が過大評価となることを避けるため、基礎底面の大きさから下式により減衰係数を算出する。

$$C_{gBi} = 2\rho_i(B_Y V_{Lai} + B_X V_{Si})$$

ここで、 $B_Y$  : 振動直交(Y)方向の基礎幅（見付け幅）、 $B_X$  : 振動(X)方向の基礎幅である。

各節点に各節点に取り付く減衰定数 $C'_{gBi}$ は、水平地盤バネの算出と同様に下式で表される。

$$C'_{gBi} = 0.5\{C_{gB(i-1)} \cdot H_{i-1} + C_{gBi} \cdot H_i\}$$

以上より、群杭効果を考慮した減衰係数は下式で表わされる。

$$C'_{gi} = \min(C'_{gGi}, C'_{gBi})$$

以上より、算出された杭周辺地盤の影響地盤特性を表 4-11、表 4-12、表 4-13 に示す。

表 4-11 群杭係数の算出

| 評価法 | 杭径の設定 | 杭基本データ |                        |                      |            | 群杭効果関連データ   |      |          |                      | 表層地盤  |                        |                        |       | 群杭効果 (評価法-2) |        |        |       |       |
|-----|-------|--------|------------------------|----------------------|------------|-------------|------|----------|----------------------|-------|------------------------|------------------------|-------|--------------|--------|--------|-------|-------|
|     |       | 杭径※1   | 杭ヤング係数                 | 杭断面二次モーメント           | 杭本数        | 加振方向杭中心間隔※2 | 杭間隔比 | せん断波速度※3 | 密度                   | ポアソン比 | せん断弾性係数                | ヤング係数                  | 杭長※4  | 係数           | 群杭係数   |        |       |       |
|     |       | B(cm)  | Ep(N/mm <sup>2</sup> ) | Ip(cm <sup>4</sup> ) | Np(本)      | S(cm)       | S/B  | Vs(m/s)  | ρ(t/m <sup>3</sup> ) | v     | Gs(kN/m <sup>2</sup> ) | Es(kN/m <sup>2</sup> ) | H(m)  |              |        | B/H    | fx    | a     |
| X方向 | 評価法-2 | 等価杭径   | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159         | 720  | 4.97     | 1.84                 | 0.487 | 89,056                 | 264,853                | 17.80 | 0.0815       | 0.1684 | 0.2098 | 0.345 | 0.242 |
| Y方向 | 評価法-2 | 等価杭径   | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159         | 740  | 5.10     | 1.84                 | 0.487 | 89,056                 | 264,853                | 17.80 | 0.0815       | 0.1650 | 0.2067 | 0.351 | 0.247 |

※1：杭径  
群杭係数算出用の杭径は、断面二次モーメントが等価となるような杭径Beとする。  
 $Be = ((\sum I_p / \sum n) / n)^{(1/4)} \times 2 = 144.8 \rightarrow$  等価杭径Be = 145 cm

※2：杭中心間隔  
杭中心間隔は、支点間距離とする。  
Y方向は支点間距離が複数あるため、支点間距離の平均とする。  
 $S_y = (7.2 + 9.0 + 7.2 + 7.2 + 7.5 + 6.3 + 6.3 + 9.0) / 8 \text{ スパン} = 7.46 \text{ m} \rightarrow 7.4 \text{ m}$

※4：杭長  
杭長は数種類あるため、平均杭長とする。  
杭長 杭本数 平均杭長  
B1F 22.57 37 17.80  
B2F 16.35 122

| 検討用地盤構成       |     |          |       |       |                      |  |
|---------------|-----|----------|-------|-------|----------------------|--|
| 深度            | 層厚  | 土質名称     | 平均 N値 | Vs    | 密度                   |  |
| (m)           | (m) |          |       | (m/s) | (g/cm <sup>3</sup> ) |  |
| 0.00 ~ 3.10   | 3.1 | 埋土       | 3     | 180   | 1.84                 |  |
| 3.10 ~ 3.80   | 0.7 | 礫混じり砂    | 22    | 200   | 1.84                 |  |
| 3.80 ~ 6.70   | 2.9 | 砂礫       | 30    | 200   | 1.84                 |  |
| 6.70 ~ 7.50   | 0.8 | シルト混じり細砂 | 6     | 200   | 1.84                 |  |
| 7.50 ~ 9.35   | 1.9 | 細砂       | 20    | 270   | 1.84                 |  |
| 9.35 ~ 11.50  | 2.2 | 中砂       | 27    | 270   | 1.84                 |  |
| 11.50 ~ 14.60 | 3.1 | 砂礫       | 45    | 270   | 1.84                 |  |
| 14.60 ~ 16.90 | 2.3 | 砂混じりシルト  | 6     | 160   | 1.45                 |  |
| 16.90 ~ 20.60 | 3.7 | 玉石混じり砂礫  | 44    | 370   | 2.04                 |  |
| 20.60 ~ 25.70 | 5.1 | 強風化岩     | 16    | 220   | 1.94                 |  |
| 25.70 ~ 32.00 | 6.3 | 風化岩      | 46    | 490   | 2.14                 |  |

赤田部の  
層厚平均とする

※3：表層地盤のせん断波速度  
表層地盤は、地表面から深度16.9mまでの地盤と考え、層厚平均とする。  
等価Vs = 220.3 → 220

表 4-12 杭周辺地盤の地盤バネ及び減衰係数（X 方向）

|     |     |         | 入力データ |               |       |       |                                                                     |   |        |                        |                      |            |                        | 地盤物性の計算過程              |           |                        |                                                         |           |                     | 水平地盤ばね定数                 |                                                  |                                                                        |                            | 減衰係数                     |                          |                          |                                                                          |                |
|-----|-----|---------|-------|---------------|-------|-------|---------------------------------------------------------------------|---|--------|------------------------|----------------------|------------|------------------------|------------------------|-----------|------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|---------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 階番号 | 層番号 | 地盤物性データ |       |               |       |       |                                                                     |   | 杭基本データ |                        |                      |            | Vsから算出                 |                        | 採用物性値     |                        |                                                         |           |                     |                          |                                                  |                                                                        |                            |                          |                          |                          |                                                                          |                |
|     |     | 層厚      | 深さ    | 密度            | ポアソン比 | N値    | 物性値の種類と値                                                            |   | 杭径     | 杭ヤング係数                 | 杭断面二次モーメント           | 杭本数        | せん断弾性係数                | ヤング係数                  | せん断波速度    | ヤング係数                  |                                                         | Lysmerの速度 | 群杭係数                | 単杭1本当りFrancis            | 群杭全体(各層)                                         | 群杭全体(各層)                                                               | 単杭1本当りGazetas              | 群杭全体(各層)                 | 杭密度による低減考慮               | 採用減衰定数(各層)               | 群杭全体(各層)                                                                 |                |
|     |     | H(cm)   | z(m)  | $\rho(t/m^3)$ | $\nu$ |       | 1:Vs(m/s),<br>2:G(tf/cm <sup>2</sup> ),<br>3:E(tf/cm <sup>2</sup> ) |   | B(cm)  | Ep(N/mm <sup>2</sup> ) | Ip(cm <sup>4</sup> ) | Np(本)      | Gs(kN/m <sup>2</sup> ) | Es(kN/m <sup>2</sup> ) | Vs(m/s)   | Es(kN/m <sup>2</sup> ) | Esi=16N<br>(kg重/cm <sup>2</sup> )<br>=160N*g<br>(kN/mf) | VLa(m/s)  | $e=\beta_H^{(4/3)}$ | k <sub>RS</sub> (kN/m/本) | k <sub>RG</sub> (kN/m)<br>=k <sub>RS</sub> ・Np・e | k <sub>RG</sub> '(kN/m)<br>=0.5(k <sub>RGi-1</sub> +k <sub>RGi</sub> ) | c <sub>GS</sub> (kN・s/m/本) | c <sub>GG</sub> (kN・s/m) | c <sub>GB</sub> (kN・s/m) | c <sub>GG</sub> (kN・s/m) | C <sub>GS</sub> '(kN・s/m)<br>=0.5(C <sub>GSi-1</sub> +C <sub>GSi</sub> ) |                |
| 基礎杭 | -1  | 0       |       |               |       |       |                                                                     |   |        |                        |                      |            |                        |                        |           |                        |                                                         |           |                     |                          |                                                  |                                                                        |                            |                          |                          |                          |                                                                          |                |
|     | -2  | -1      | 100   | 12.65         | 1.840 | 0.487 | 45                                                                  | 1 | 270    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 134,136                | 398,937   | 270.0                  | 398,937                                                 | 69,243    | 569.7               | 0.242                    | 93,324                                           | 3,594,252                                                              | <b>3,594,252</b>           | 4,480                    | 712,399                  | 201,667                  | 201,667                                                                  | <b>201,667</b> |
|     | -3  | -2      | 95    | 13.65         | 1.840 | 0.487 | 45                                                                  | 1 | 270    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 134,136                | 398,937   | 270.0                  | 398,937                                                 | 69,243    | 569.7               | 0.242                    | 88,658                                           | 3,414,540                                                              | <b>3,504,396</b>           | 4,256                    | 676,779                  | 191,583                  | 191,583                                                                  | <b>196,625</b> |
|     | -4  | -3      | 77    | 14.60         | 1.450 | 0.495 | 6                                                                   | 1 | 160    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 37,120                 | 110,980   | 160.0                  | 110,980                                                 | 9,232     | 342.8               | 0.242                    | 8,183                                            | 315,147                                                                | <b>1,864,843</b>           | 1,628                    | 258,857                  | 73,277                   | 73,277                                                                   | <b>132,430</b> |
|     | -5  | -4      | 76    | 15.37         | 1.450 | 0.495 | 6                                                                   | 1 | 160    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 37,120                 | 110,980   | 160.0                  | 110,980                                                 | 9,232     | 342.8               | 0.242                    | 8,076                                            | 311,054                                                                | <b>313,100</b>             | 1,607                    | 255,496                  | 72,325                   | 72,325                                                                   | <b>72,801</b>  |
|     | -6  | -5      | 77    | 16.13         | 1.450 | 0.495 | 6                                                                   | 1 | 160    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 37,120                 | 110,980   | 160.0                  | 110,980                                                 | 9,232     | 342.8               | 0.242                    | 8,183                                            | 315,147                                                                | <b>313,100</b>             | 1,628                    | 258,857                  | 73,277                   | 73,277                                                                   | <b>72,801</b>  |
|     | -7  | -6      | 100   | 16.90         | 2.040 | 0.480 | 44                                                                  | 1 | 370    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 279,276                | 826,575   | 370.0                  | 826,575                                                 | 67,704    | 769.8               | 0.242                    | 90,255                                           | 3,476,042                                                              | <b>1,895,595</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                  | <b>188,398</b> |
|     | -8  | -7      | 100   | 17.90         | 2.040 | 0.480 | 44                                                                  | 1 | 370    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 279,276                | 826,575   | 370.0                  | 826,575                                                 | 67,704    | 769.8               | 0.242                    | 90,255                                           | 3,476,042                                                              | <b>3,476,042</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                  | <b>303,519</b> |
|     | -9  | -8      | 100   | 18.90         | 2.040 | 0.480 | 44                                                                  | 1 | 370    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 279,276                | 826,575   | 370.0                  | 826,575                                                 | 67,704    | 769.8               | 0.242                    | 90,255                                           | 3,476,042                                                              | <b>3,476,042</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                  | <b>303,519</b> |
|     | -10 | -9      | 100   | 19.90         | 2.010 | 0.485 | 36                                                                  | 1 | 325    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 212,306                | 630,729   | 325.0                  | 630,729                                                 | 55,394    | 683.5               | 0.242                    | 73,131                                           | 2,816,547                                                              | <b>3,146,294</b>           | 5,879                    | 934,722                  | 264,603                  | 264,603                                                                  | <b>284,061</b> |
|     | -11 | -10     | 100   | 20.90         | 1.940 | 0.494 | 16                                                                  | 1 | 220    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 93,896                 | 280,594   | 220.0                  | 280,594                                                 | 24,620    | 470.7               | 0.242                    | 30,723                                           | 1,183,270                                                              | <b>1,999,908</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                  | <b>219,753</b> |
|     | -12 | -11     | 100   | 21.90         | 1.940 | 0.494 | 16                                                                  | 1 | 220    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 93,896                 | 280,594   | 220.0                  | 280,594                                                 | 24,620    | 470.7               | 0.242                    | 30,723                                           | 1,183,270                                                              | <b>1,183,270</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                  | <b>174,903</b> |
|     | -13 | -12     | 100   | 22.90         | 1.940 | 0.494 | 16                                                                  | 1 | 220    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 93,896                 | 280,594   | 220.0                  | 280,594                                                 | 24,620    | 470.7               | 0.242                    | 30,723                                           | 1,183,270                                                              | <b>1,183,270</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                  | <b>174,903</b> |
|     | -14 | -13     | 100   | 23.90         | 1.940 | 0.494 | 16                                                                  | 1 | 220    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 93,896                 | 280,594   | 220.0                  | 280,594                                                 | 24,620    | 470.7               | 0.242                    | 30,723                                           | 1,183,270                                                              | <b>1,183,270</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                  | <b>174,903</b> |
|     | -15 | -14     | 100   | 24.90         | 1.980 | 0.491 | 22                                                                  | 1 | 274    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 148,650                | 443,258   | 274.0                  | 443,258                                                 | 33,852    | 582.5               | 0.242                    | 43,199                                           | 1,663,740                                                              | <b>1,423,505</b>           | 4,918                    | 781,984                  | 221,364                  | 221,364                                                                  | <b>198,133</b> |
|     | -16 | -15     | 100   | 25.90         | 2.140 | 0.470 | 46                                                                  | 1 | 490    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 513,814                | 1,510,942 | 490.0                  | 1,510,942                                               | 70,781    | 1001.2              | 0.242                    | 93,606                                           | 3,605,108                                                              | <b>2,634,424</b>           | 9,254                    | 1,471,424                | 416,541                  | 416,541                                                                  | <b>295,722</b> |
|     | -17 | -16     | 100   | 26.90         | 2.140 | 0.470 | 46                                                                  | 1 | 490    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 513,814                | 1,510,942 | 490.0                  | 1,510,942                                               | 70,781    | 1001.2              | 0.242                    | 93,606                                           | 3,605,108                                                              | <b>3,605,108</b>           | 9,254                    | 1,471,424                | 416,541                  | 416,541                                                                  | <b>416,541</b> |
|     | -18 | -17     | 110   | 27.90         | 2.140 | 0.470 | 46                                                                  | 1 | 490    | 145                    | 23,580               | 21,699,109 | 159                    | 513,814                | 1,510,942 | 490.0                  | 1,510,942                                               | 70,781    | 1001.2              | 0.242                    | 102,967                                          | 3,965,619                                                              | <b>3,785,363</b>           | 10,180                   | 1,618,566                | 458,195                  | 458,195                                                                  | <b>437,368</b> |

表 4-13 杭周辺地盤の地盤バネ及び減衰係数（Y 方向）

|     |     |         | 入力データ |         |       |       |          |                                           |        |           |            |            |           | 地盤物性の計算過程 |           |           |                                           |                       |                         | 水平地盤ばね定数                 |                                                  |                                                                           |                            | 減衰係数                     |                          |                          |                                                                             |                |
|-----|-----|---------|-------|---------|-------|-------|----------|-------------------------------------------|--------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 階番号 | 層番号 | 地盤物性データ |       |         |       |       |          |                                           | 杭基本データ |           |            |            | Vsから算出    |           | 採用物性値     |           |                                           |                       |                         |                          |                                                  |                                                                           |                            |                          |                          |                          |                                                                             |                |
|     |     | 層厚      | 深さ    | 密度      | ポアソン比 | N値    | 物性値の種類と値 |                                           | 杭径     | 杭ヤング係数    | 杭断面二次モーメント | 杭本数        | せん断弾性係数   | ヤング係数     | せん断波速度    | ヤング係数     |                                           | Lysmerの速度             | 群杭係数                    | 単杭1本当りFrancis            | 群杭全体(各階)                                         | 群杭全体(各層)                                                                  | 単杭1本当りGazetas              | 群杭全体(各階)                 | 杭密度による低減考慮               | 採用減衰定数(各階)               | 群杭全体(各層)                                                                    |                |
|     |     | H(cm)   | z(m)  | ρ(t/m³) | ν     |       |          | 1:Vs(m/s),<br>2:G(tf/cm²),<br>3:E(tf/cm²) | B(cm)  | Ep(N/mm²) | Ip(cm⁴)    | Np(本)      | Gs(kN/m²) | Es(kN/m²) | Vs(m/s)   | Es(kN/m²) | Esi=16N<br>(kg重/cm²)<br>=160N*g<br>(kN/m) | V <sub>Li</sub> (m/s) | e=β <sub>H</sub> ^(4/3) | k <sub>RS</sub> (kN/m/本) | k <sub>RG</sub> (kN/m)<br>=k <sub>RG</sub> ・Np・e | k <sub>RG</sub> '(kN/m)<br>=0.5(k <sub>RGi-1</sub><br>+k <sub>RGi</sub> ) | c <sub>GS</sub> (kN・s/m/本) | c <sub>GG</sub> (kN・s/m) | c <sub>GB</sub> (kN・s/m) | c <sub>GG</sub> (kN・s/m) | c <sub>GS</sub> '(kN・s/m)<br>=0.5(c <sub>GSi-1</sub><br>+c <sub>GSi</sub> ) |                |
| 基礎  | -1  | 0       |       |         |       |       |          |                                           |        |           |            |            |           |           |           |           |                                           |                       |                         |                          |                                                  |                                                                           |                            |                          |                          |                          |                                                                             |                |
| 杭   | -2  | -1      | 100   | 12.65   | 1.840 | 0.487 | 45       | 1                                         | 270    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 134,136   | 398,937   | 270.0     | 398,937                                   | 69,243                | 569.7                   | 0.247                    | 93324                                            | 3,669,929                                                                 | <b>3,669,929</b>           | 4,480                    | 712,399                  | 201,667                  | 201,667                                                                     | <b>201,667</b> |
|     | -3  | -2      | 95    | 13.65   | 1.840 | 0.487 | 45       | 1                                         | 270    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 134,136   | 398,937   | 270.0     | 398,937                                   | 69,243                | 569.7                   | 0.247                    | 88658                                            | 3,486,433                                                                 | <b>3,578,181</b>           | 4,256                    | 676,779                  | 191,583                  | 191,583                                                                     | <b>196,625</b> |
|     | -4  | -3      | 77    | 14.60   | 1.450 | 0.495 | 6        | 1                                         | 160    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 37,120    | 110,980   | 160.0     | 110,980                                   | 9,232                 | 342.8                   | 0.247                    | 8183                                             | 321,782                                                                   | <b>1,904,107</b>           | 1,628                    | 258,857                  | 73,277                   | 73,277                                                                      | <b>132,430</b> |
|     | -5  | -4      | 76    | 15.37   | 1.450 | 0.495 | 6        | 1                                         | 160    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 37,120    | 110,980   | 160.0     | 110,980                                   | 9,232                 | 342.8                   | 0.247                    | 8076                                             | 317,603                                                                   | <b>319,693</b>             | 1,607                    | 255,496                  | 72,325                   | 72,325                                                                      | <b>72,801</b>  |
|     | -6  | -5      | 77    | 16.13   | 1.450 | 0.495 | 6        | 1                                         | 160    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 37,120    | 110,980   | 160.0     | 110,980                                   | 9,232                 | 342.8                   | 0.247                    | 8183                                             | 321,782                                                                   | <b>319,693</b>             | 1,628                    | 258,857                  | 73,277                   | 73,277                                                                      | <b>72,801</b>  |
|     | -7  | -6      | 100   | 16.90   | 2.040 | 0.480 | 44       | 1                                         | 370    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 279,276   | 826,575   | 370.0     | 826,575                                   | 67,704                | 769.8                   | 0.247                    | 90255                                            | 3,549,230                                                                 | <b>1,935,506</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                     | <b>188,398</b> |
|     | -8  | -7      | 100   | 17.90   | 2.040 | 0.480 | 44       | 1                                         | 370    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 279,276   | 826,575   | 370.0     | 826,575                                   | 67,704                | 769.8                   | 0.247                    | 90255                                            | 3,549,230                                                                 | <b>3,549,230</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                     | <b>303,519</b> |
|     | -9  | -8      | 100   | 18.90   | 2.040 | 0.480 | 44       | 1                                         | 370    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 279,276   | 826,575   | 370.0     | 826,575                                   | 67,704                | 769.8                   | 0.247                    | 90255                                            | 3,549,230                                                                 | <b>3,549,230</b>           | 6,743                    | 1,072,189                | 303,519                  | 303,519                                                                     | <b>303,519</b> |
|     | -10 | -9      | 100   | 19.90   | 2.010 | 0.485 | 36       | 1                                         | 325    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 212,306   | 630,729   | 325.0     | 630,729                                   | 55,394                | 683.5                   | 0.247                    | 73131                                            | 2,875,849                                                                 | <b>3,212,539</b>           | 5,879                    | 934,722                  | 264,603                  | 264,603                                                                     | <b>284,061</b> |
|     | -11 | -10     | 100   | 20.90   | 1.940 | 0.494 | 16       | 1                                         | 220    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 93,896    | 280,594   | 220.0     | 280,594                                   | 24,620                | 470.7                   | 0.247                    | 30723                                            | 1,208,184                                                                 | <b>2,042,016</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                     | <b>219,753</b> |
|     | -12 | -11     | 100   | 21.90   | 1.940 | 0.494 | 16       | 1                                         | 220    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 93,896    | 280,594   | 220.0     | 280,594                                   | 24,620                | 470.7                   | 0.247                    | 30723                                            | 1,208,184                                                                 | <b>1,208,184</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                     | <b>174,903</b> |
|     | -13 | -12     | 100   | 22.90   | 1.940 | 0.494 | 16       | 1                                         | 220    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 93,896    | 280,594   | 220.0     | 280,594                                   | 24,620                | 470.7                   | 0.247                    | 30723                                            | 1,208,184                                                                 | <b>1,208,184</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                     | <b>174,903</b> |
|     | -14 | -13     | 100   | 23.90   | 1.940 | 0.494 | 16       | 1                                         | 220    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 93,896    | 280,594   | 220.0     | 280,594                                   | 24,620                | 470.7                   | 0.247                    | 30723                                            | 1,208,184                                                                 | <b>1,208,184</b>           | 3,886                    | 617,860                  | 174,903                  | 174,903                                                                     | <b>174,903</b> |
|     | -15 | -14     | 100   | 24.90   | 1.980 | 0.491 | 22       | 1                                         | 274    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 148,650   | 443,258   | 274.0     | 443,258                                   | 33,852                | 582.5                   | 0.247                    | 43199                                            | 1,698,770                                                                 | <b>1,453,477</b>           | 4,918                    | 781,984                  | 221,364                  | 221,364                                                                     | <b>198,133</b> |
|     | -16 | -15     | 100   | 25.90   | 2.140 | 0.470 | 46       | 1                                         | 490    | 145       | 23,580     | 21,699,109 | 159       | 513,814   | 1,510,942 | 490.0     | 1,510,942                                 | 70,781                | 1001.2                  | 0.247                    | 93606                                            | 3,681,013                                                                 | <b>2,689,892</b>           | 9,254                    | 1,471,424                | 416,541                  | 416,541                                                                     | <b>295,722</b> |
| -17 | -16 | 100     | 26.90 | 2.140   | 0.470 | 46    | 1        | 490                                       | 145    | 23,580    | 21,699,109 | 159        | 513,814   | 1,510,942 | 490.0     | 1,510,942 | 70,781                                    | 1001.2                | 0.247                   | 93606                    | 3,681,013                                        | <b>3,681,013</b>                                                          | 9,254                      | 1,471,424                | 416,541                  | 416,541                  | <b>416,541</b>                                                              |                |
| -18 | -17 | 110     | 27.90 | 2.140   | 0.470 | 46    | 1        | 490                                       | 145    | 23,580    | 21,699,109 | 159        | 513,814   | 1,510,942 | 490.0     | 1,510,942 | 70,781                                    | 1001.2                | 0.247                   | 102967                   | 4,049,114                                        | <b>3,865,064</b>                                                          | 10,180                     | 1,618,566                | 458,195                  | 458,195                  | <b>437,368</b>                                                              |                |



### 4.3. 自由地盤系の応答解析結果

自由地盤系の時刻歴応答解析結果を図 4-9～図 4-11 に示す。図中に平成 29 年度報告書の地盤の時刻歴応答解析結果を合わせて示す。また、両者の解析モデルの設定を図 4-12 に示す。

平成 29 年度報告書と比較して、地盤変位は若干小さいものの、概ね同様の結果が得られた。結果の差異が生じた理由として、両者は地盤構成が異なり、GL-14.6m～16.9m のシルト層の層厚と、GL-20.6m～25.7m の  $V_s=220\text{m/a}$  の強風化岩層の有無による影響が大きいと考えられる。

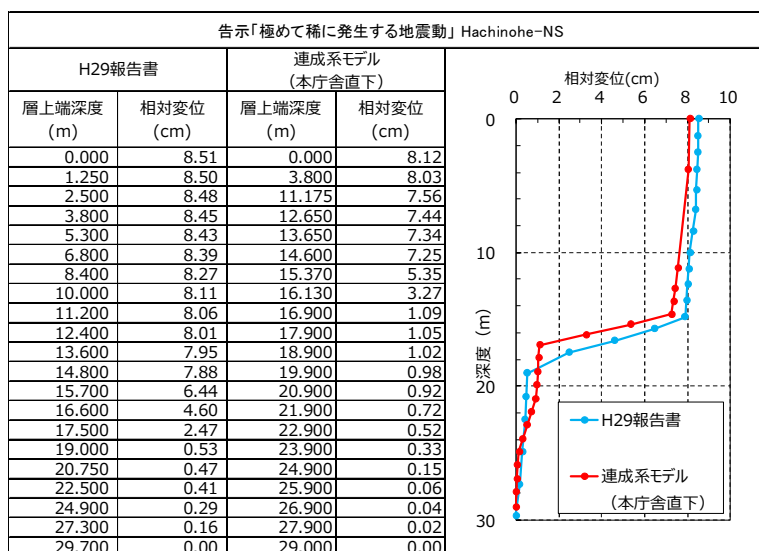


図 4-9 自由地盤系の時刻歴応答解析結果（Hachinohe-NS）

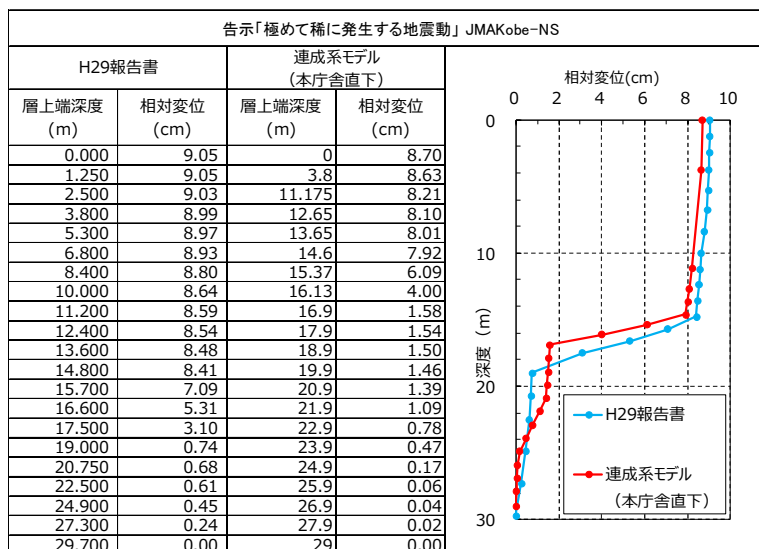


図 4-10 自由地盤系の時刻歴応答解析結果（JMAKobe-NS）

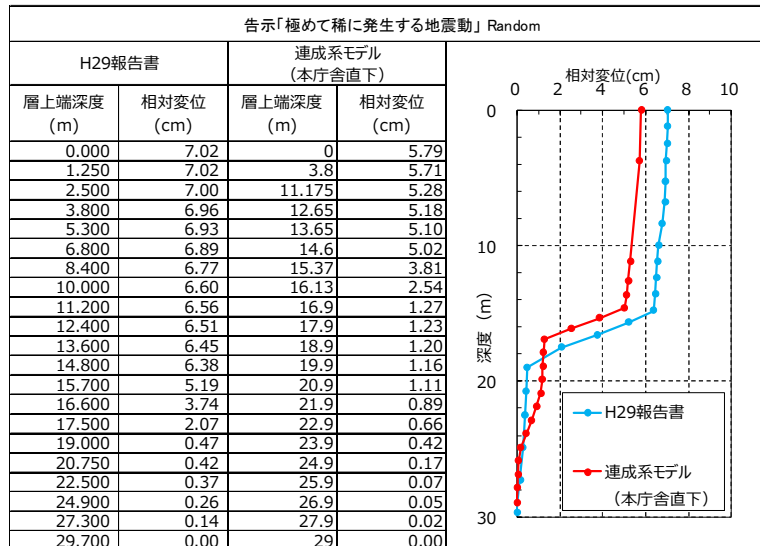


図 4-11 自由地盤系の時刻歴応答解析結果 (Random)

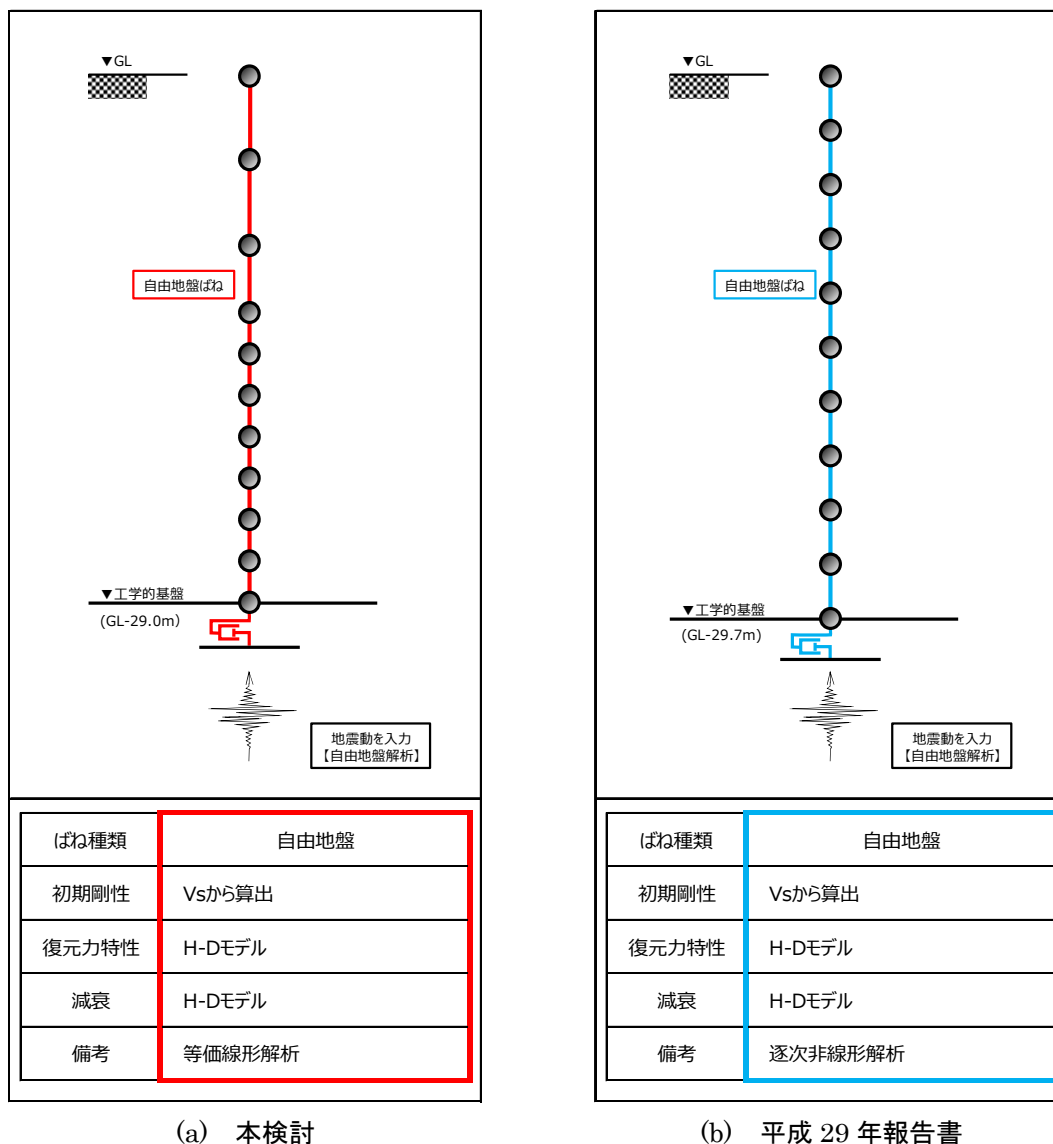


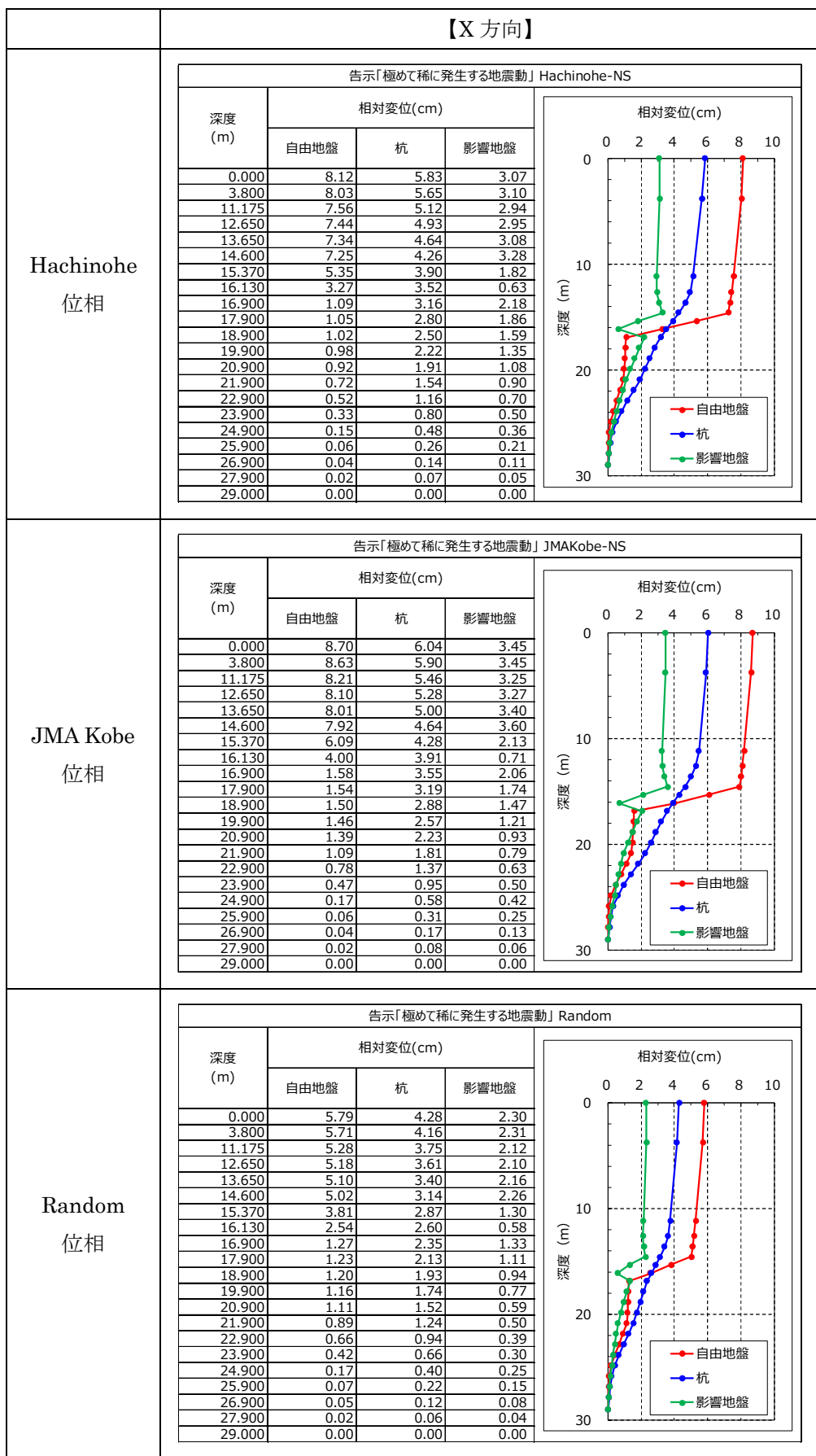
図 4-12 自由地盤系の解析モデル

#### 4.4. 動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析結果

建物地下及び杭の最大応答変位を図 4-13、図 4-14 に示す。X 方向 Y 方向共に赤で示した自由地盤の変位に対し、青で示した杭の変位は小さい値となっている。また、自由地盤では、地下 14.6m～16.9m の  $V_s=160\text{m/s}$  のシルト層で急激に変位が増大するが、杭の変位は自由地盤変位と比較して、滑らかな変位分布となっている。これらの結果は杭の検定に有利側に働く傾向であり、動的相互作用を考慮した効果が得られている。

また、上部構造の最大層間変形角を図 4-15 に示す。X 方向の最大が 1/92（7 階）、Y 方向の最大が 1/106（6 階）である。いずれも平成 29 年度の結果と比較して改善しており、Y 方向では、クライテリアの 1/100 を満足する結果となっている。これは、動的相互作用を考慮することで、地震の揺れを低減する減衰を高く評価することができたためであると考られる。





Random

位相

告示「極めて稀に発生する地震動」Random

図 4-13 連成系解析結果 建物地下及び杭の最大応答変位 (X 方向)

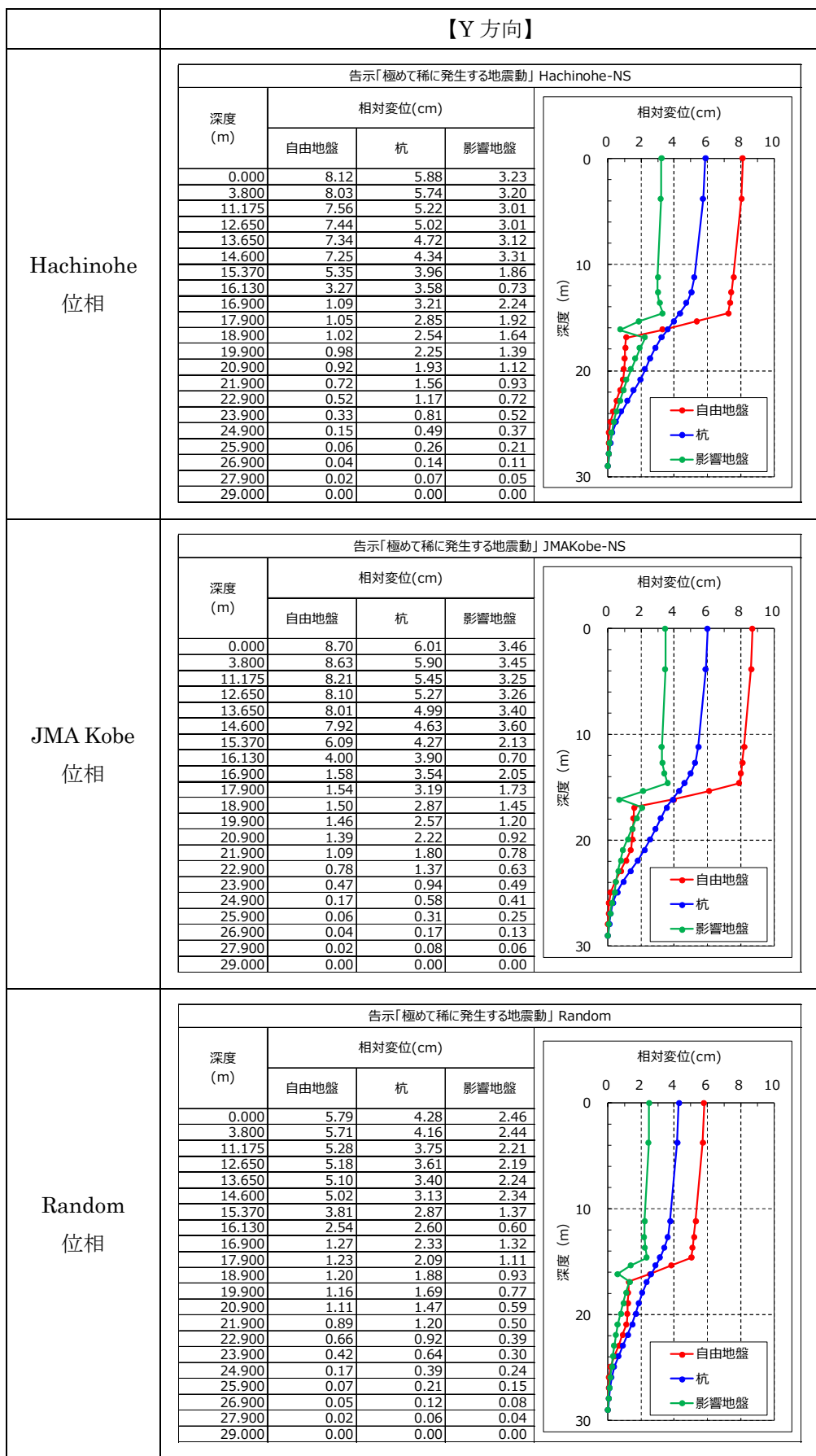


図 4-14 連成系解析結果 建物地下及び杭の最大応答変位 (Y 方向)

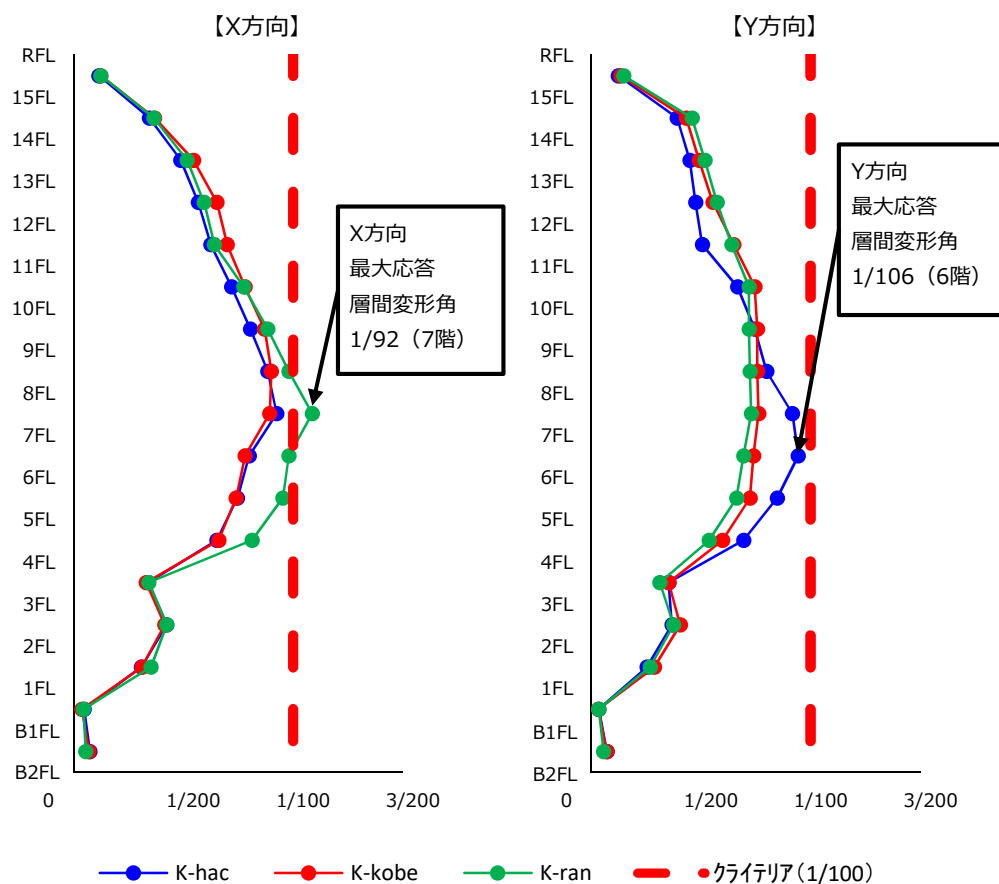


図 4-15 連成系解析結果 上部構造最大応答層間変形角

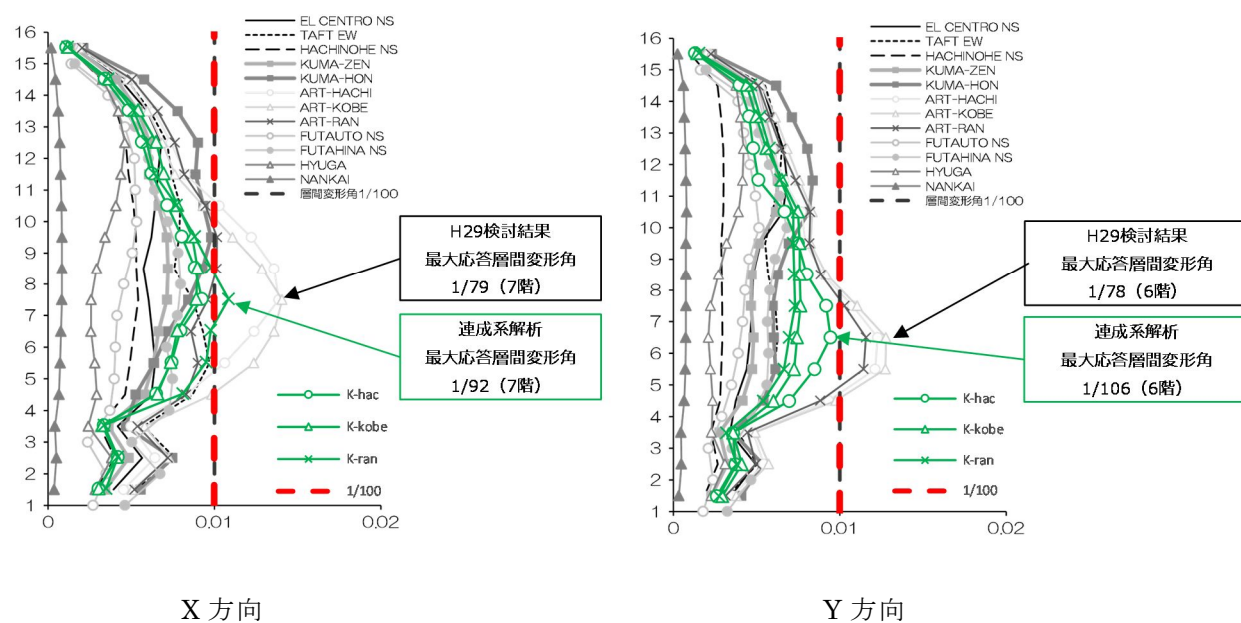


図 4-16 平成 29 年度結果との比較

## § 5 動的相互作用を考慮した杭の耐震安全性検証



## 5. 動的相互作用を考慮した杭の耐震安全性検証

### 5.1. 検討概要

本章では、動的相互作用を考慮した地震応答解析結果を用いて、地震時の杭の耐震性能の検証を行う。図 5-1 に検証フローを示す。

第 4 章では、動的相互作用を考慮した応答解析（図中①）を行った。応答解析結果によって得られた時刻歴変位から、杭が最も厳しい条件となる検証用の変位（時刻）を選定（図中②）し、その変位を用いて、杭の変位増分解析を行う（図中③）。③変位増分解析によって得られた各杭 1 本あたりに生じる応力を用いて、杭の耐震性能を検証する（図中④）。

変位増分解析においては、杭のヒンジ状態を確認するため、杭体の非線形性を考慮した解析を行う。

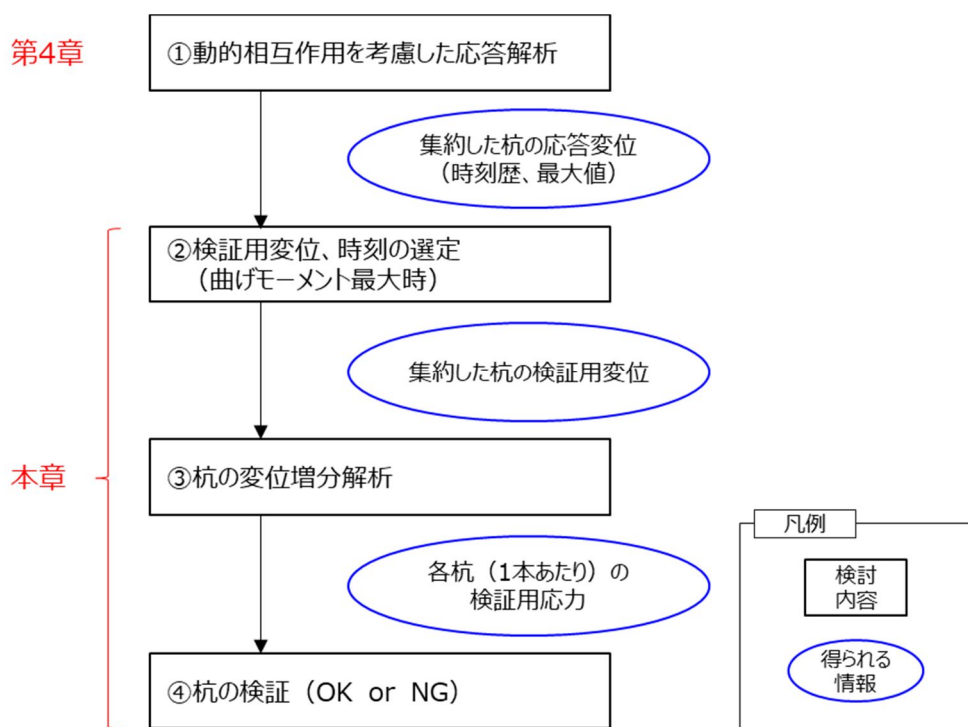


図 5-1 杭の耐震性能検証フロー

## 5.2. 検証用変位及び時刻の選定

4章で示した地震応答解析の最大応答変位は、質点によって最大値を示す時刻が異なる。本節では、時刻歴応答解析結果から、杭に生じる力が最も大きく、条件が厳しくなる地震波とその時刻を選定し、その応答変位を杭の検証用変位とする。

図 5-2 に時刻歴応答解析結果と最大値の概要を示す。

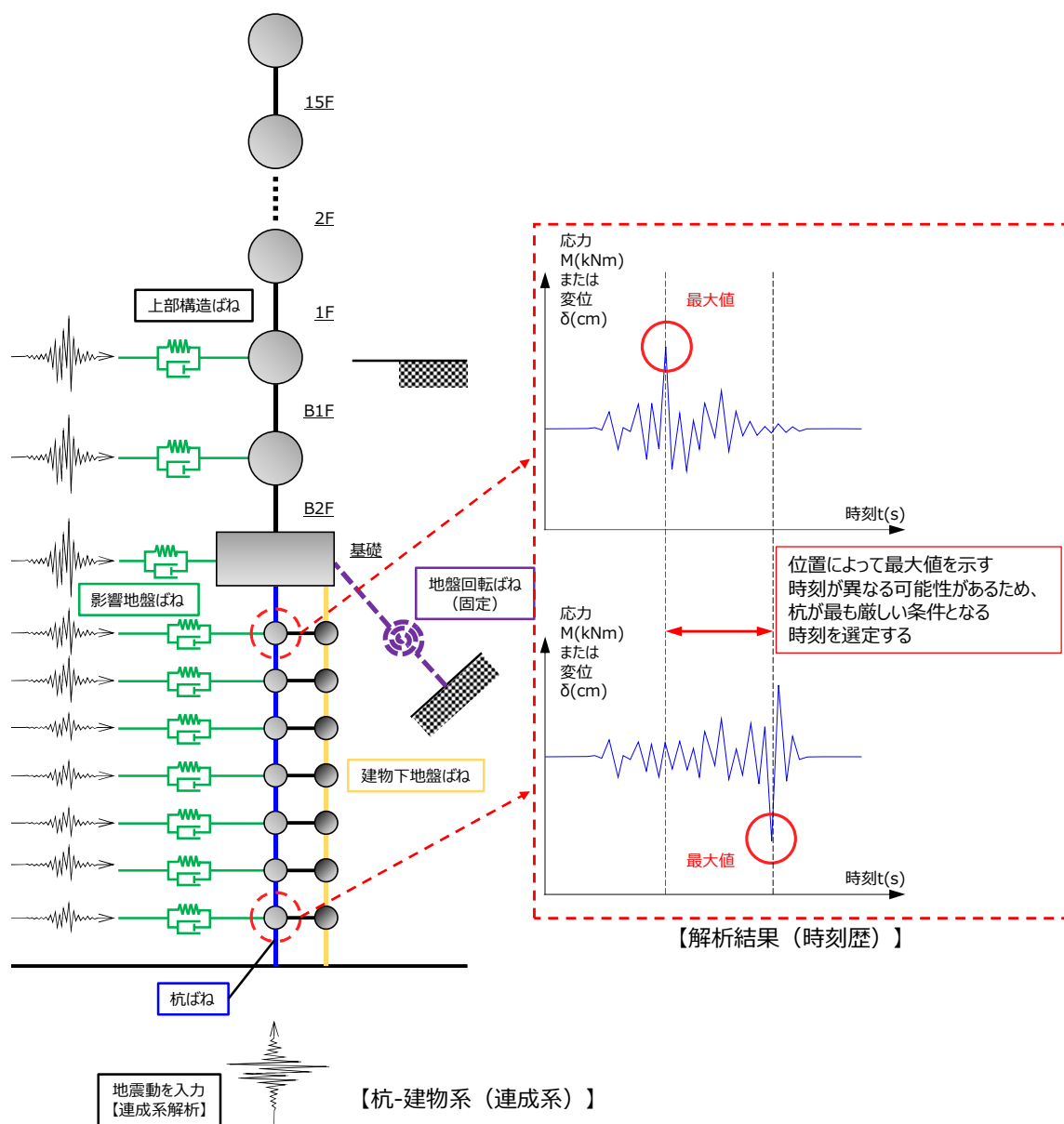


図 5-2 時刻歴応答解析結果と最大値

図 5-3 に杭の部材断面リストを示す。すべての杭で杭頭部と杭下部で鉄筋本数を切り替えている。そのため、本検討では、各杭の杭頭部と杭下部で部材耐力を算出し、杭全長で応力と耐力の比較を行うことで、杭の耐震安全性の検証を行う。

図 5-4、図 5-5 に集約した杭の最大応答曲げモーメントを示す。X 方向、Y 方向共に同様の傾向を示し、杭頭部の曲げモーメントが最も大きく、Hachinohe-NS 波が最大応答を示す。また、杭下部では、GL-26m 付近の風化岩層で曲げモーメントが大きな値となり、JMAKOBEN-NS 波で最大応答を示す。先述のとおり、本建物は杭頭部と杭下部で配筋が異なることから、杭頭部、杭下部でそれぞれ最大応答曲げモーメントを示す地震波とその時刻を検証用地震波及び時刻として選定する。選定した地震波と時刻の一覧を表 5-1 に示す。

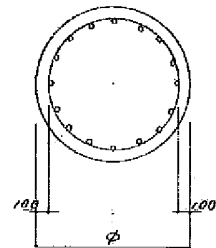
選定した杭の検証用変位を図 5-6～図 5-9 に示す。検証用変位は、図中青で示した最大応答変位と概ね等しい値である。

この値を用いて次節以降で杭の静的変位増分解析を行う。

### ベリト杭仕様

コンクリート:  $F_c = 27.0 \text{ Kgf/cm}^2$  所専スラブ: 20cm

鉄筋: SD35 (主筋), SD30 (7-7 筋)

| ベリト断面                                                                               | 基礎符合                           | 杭径<br>$\phi$ | 設計耐力<br>t/本              | 杭実長<br>(m)                       | 主筋     |        | Hoop     |          | 本数<br>(本) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|----------------------------------|--------|--------|----------|----------|-----------|
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  | 杭頭     | 杭下部    | 柱頭       | 杭下部      |           |
|  | F1 F1-A<br>F1-AA F1-B<br>F1-BB | 1.200        | 279<br>301<br>327<br>350 | 11.35<br>12.35<br>13.57<br>14.35 | 14-D25 | 9-D25  | D13-150@ | D13-300@ | 29        |
|                                                                                     | F2 F2-A<br>F2 F2-A<br>F2 F2-A  | 1.300        | 324<br>375<br>379<br>406 | 11.35<br>15.97<br>16.35<br>18.35 | 16-D25 | 11-D25 | D13-150@ | D13-300@ | 19        |
|                                                                                     | F3 F3-A<br>F3 F3-A<br>F3 F3-A  | 1.500        | 401<br>468<br>484<br>521 | 11.35<br>15.97<br>16.35<br>18.35 | 21-D25 | 14-D25 | D16-150@ | D16-300@ | 107       |
|                                                                                     | F4 F4-A<br>F4 F4-A<br>F4 F4-A  | 1.800        | 529<br>651<br>651        | 11.35<br>16.35<br>18.35          | 31-D25 | 21-D25 | D16-150@ | D16-300@ | 4         |
|                                                                                     | F5                             | 2.000        | 682                      | 11.35                            | 38-D25 | 25-D25 | D16-150@ | D16-300@ | 0         |
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          |           |
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          |           |
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          |           |
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          |           |
|                                                                                     |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          |           |
| 合計                                                                                  |                                |              |                          |                                  |        |        |          |          | 159       |

注: 杭頭 — 杭実長の 1/3 または杭径の 2 倍長さの whichever 大きい方  
余長 — 1000 以上

図 5-3 杭の部材断面リスト

表 5-1 杭の検証用地震波と時刻一覧

|      | 検証用地震波・時刻 1<br>(杭頭部曲げモーメント最大時) | 検証用地震波・時刻 2<br>(杭下部曲げモーメント最大時) |
|------|--------------------------------|--------------------------------|
| X 方向 | Hachinohe-NS 33.098 s          | JMAKOBEN-NS 33.787 s           |
| Y 方向 | Hachinohe-NS 33.093 s          | JMAKOBEN-NS 33.788 s           |



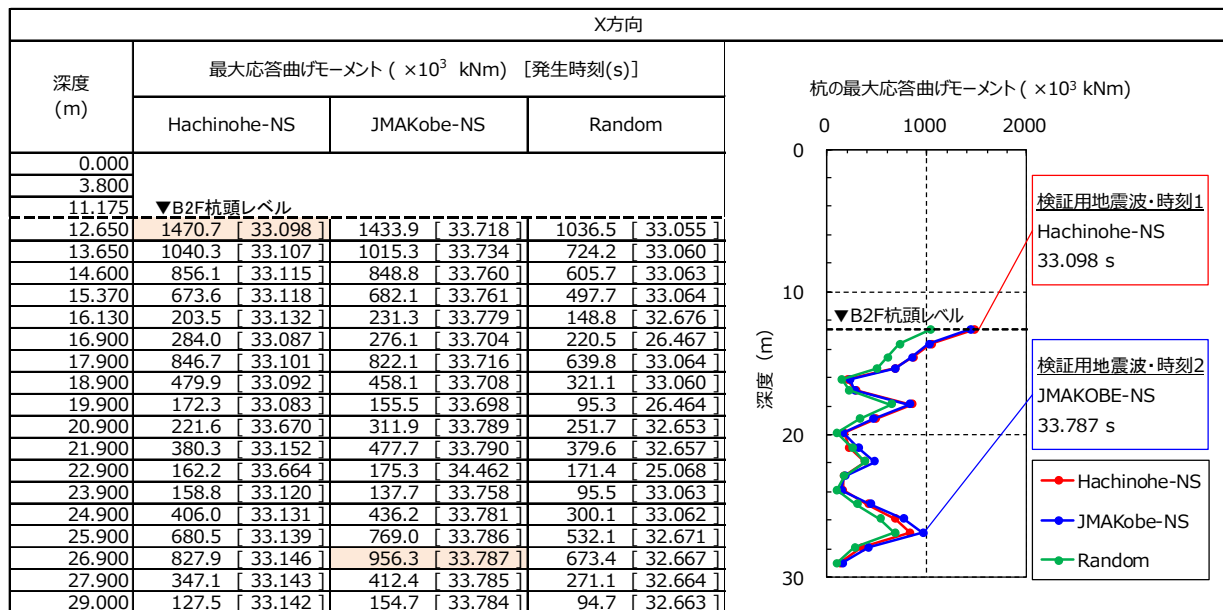


図 5-4 最大応答曲げモーメントと発生時刻 (X 方向)

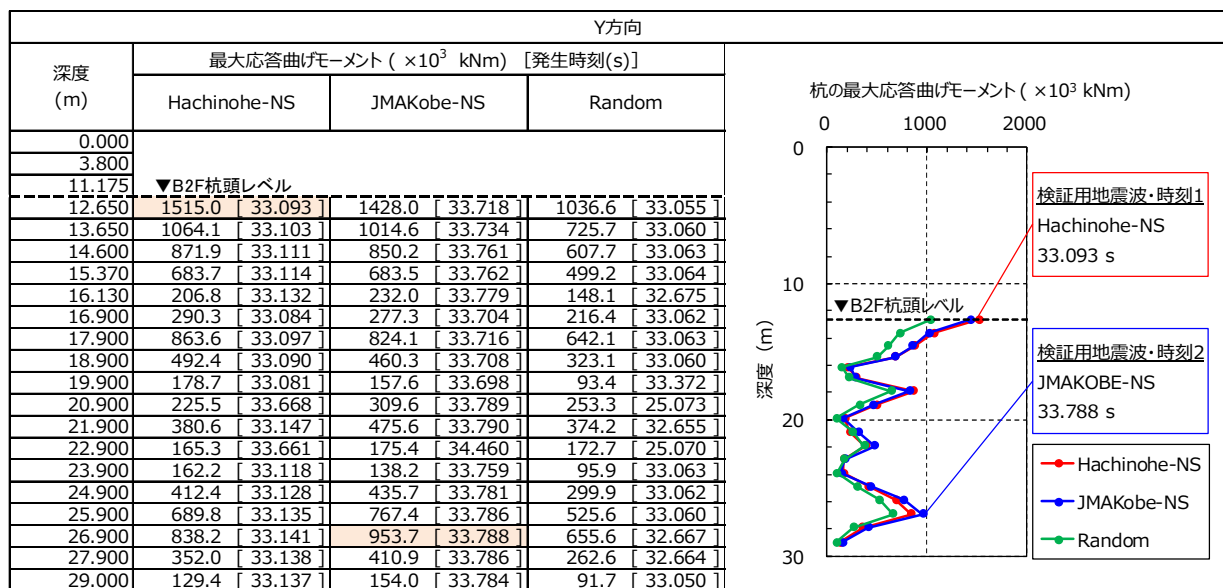


図 5-5 最大応答曲げモーメントと発生時刻 (Y 方向)

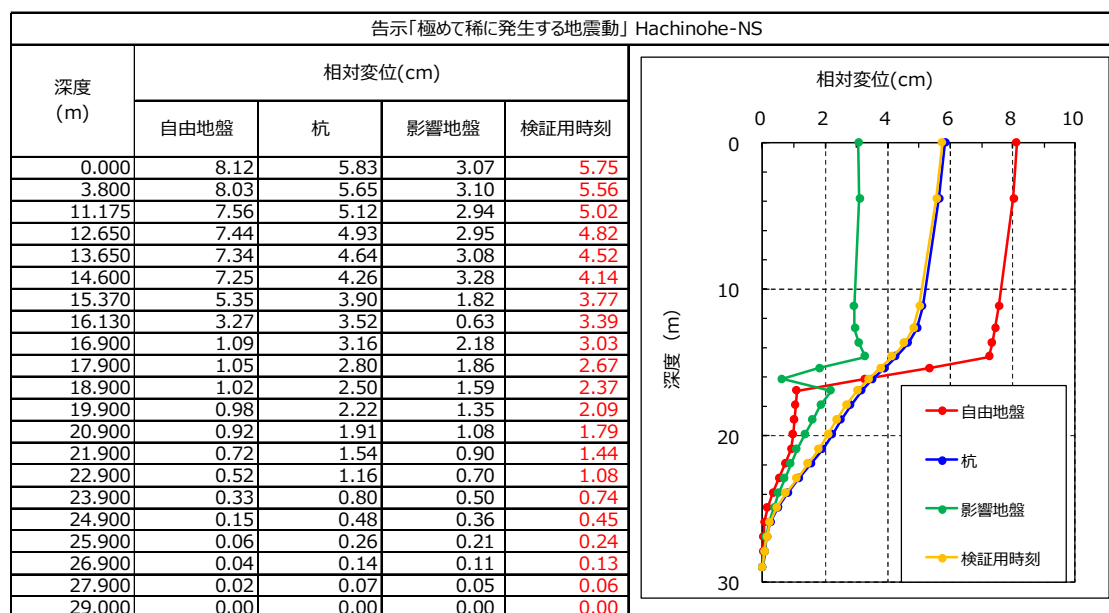


図 5-6 検証用変位と最大応答変位の比較

【X 方向杭頭部曲げモーメント最大時 (Hachinohe-NS 波 33.098s)】

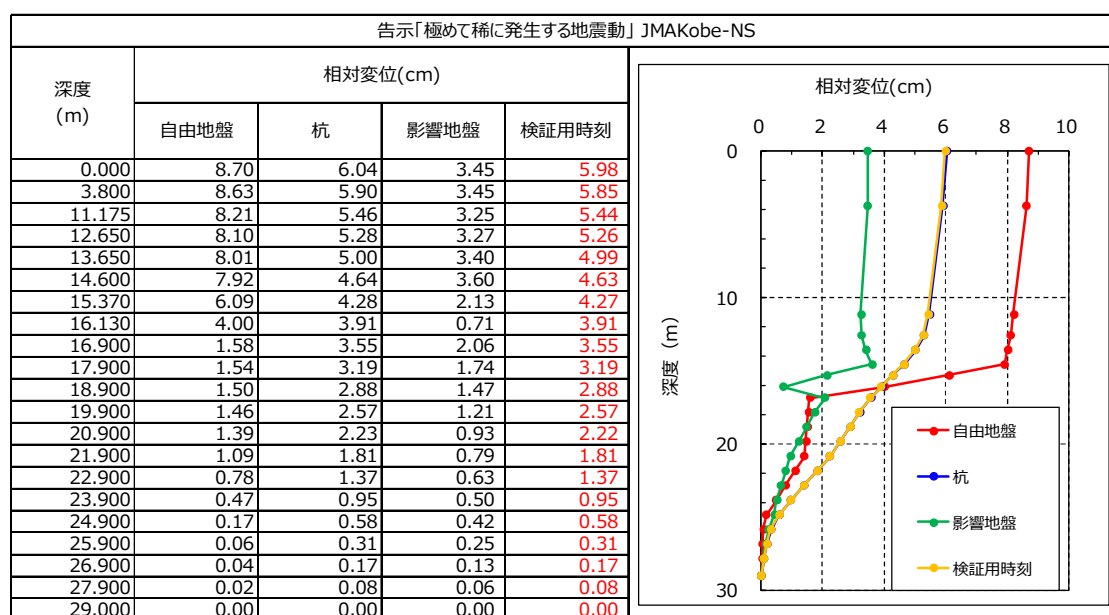


図 5-7 検証用変位と最大応答変位の比較

【X 方向杭下部曲げモーメント最大時 (JMAKobe-NS 波 33.787s)】

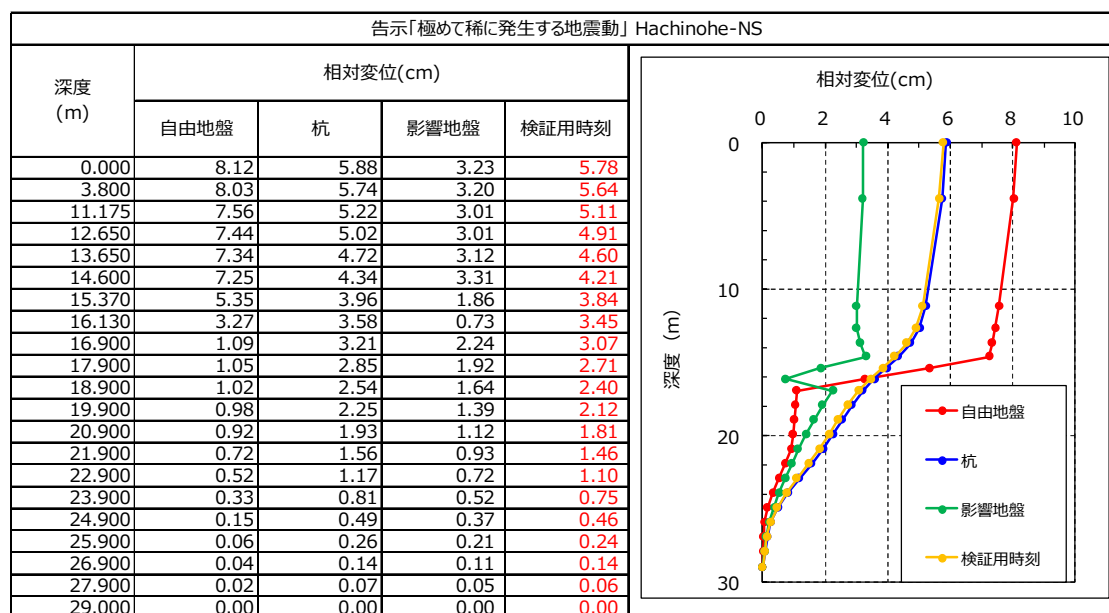


図 5-8 検証用変位と最大応答変位の比較

【Y 方向杭頭部曲げモーメント最大時（Hachinohe-NS 波）33.093s】

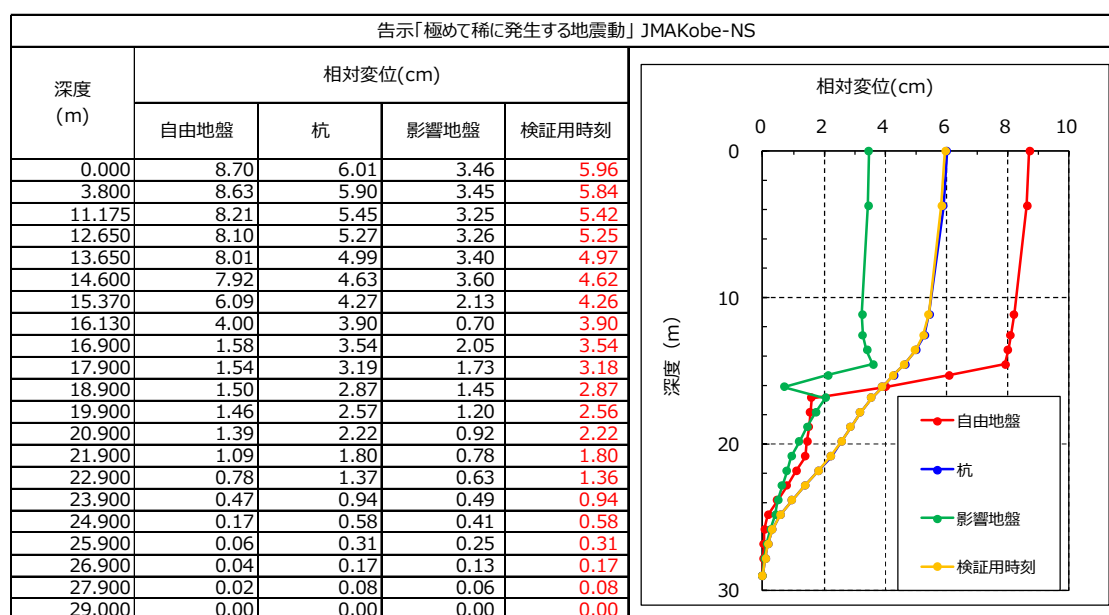


図 5-9 検証用変位と最大応答変位の比較

【Y 方向杭下部曲げモーメント最大時（JMAKobe-NS 波 33.788s）】

### 5.3. 杭の変位増分解析

#### 5.3.1. 解析概要

前節で選定した時刻における応答変位を用いて、杭体の非線形特性を考慮した杭の変位増分解析を行い、各杭1本あたりに生じる応力を算出し、安全性の検証を行う。

モデルの概要図を次ページの図 5-11 に示す。図 5-10 に示す杭の分布、図 5-3 に示す仕様に基づき全ての杭をモデル化し、各杭に連成系解析により算出された杭の応答変位を作用させる。

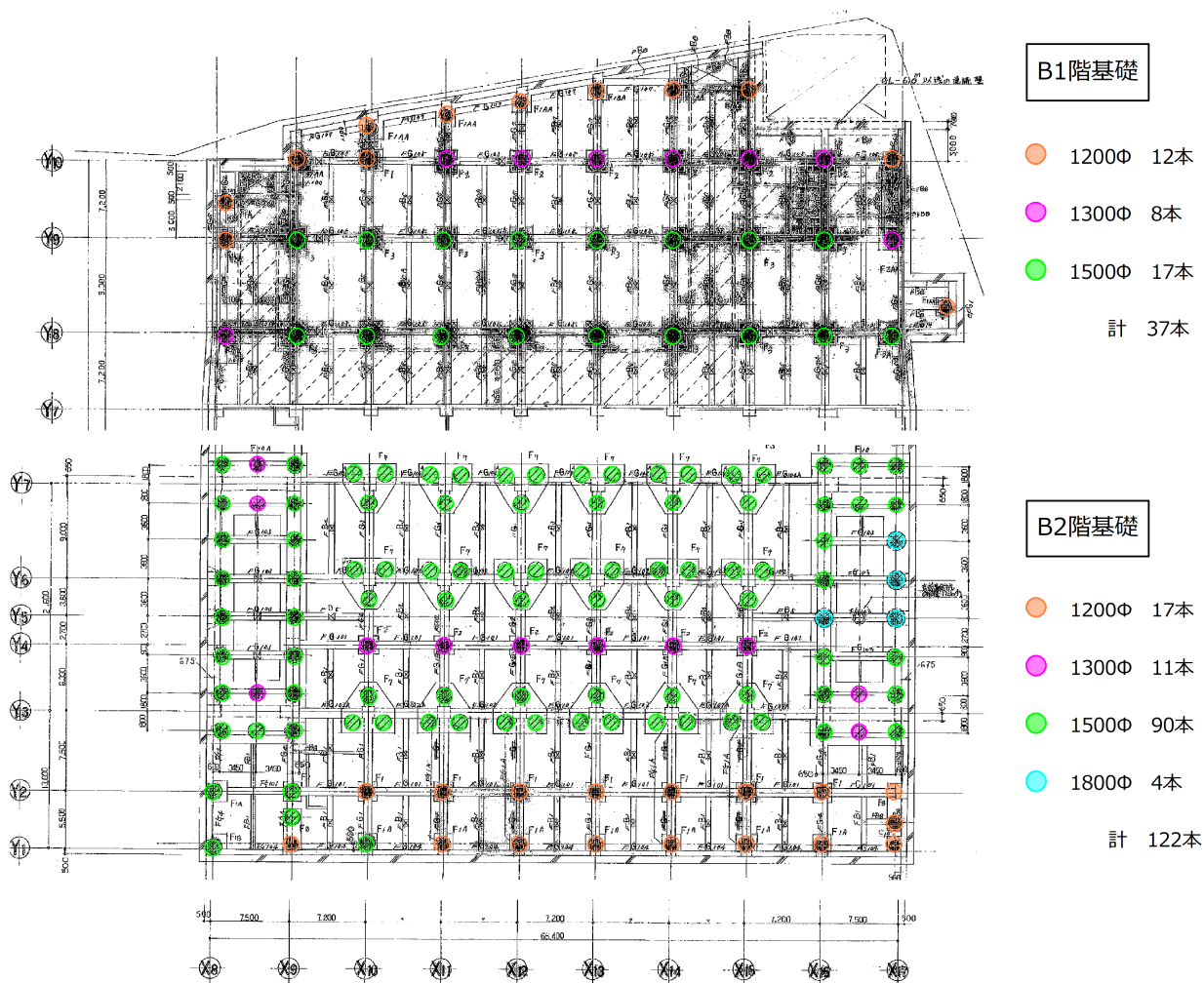


図 5-10 杭径プロット図

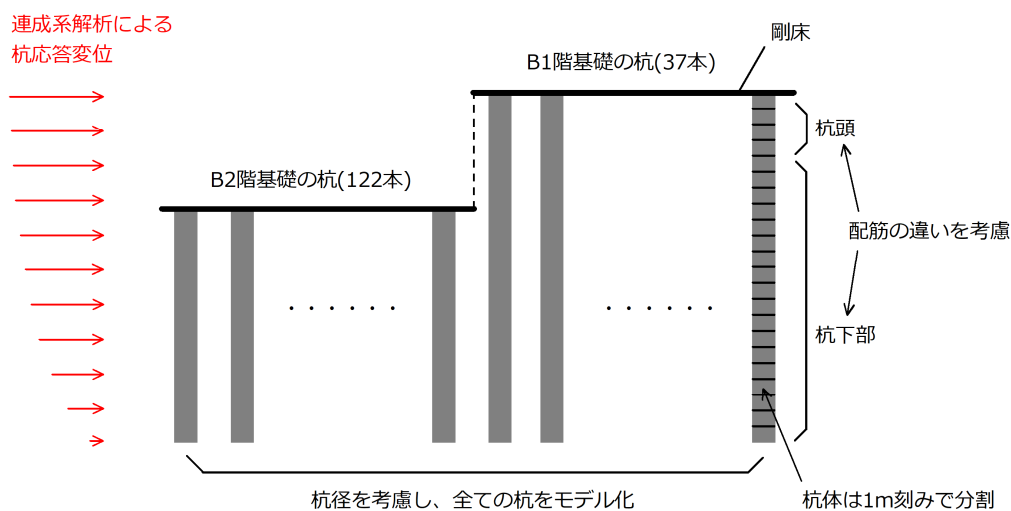


図 5-11 モデル概要図

解析の流れを図 5-12 に示す。1 ステップの解析毎に、指定したステップ数（50 ステップ）で分割した変位・軸力を作用させ、応力を算出する。各ステップにおける曲げモーメントと軸力から杭の降伏判定を行い、次ステップの解析に移る。これを最終ステップまで繰り返し、最終的な杭の応力・降伏の有無を確認する。

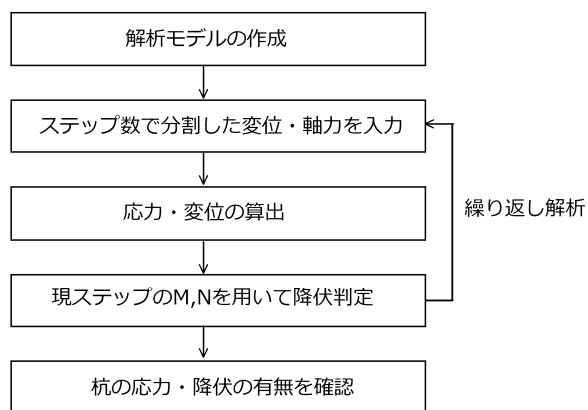


図 5-12 解析の流れ

### 5.3.2. 検証用軸力の算出

検証用軸力の算出には、一貫計算ソフト Super Build/SS3 ver.1.1.1.49（ユニオンシステム株式会社）を用いた。解析モデルは H29 年度耐震安全性検証で用いられたモデルと同じものとした。

外力分布をレベル 2 地震時の最大応答層せん断力分布として増分解析を行い(X 方向：Random 波、Y 方向：Hachinohe-NS 波)、応答層せん断力時の支点反力を、レベル 2 地震時の杭の軸力とした。また、竣工図よりフーチング重量を考慮し、支点耐力は杭体の引張耐力とした。表 5-2 に各階の  $C_i$  を、表 5-3 に各杭径の杭体の引張耐力を示す。

表 5-2 検証用軸力算出のための外力分布

| 階  | $\Sigma w_i$<br>[kN] | X         |       | Y         |       |
|----|----------------------|-----------|-------|-----------|-------|
|    |                      | Q<br>[kN] | $C_i$ | Q<br>[kN] | $C_i$ |
| 15 | 11,529               | 7,770     | 0.674 | 7,027     | 0.610 |
| 14 | 32,165               | 20,141    | 0.626 | 18,061    | 0.562 |
| 13 | 46,568               | 26,124    | 0.561 | 23,707    | 0.509 |
| 12 | 59,114               | 30,114    | 0.509 | 27,624    | 0.467 |
| 11 | 71,570               | 33,430    | 0.467 | 30,199    | 0.422 |
| 10 | 84,055               | 36,794    | 0.438 | 36,248    | 0.431 |
| 9  | 96,540               | 40,159    | 0.416 | 41,714    | 0.432 |
| 8  | 109,072              | 42,596    | 0.391 | 45,763    | 0.420 |
| 7  | 121,633              | 44,592    | 0.367 | 47,768    | 0.393 |
| 6  | 134,219              | 46,258    | 0.345 | 49,555    | 0.369 |
| 5  | 146,832              | 47,480    | 0.323 | 50,801    | 0.346 |
| 4  | 159,461              | 48,693    | 0.305 | 51,420    | 0.322 |
| 3  | 191,562              | 52,508    | 0.274 | 52,311    | 0.273 |
| 2  | 216,837              | 55,874    | 0.258 | 52,735    | 0.243 |
| 1  | 241,052              | 61,978    | 0.257 | 55,070    | 0.228 |

表 5-3 杭主筋の引張耐力

| 杭径<br>[mm] | 主筋     | $A_s$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $R_u$<br>[kN] |
|------------|--------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|
| 1200       | 9-D25  | 4,563                       | 345                                | 1,732         |
| 1300       | 11-D25 | 5,577                       | 345                                | 2,116         |
| 1500       | 14-D25 | 7,098                       | 345                                | 2,694         |
| 1800       | 21-D25 | 10,647                      | 345                                | 4,041         |

- $A_s$  (mm<sup>2</sup>) : 杭下部の主筋断面積  
 $\sigma_y$  (N/mm<sup>2</sup>) : 主筋の降伏応力度  
 $R_u$  (kN) : 杭主筋の引張耐力 (=  $A_s \times \sigma_y \times 1.1$ )

杭の曲げ降伏の判定に用いる検証用軸力 $N_D$ は、上下動 0.35G を考慮し、以下のように算出する。圧縮を正、引張を負とし、変動軸力 $N_E$ の符号は、レベル 2 地震時軸力 $N_{L2}$ の符号と等しいものとする。表 5-4～表 5-13 に下記の記号に対応する軸力を示す。

$$N_D = N_L \pm N_E$$

- $N_D$  (kN) : 検証用軸力  
 $N_L$  (kN) : 長期軸力  
 $N_E$  (kN) : 変動軸力 ( $= \sqrt{N_{L2}^2 + N_V^2}$ )  
 $N_{L2}$  (kN) : レベル 2 地震時軸力  
 $N_V$  (kN) : 上下動による軸力 ( $= 0.35 \times N_L$ )

表 5-4 長期軸力 $N_L$  [kN]

| 軸   | X8   | X9   | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16  | X17  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Y11 |      |      | 1497 | 1532 | 1527 | 1527 | 1527 | 1532 |      |      |
| Y10 |      | 2595 | 2952 | 2994 | 2993 | 2990 | 3009 | 3144 | 2696 | 2638 |
| Y9' | 1459 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Y9  | 1889 | 3529 | 3546 | 3455 | 3450 | 3448 | 3438 | 4246 | 2360 | 3474 |
| Y8  | 3758 | 4081 | 4117 | 4042 | 4036 | 4049 | 4073 | 4251 | 3812 | 2264 |
| Y7  | 3005 | 3936 | 3560 | 3613 | 3650 | 3666 | 3659 | 3583 | 3836 | 3075 |
| Y6  | 4786 | 5376 | 4084 | 4463 | 4373 | 4343 | 4380 | 4022 | 4812 | 4947 |
| Y5  | 2231 | 8139 |      |      |      |      |      |      | 9215 | 2283 |
| Y4  |      | 1403 | 4001 | 3939 | 3953 | 3953 | 3970 | 4002 | 1397 |      |
| Y3  | 3412 | 3780 | 3801 | 4165 | 4172 | 4190 | 4222 | 3847 | 4200 | 3464 |
| Y2  | 2647 | 4161 | 3133 | 3076 | 3087 | 3087 | 3078 | 3135 | 4041 | 1534 |
| Y1  | 1131 | 1080 | 2737 | 2802 | 2804 | 2804 | 2803 | 2745 | 1928 | 1202 |

表 5-5 レベル 2 地震時軸力 $N_{L2}$  [kN] (X 正加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10  | X11 | X12 | X13 | X14 | X15  | X16   | X17  |
|-----|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|
| Y11 |       |       | -74  | 45  | -18 | 1   | 15  | 1    |       |      |
| Y10 |       | 993   | 42   | -59 | -20 | 14  | 48  | 112  | -88   | 1813 |
| Y9' | -3191 |       |      |     |     |     |     |      |       |      |
| Y9  | -1521 | 1504  | 51   | 12  | 6   | -4  | -55 | 395  | 17    | -627 |
| Y8  | -5256 | 415   | 74   | 29  | 14  | 5   | 6   | 1    | -284  | 2090 |
| Y7  | -4603 | 1718  | 437  | 105 | 45  | 5   | 49  | -210 | -2165 | 4498 |
| Y6  | -7335 | 1133  | 213  | 266 | 0   | -25 | 41  | 272  | -1507 | 6755 |
| Y5  | -2058 | 4030  |      |     |     |     |     |      | -6331 | 1624 |
| Y4  |       | -199  | -152 | 49  | 1   | 3   | -13 | 231  | 40    |      |
| Y3  | -5357 | 3273  | 471  | 9   | 42  | 4   | 132 | -127 | -3529 | 5401 |
| Y2  | -5341 | 2697  | 74   | 16  | 11  | -1  | -18 | 34   | -3466 | 3582 |
| Y1  | -3619 | -1692 | -278 | 2   | -17 | 4   | -21 | 256  | 3137  | 2923 |

表 5-6 レベル 2 地震時軸力 $N_{L2}$  [kN] (X 負加力)

| 軸   | X8   | X9    | X10  | X11  | X12 | X13 | X14 | X15  | X16   | X17   |
|-----|------|-------|------|------|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| Y11 |      |       | 28   | -28  | 28  | -4  | -18 | 18   |       |       |
| Y10 |      | -914  | -25  | 59   | 21  | -13 | -50 | -97  | 81    | -1819 |
| Y9' | 3636 |       |      |      |     |     |     |      |       |       |
| Y9  | 978  | -1561 | -47  | -20  | -7  | 5   | 28  | -346 | -58   | 670   |
| Y8  | 4954 | -363  | -36  | -10  | -5  | 4   | 14  | 56   | 307   | -2257 |
| Y7  | 4763 | -2208 | -229 | -20  | -26 | 14  | 34  | 434  | 1736  | -4371 |
| Y6  | 7359 | -1367 | 294  | -160 | -84 | -19 | -29 | 165  | 1317  | -6602 |
| Y5  | 1729 | -4472 |      |      |     |     |     |      | 6166  | -2010 |
| Y4  |      | 189   | 222  | -35  | -7  | -5  | 22  | -158 | -39   |       |
| Y3  | 5200 | -3540 | -141 | 87   | -24 | 13  | -47 | 444  | 3081  | -5178 |
| Y2  | 7152 | -3680 | 28   | -23  | -5  | 4   | 20  | 6    | 2659  | -3266 |
| Y1  | 2909 | 1608  | 279  | -11  | 16  | -4  | 16  | -254 | -3217 | -2934 |

表 5-7 レベル 2 地震時軸力 $N_{L2}$  [kN] (Y 正加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10   | X11   | X12   | X13   | X14   | X15   | X16   | X17   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Y11 |       |       | 355   | 240   | 258   | 256   | 258   | 232   |       |       |
| Y10 |       | 2715  | 1046  | 937   | 946   | 942   | 942   | 869   | 153   | 2371  |
| Y9' | 3029  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Y9  | -357  | -4270 | -671  | -507  | -523  | -521  | -520  | -471  | -312  | -5590 |
| Y8  | 2573  | 1282  | 1124  | 1120  | 1116  | 1114  | 1119  | 1172  | 1905  | 2539  |
| Y7  | 5046  | 5570  | 2102  | 1342  | 1279  | 1294  | 1389  | 2038  | 4900  | 4796  |
| Y6  | 352   | -2441 | -49   | -89   | -171  | -201  | -184  | -130  | -1004 | 223   |
| Y5  | -357  | 1289  |       |       |       |       |       |       | 3222  | -393  |
| Y4  |       | -404  | -172  | -181  | -180  | -182  | -191  | -176  | 9     |       |
| Y3  | -4674 | -3745 | -2039 | -1662 | -1527 | -1517 | -1635 | -1989 | -4616 | -4589 |
| Y2  | -4882 | -1285 | 119   | 113   | 118   | 118   | 116   | 120   | -1498 | -2382 |
| Y1  | -2564 | -1336 | -855  | -471  | -464  | -466  | -478  | -827  | -2434 | -2591 |

表 5-8 レベル 2 地震時軸力 $N_{L2}$  [kN] (Y 負加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10   | X11   | X12   | X13   | X14   | X15   | X16   | X17   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Y11 |       |       | -337  | -215  | -233  | -231  | -234  | -202  |       |       |
| Y10 |       | -2781 | -1069 | -962  | -971  | -965  | -964  | -899  | -185  | -3604 |
| Y9' | -2925 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Y9  | 376   | 4350  | 732   | 535   | 551   | 549   | 541   | 564   | 217   | 6840  |
| Y8  | -3040 | -1526 | -1324 | -1282 | -1272 | -1270 | -1278 | -1372 | -2125 | -2761 |
| Y7  | -4698 | -5162 | -2205 | -1377 | -1276 | -1275 | -1369 | -2034 | -4838 | -4510 |
| Y6  | -711  | 1962  | 293   | 312   | 346   | 353   | 340   | 304   | 1138  | -599  |
| Y5  | 128   | -1786 |       |       |       |       |       |       | -4379 | 153   |
| Y4  |       | 424   | -67   | -96   | -102  | -99   | -90   | -75   | -9    |       |
| Y3  | 4910  | 3912  | 2009  | 1642  | 1506  | 1500  | 1628  | 1974  | 4872  | 4881  |
| Y2  | 4663  | 1159  | -67   | -65   | -69   | -70   | -68   | -68   | 1244  | 2335  |
| Y1  | 2568  | 1318  | 787   | 397   | 390   | 392   | 400   | 760   | 2495  | 2577  |



表 5-9 上下動軸力 $N_V$  [kN]

| 軸   | X8   | X9   | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16  | X17  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Y11 |      |      | 524  | 536  | 534  | 534  | 534  | 536  |      |      |
| Y10 |      | 908  | 1033 | 1048 | 1048 | 1047 | 1053 | 1100 | 944  | 923  |
| Y9' | 511  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Y9  | 661  | 1235 | 1241 | 1209 | 1208 | 1207 | 1203 | 1486 | 826  | 1216 |
| Y8  | 1315 | 1428 | 1441 | 1415 | 1413 | 1417 | 1426 | 1488 | 1334 | 792  |
| Y7  | 1052 | 1378 | 1246 | 1265 | 1278 | 1283 | 1281 | 1254 | 1343 | 1076 |
| Y6  | 1675 | 1882 | 1429 | 1562 | 1531 | 1520 | 1533 | 1408 | 1684 | 1731 |
| Y5  | 781  | 2849 |      |      |      |      |      |      | 3225 | 799  |
| Y4  |      | 491  | 1400 | 1379 | 1384 | 1384 | 1390 | 1401 | 489  |      |
| Y3  | 1194 | 1323 | 1330 | 1458 | 1460 | 1467 | 1478 | 1346 | 1470 | 1212 |
| Y2  | 926  | 1456 | 1097 | 1077 | 1080 | 1080 | 1077 | 1097 | 1414 | 537  |
| Y1  | 396  | 378  | 958  | 981  | 981  | 981  | 981  | 961  | 675  | 421  |

表 5-10 検証用軸力 $N_D$  [kN] (X 正加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16  | X17   |
|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Y11 |       |       | 968  | 2070 | 993  | 2061 | 2061 | 2068 |      |       |
| Y10 |       | 3941  | 3986 | 1944 | 1945 | 4037 | 4063 | 4250 | 1748 | 4672  |
| Y9' | -1773 |       |      |      |      |      |      |      |      |       |
| Y9  | 231   | 5475  | 4788 | 4664 | 4658 | 2241 | 2234 | 5784 | 3186 | 2106  |
| Y8  | -1660 | 5568  | 5560 | 5457 | 5449 | 5466 | 5499 | 5739 | 2448 | 4499  |
| Y7  | -1717 | 6138  | 4880 | 4882 | 4929 | 4949 | 4941 | 2312 | 1288 | 7700  |
| Y6  | -2738 | 7573  | 5529 | 6047 | 5904 | 2823 | 5914 | 5456 | 2552 | 11920 |
| Y5  | 30    | 13074 |      |      |      |      |      |      | 2110 | 4093  |
| Y4  |       | 873   | 2593 | 5319 | 5337 | 5337 | 2580 | 5422 | 1888 |       |
| Y3  | -2076 | 7310  | 5212 | 5623 | 5633 | 5657 | 5706 | 2495 | 377  | 8999  |
| Y2  | -2774 | 7226  | 4232 | 4153 | 4167 | 2007 | 2001 | 4233 | 298  | 5156  |
| Y1  | -2510 | -654  | 1739 | 3783 | 1823 | 3785 | 1822 | 3740 | 5137 | 4155  |

表 5-11 検証用軸力 $N_D$  [kN] (X 負加力)

| 軸   | X8    | X9   | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16   | X17   |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Y11 |       |      | 2022 | 995  | 2062 | 993  | 993  | 2068 |       |       |
| Y10 |       | 1307 | 1919 | 4044 | 4041 | 1943 | 1955 | 2040 | 3643  | 598   |
| Y9' | 5131  |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| Y9  | 3069  | 1539 | 2304 | 2246 | 2242 | 4655 | 4641 | 2720 | 1532  | 4862  |
| Y8  | 8884  | 2608 | 2676 | 2627 | 2623 | 5466 | 5499 | 5740 | 5181  | -128  |
| Y7  | 7883  | 1333 | 2293 | 2348 | 2372 | 4949 | 4940 | 4910 | 6031  | -1426 |
| Y6  | 12333 | 3050 | 5543 | 2893 | 2840 | 2823 | 2847 | 5440 | 6950  | -1878 |
| Y5  | 4128  | 2837 |      |      |      |      |      |      | 16173 | 120   |
| Y4  |       | 1929 | 5418 | 2560 | 2569 | 2569 | 5360 | 2592 | 906   |       |
| Y3  | 8747  | 1    | 2464 | 5626 | 2712 | 5657 | 2743 | 5264 | 7614  | -1854 |
| Y2  | 9859  | 203  | 4230 | 1999 | 2007 | 4167 | 4155 | 4232 | 7053  | -1776 |
| Y1  | 4067  | 2732 | 3735 | 1821 | 3785 | 1823 | 3784 | 1751 | -1359 | -1762 |

表 5-12 検証用軸力 $N_D$  [kN] (Y 正加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16   | X17   |
|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Y11 |       |       | 2130 | 2119 | 2120 | 2119 | 2120 | 2116 |       |       |
| Y10 |       | 5458  | 4422 | 4400 | 4405 | 4398 | 4422 | 4546 | 3652  | 5182  |
| Y9' | 4531  |       |      |      |      |      |      |      |       |       |
| Y9  | 1138  | -916  | 2135 | 2144 | 2134 | 2133 | 2127 | 2687 | 1477  | -2247 |
| Y8  | 6648  | 6000  | 5945 | 5847 | 5837 | 5851 | 5886 | 6145 | 6138  | 4924  |
| Y7  | 8159  | 9674  | 6004 | 5457 | 5458 | 5488 | 5549 | 5976 | 8917  | 7990  |
| Y6  | 6498  | 2294  | 2654 | 2898 | 2832 | 2810 | 2836 | 2608 | 2851  | 6692  |
| Y5  | 1372  | 11266 |      |      |      |      |      |      | 13774 | 1393  |
| Y4  |       | 767   | 2590 | 2548 | 2557 | 2557 | 2567 | 2590 | 1886  |       |
| Y3  | -1412 | -192  | 1367 | 1954 | 2059 | 2080 | 2018 | 1445 | -644  | -1282 |
| Y2  | -2322 | 2219  | 4236 | 4159 | 4173 | 4173 | 4161 | 4239 | 1981  | -908  |
| Y1  | -1463 | -308  | 1453 | 1714 | 1719 | 1718 | 1712 | 1477 | -598  | -1423 |

表 5-13 検証用軸力 $N_D$  [kN] (Y 負加力)

| 軸   | X8    | X9    | X10  | X11  | X12  | X13  | X14  | X15  | X16   | X17   |
|-----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Y11 |       |       | 874  | 954  | 944  | 945  | 944  | 959  |       |       |
| Y10 |       | -330  | 1465 | 1571 | 1564 | 1566 | 1581 | 1723 | 1734  | -1082 |
| Y9' | -1510 |       |      |      |      |      |      |      |       |       |
| Y9  | 2649  | 8051  | 4987 | 4777 | 4778 | 4774 | 4757 | 5835 | 3214  | 10421 |
| Y8  | 446   | 1991  | 2160 | 2133 | 2135 | 2146 | 2158 | 2227 | 1303  | -608  |
| Y7  | -1809 | -1407 | 1027 | 1743 | 1844 | 1857 | 1784 | 1194 | -1185 | -1562 |
| Y6  | 2966  | 8095  | 5543 | 6056 | 5943 | 5903 | 5950 | 5462 | 6844  | 3115  |
| Y5  | 3022  | 4776  |      |      |      |      |      |      | 3777  | 3097  |
| Y4  |       | 2052  | 2599 | 2557 | 2565 | 2565 | 2577 | 2599 | 908   |       |
| Y3  | 8465  | 7910  | 6210 | 6361 | 6270 | 6288 | 6421 | 6236 | 9289  | 8493  |
| Y2  | 7401  | 6022  | 2034 | 1997 | 2005 | 2005 | 1999 | 2036 | 5924  | 3930  |
| Y1  | 3729  | 2451  | 3977 | 3860 | 3860 | 3860 | 3862 | 3970 | 4513  | 3813  |

## 5.4. 杭の検証結果

### 5.4.1. 安全性の判定基準

安全性の判定基準を表 5-14 に示す。基準は、杭の鉛直力支持能力の有無によることとする。「杭頭の曲げ降伏」、「引張破壊」は鉛直力支持能力が保持されると判断し、「せん断破壊」、「軸圧縮破壊」、「杭頭及び杭中間部の 2 点以上での曲げ降伏」は鉛直力支持能力が失われるため NG と判断する。

表 5-14 杭の安全性の判定基準

| 判定 | 鉛直力支持能力の有無 | 杭の状態                  |
|----|------------|-----------------------|
| OK | あり         | 杭頭の曲げ降伏               |
|    |            | 引張破壊                  |
| NG | なし         | せん断破壊                 |
|    |            | 軸圧縮破壊                 |
|    |            | 杭頭及び杭中間部の 2 点以上での曲げ降伏 |

### 5.4.2. 終局耐力の算出

曲げ及び軸力による降伏判定・せん断破壊の判定は、ステップ毎に発生応力と以下に示す終局耐力を比較することにより行う。

#### (1) 曲げ及び軸力

図 5-13 に各杭径の杭頭部の M-N 曲線、図 5-14 に杭下部の M-N 曲線を示す。

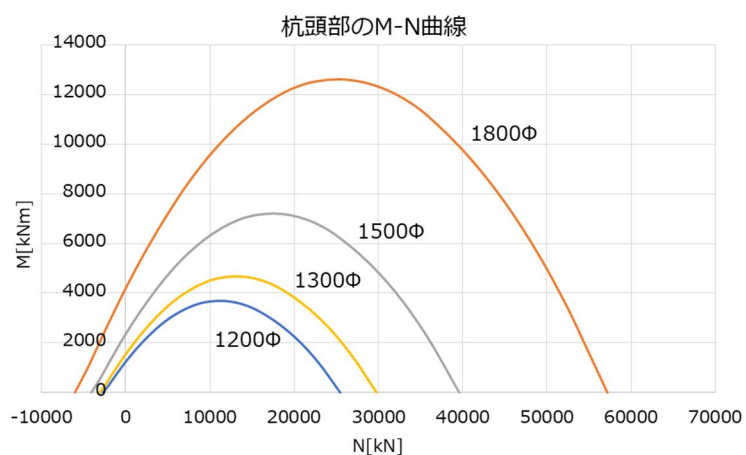


図 5-13 杭頭部の M-N 曲線

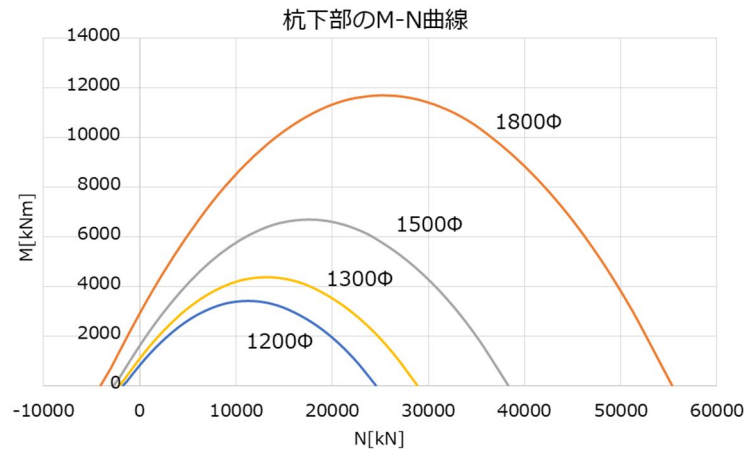


図 5-14 杭下部の M-N 曲線

## (2) セン断力

杭のせん断耐力 $Q_u$ は、『鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針（案）・解説』に基づき、以下のように算出する。

$$Q_u = \left[ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + \xi \cdot Fc)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right] b \cdot j$$

|                                    |                                                    |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $Q_u$ (N)                          | : 杭のせん断強度                                          |
| $M/(Q \cdot d)$                    | : セン断スパン比 (1.0)                                    |
| $M$ (Nmm)                          | : 杭に生じる最大曲げモーメント                                   |
| $Q$ (N)                            | : 杭に生じる最大せん断力                                      |
| $d$ (mm)                           | : 等価長方形断面の有効せい ( $d = 0.9D$ )                      |
| $D$ (mm)                           | : 杭直径                                              |
| $p_t$ (%)                          | : 引張鉄筋比 ( $p_t = p_g/4$ )                          |
| $p_g$ (%)                          | : 主筋比 ( $p_g = 100A_g/bd$ )                        |
| $A_g$ (mm <sup>2</sup> )           | : 主筋全断面積                                           |
| $b$ (mm)                           | : 等価長方形断面の幅 ( $b = (\pi/4)/D$ )                    |
| $\xi$                              | : 施工の品質管理に関わる係数 (0.75)                             |
| $Fc$ (N/mm <sup>2</sup> )          | : コンクリートの設計基準強度                                    |
| $p_w$                              | : セン断補強筋比 ( $p_w = a_w/bx$ )                       |
| $a_w$ (mm <sup>2</sup> )           | : 1組のせん断補強筋比の断面積                                   |
| $x$ (mm)                           | : セン断補強筋のピッチ                                       |
| $\sigma_{wy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | : セン断補強筋の規格降伏点                                     |
| $\sigma_0$ (N/mm <sup>2</sup> )    | : 平均軸応力度<br>圧縮を正とし、0以上かつ $(1/3)\xi \cdot Fc$ 以下とする |
| $j$ (mm)                           | : 応力中心距離 ( $j = (7/8)/d$ )                         |

#### 5.4.3. 検証結果

次ページ以降に、杭の検証結果を示す。図 5-15～図 5-18 に杭頭部の応力が最大となる「検証用地震波及び時刻 1」の応答変位を用いた場合の検証結果、図 5-19～図 5-22 に杭下部の応力が最大となる「検証用地震波及び時刻 2」の応答変位を用いた場合の検証結果を示している。

曲げ及び軸力については、▲は「引張破壊」、×は「杭頭及び杭中間部の 2 点以上での曲げ降伏」(NG) という結果となった。また、せん断については、全ての杭でせん断破壊が発生する (NG) という結果となった。

また、図 5-24～図 5-30 に代表位置での杭のヒンジ図を示す。(応答変位は、X 方向杭頭部曲げ最大時) 図 5-23 にヒンジ図を記載する杭の位置を示す。

以上より、全方向において全ての杭が NG となるため、杭の耐震性能は不足していると判断する。

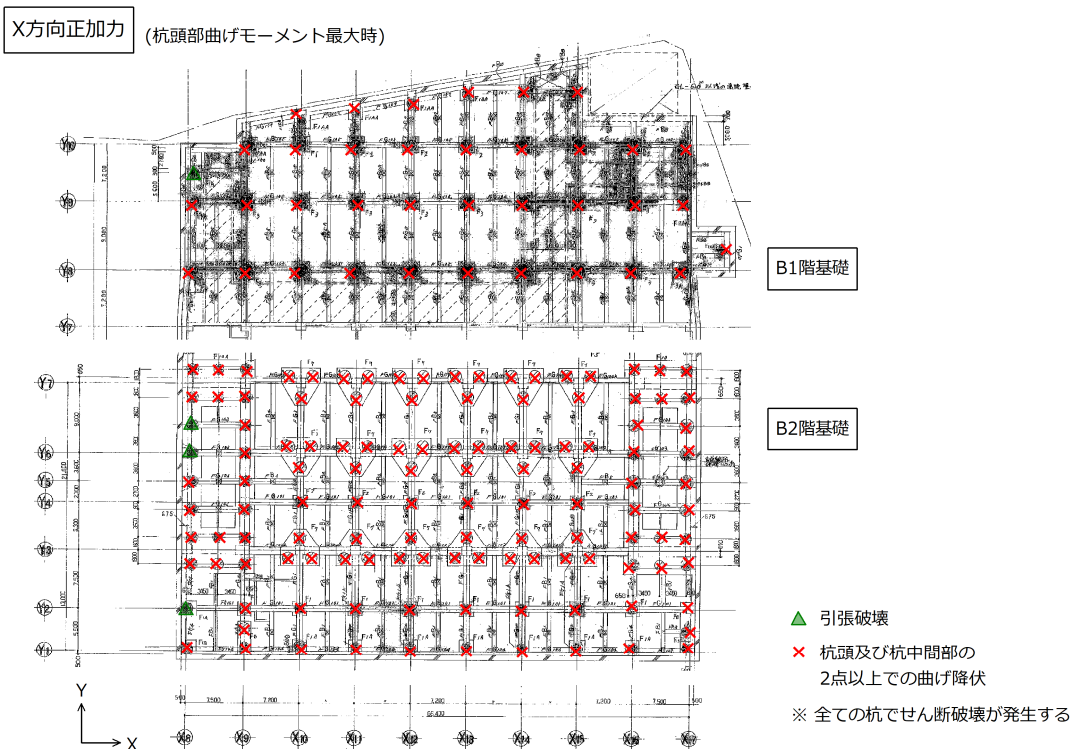


図 5-15 杭の検証結果 (X 方向正加力)

【X 方向杭頭部曲げモーメント最大時 (Hachinohe-NS 波 33.098s)】

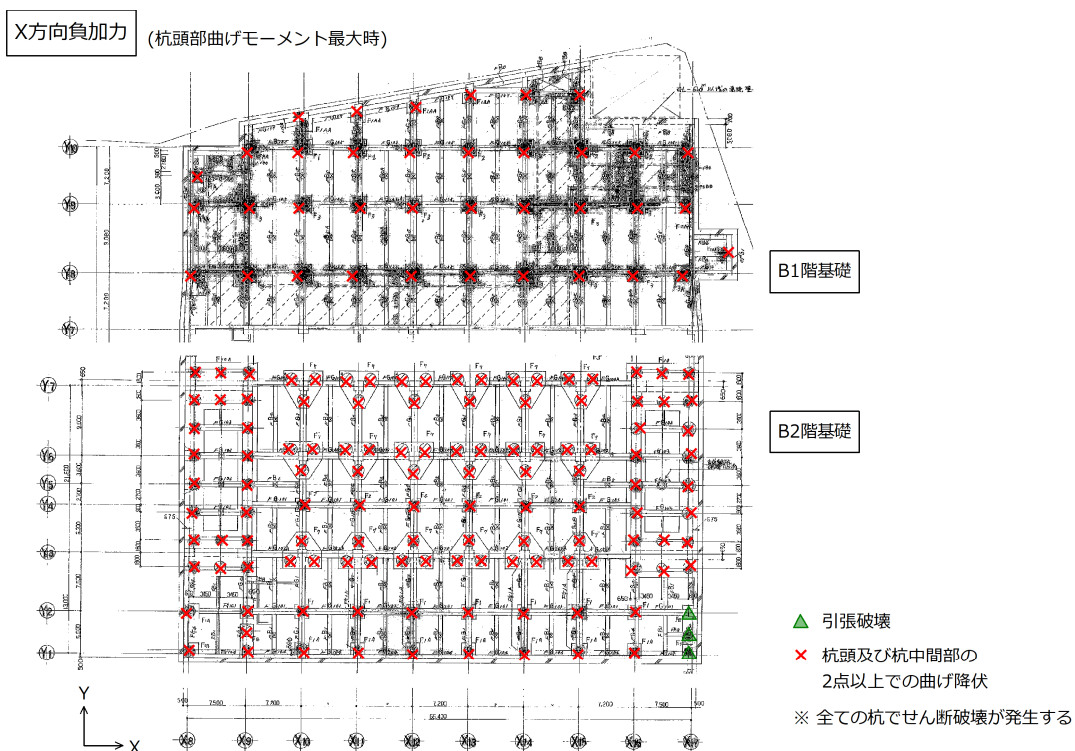


図 5-16 杭の検証結果 (X 方向負加力)

【X 方向杭頭部曲げモーメント最大時 (Hachinohe-NS 波 33.098s)】

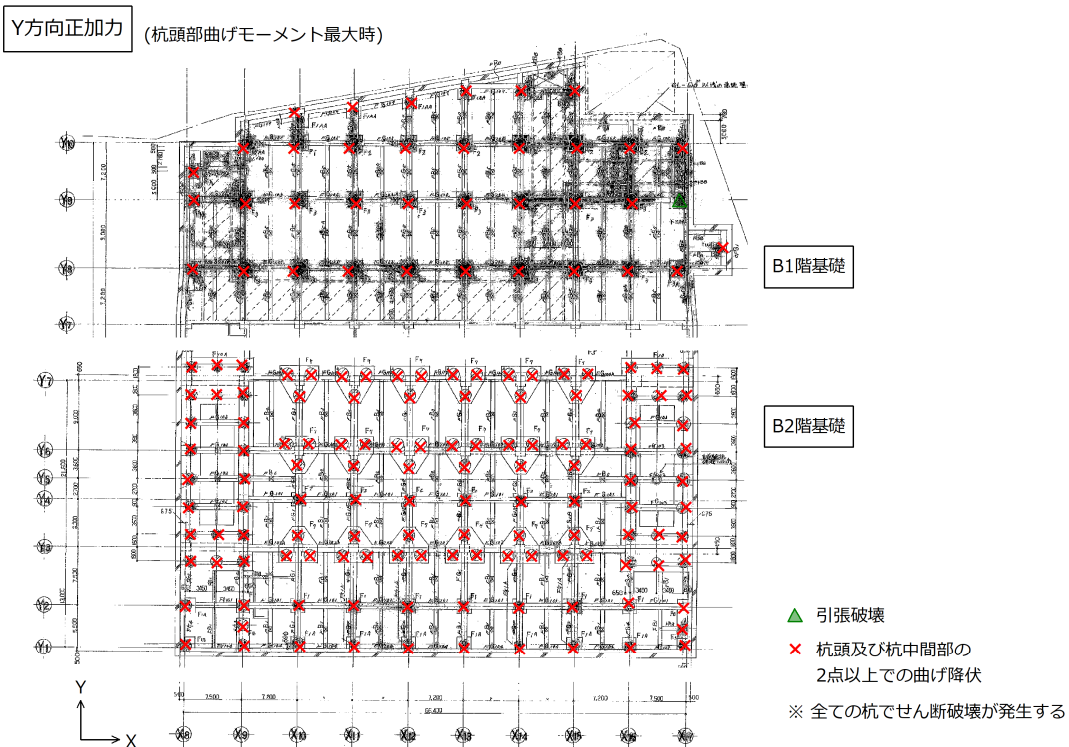


図 5-17 杭の検証結果 (Y 方向正加力)

【Y 方向杭頭部曲げモーメント最大時 (Hachinohe-NS 波 33.093s)】

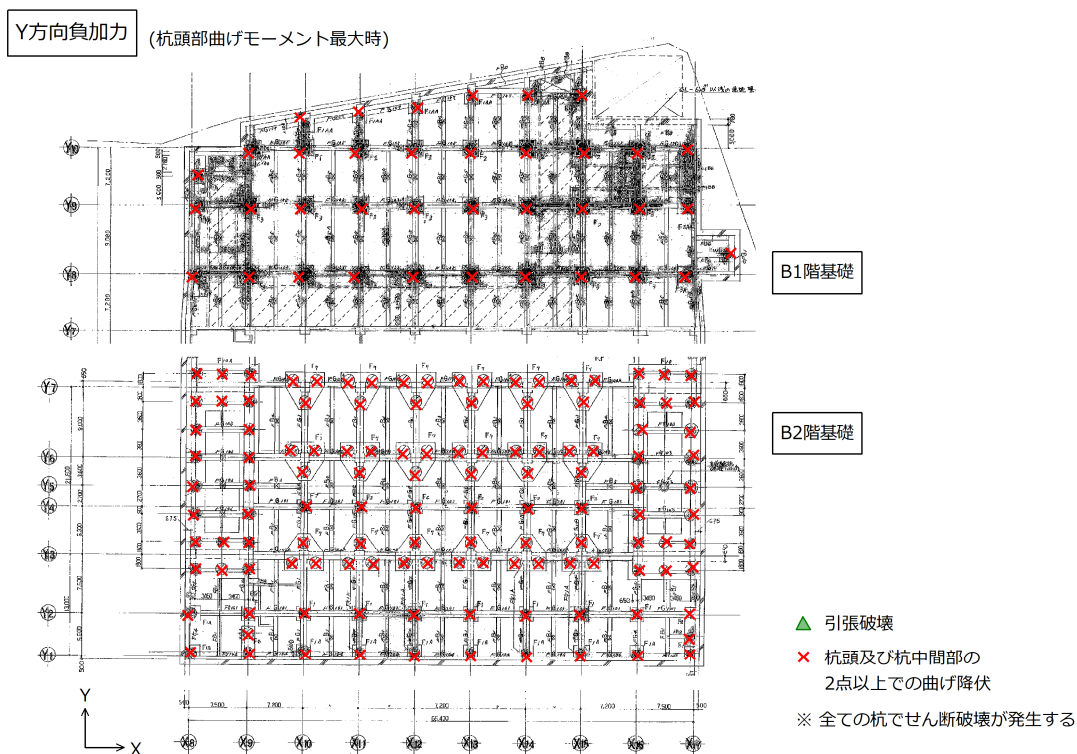


図 5-18 杭の検証結果 (Y 方向負加力)

【Y 方向杭頭部曲げモーメント最大時 (Hachinohe-NS 波 33.093s)】



X方向正加力 (杭下部曲げモーメント最大時)

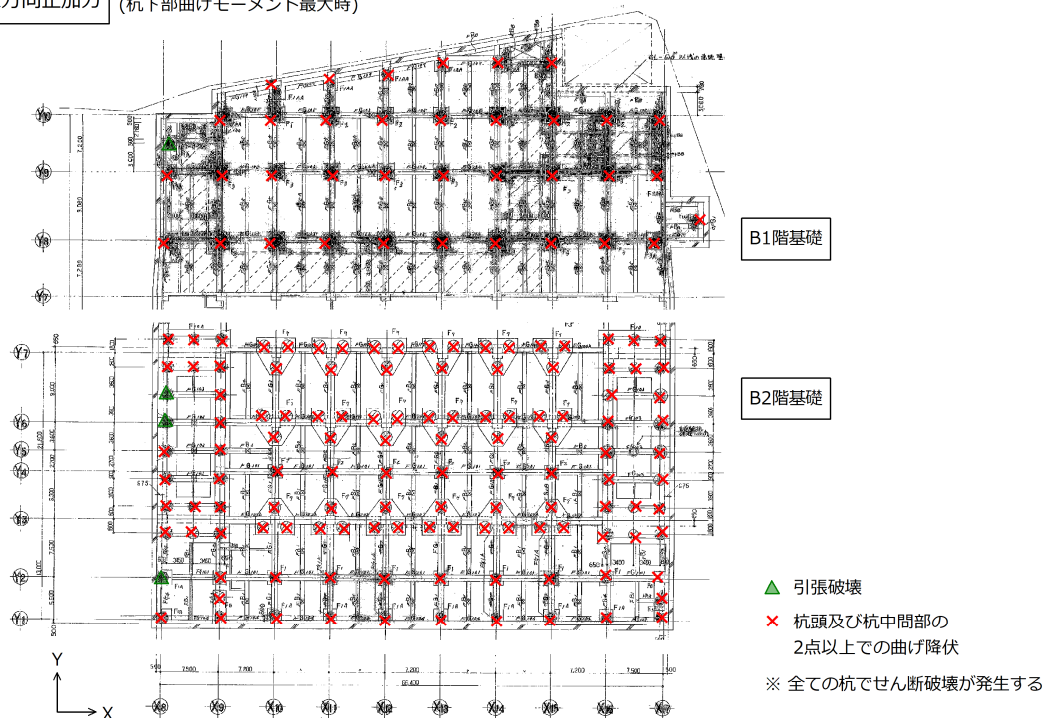


図 5-19 杭の検証結果 (X 方向正加力)

【X 方向杭下部曲げモーメント最大時 (JMAKOBEN-S 波 33.787s)】

X方向負加力 (杭下部曲げモーメント最大時)

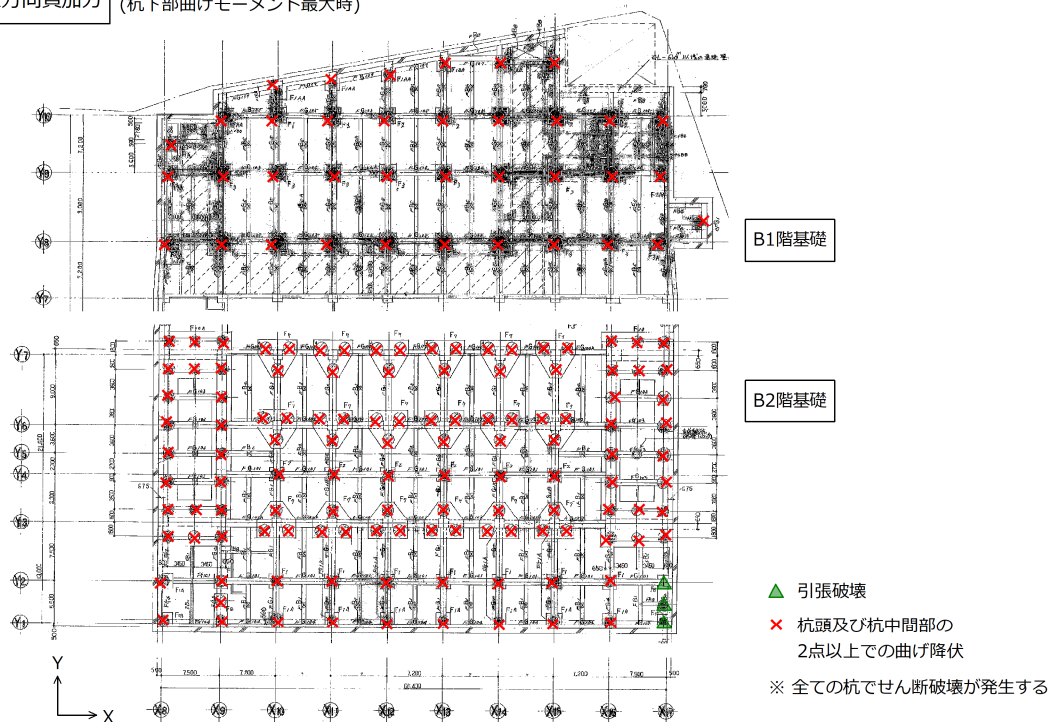


図 5-20 杭の検証結果 (X 方向負加力)

【X 方向杭下部曲げモーメント最大時 (JMAKOBEN-S 波 33.787s)】



Y方向正加力 (杭下部曲げモーメント最大時)

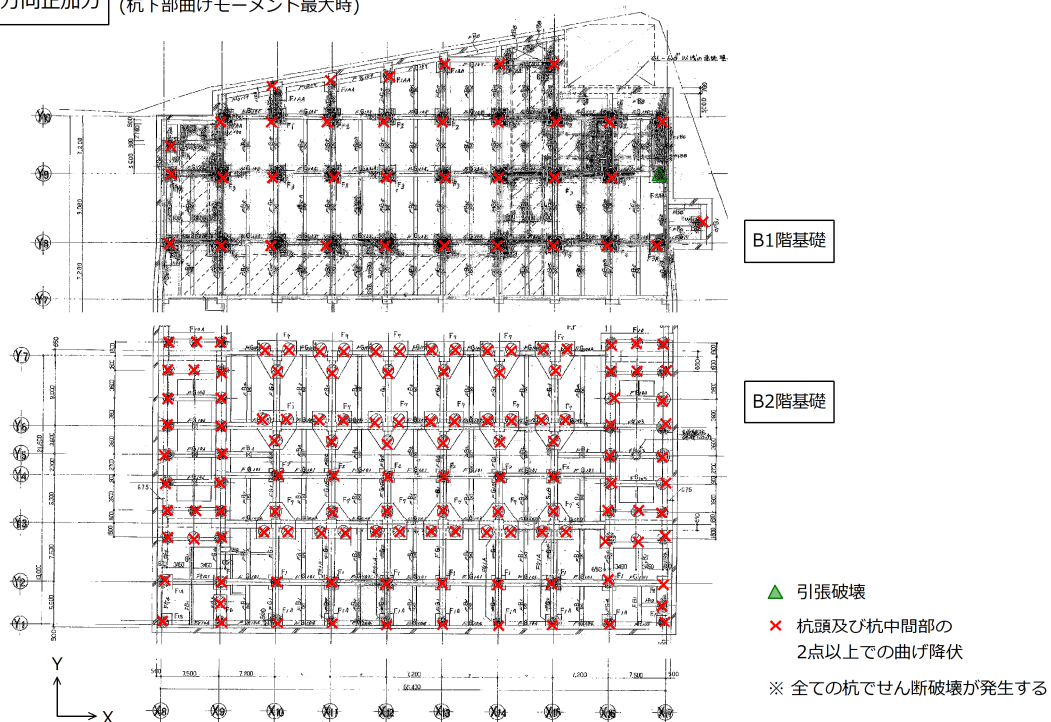


図 5-21 杭の検証結果 (Y 方向正加力)

【Y 方向杭下部曲げモーメント最大時 (JMAKOBEN-S 波 33.788s)】

Y方向負加力 (杭下部曲げモーメント最大時)

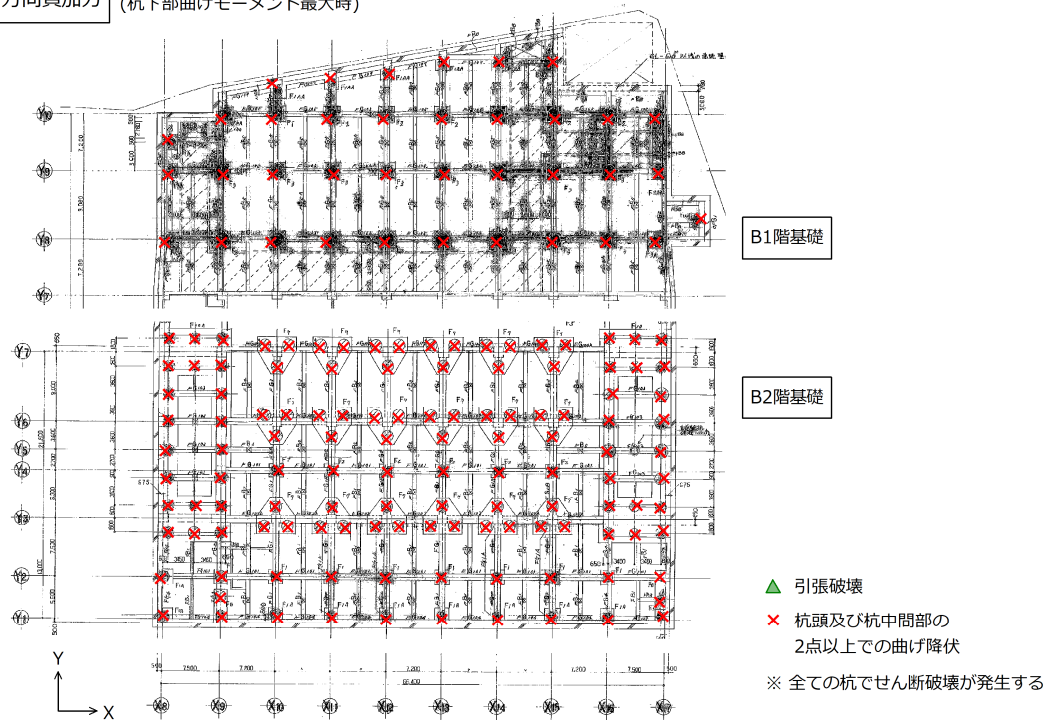


図 5-22 杭の検証結果 (Y 方向負加力)

【Y 方向杭下部曲げモーメント最大時 (JMAKOBEN-S 波 33.788s)】

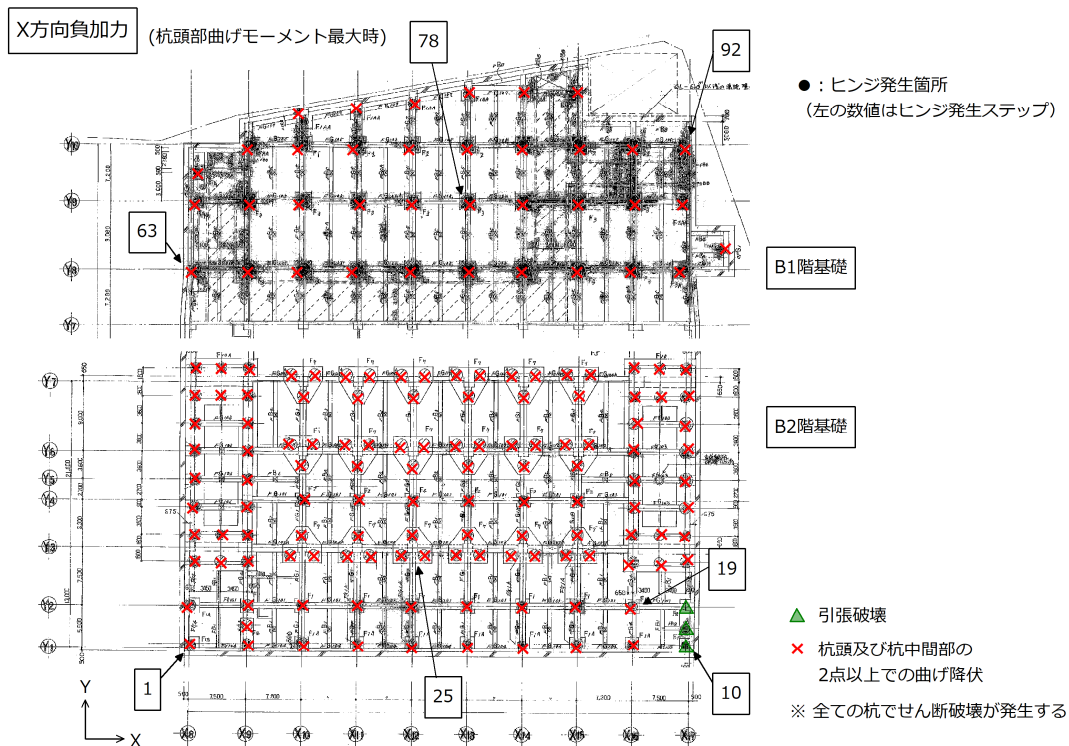


図 5-23 ヒンジ図を記載する杭位置

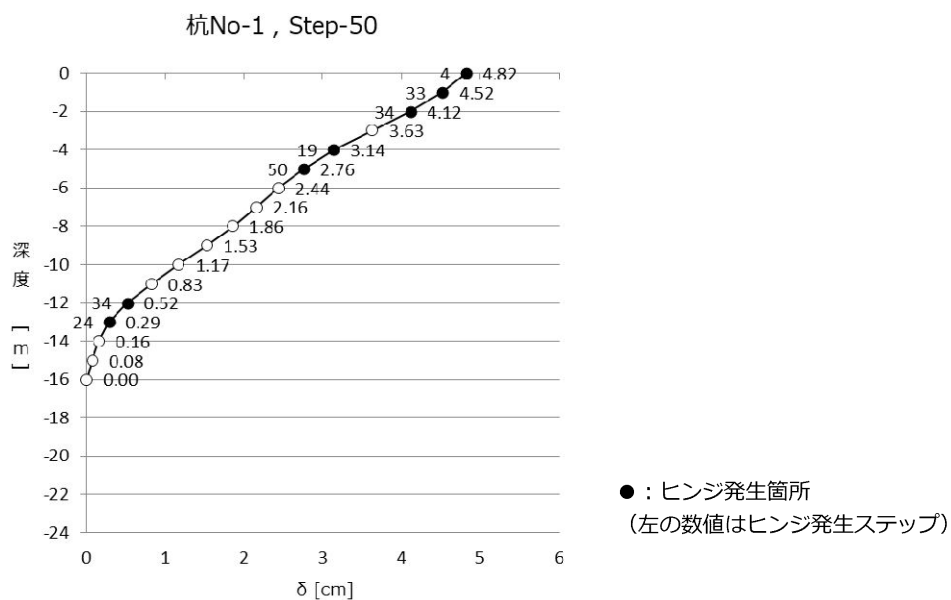


図 5-24 X方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.1)

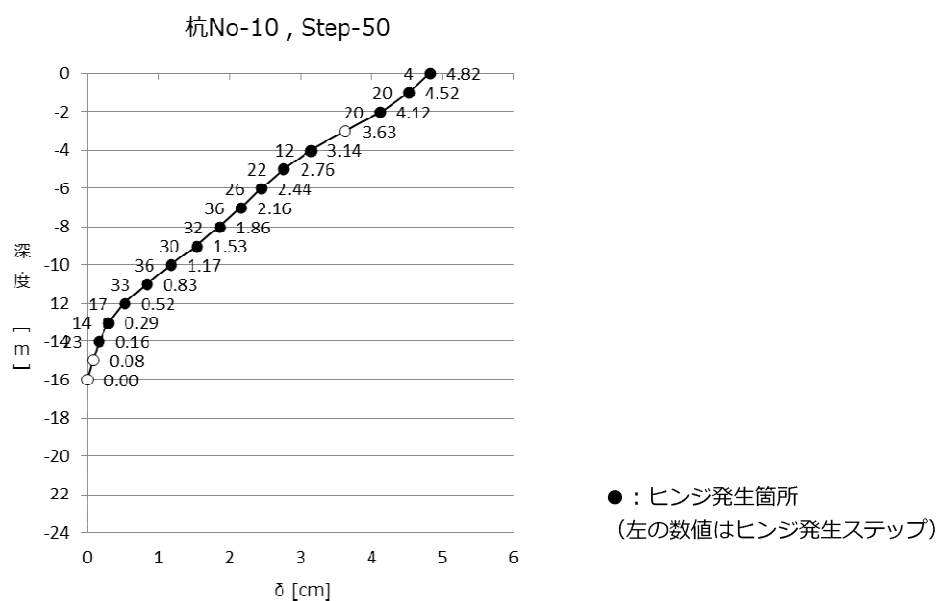


図 5-25 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.10)

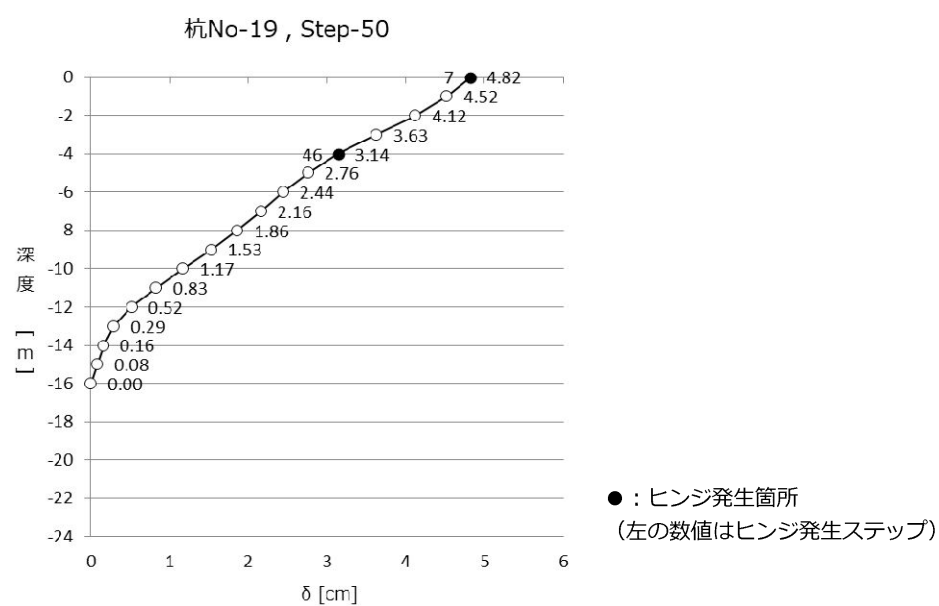


図 5-26 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.19)

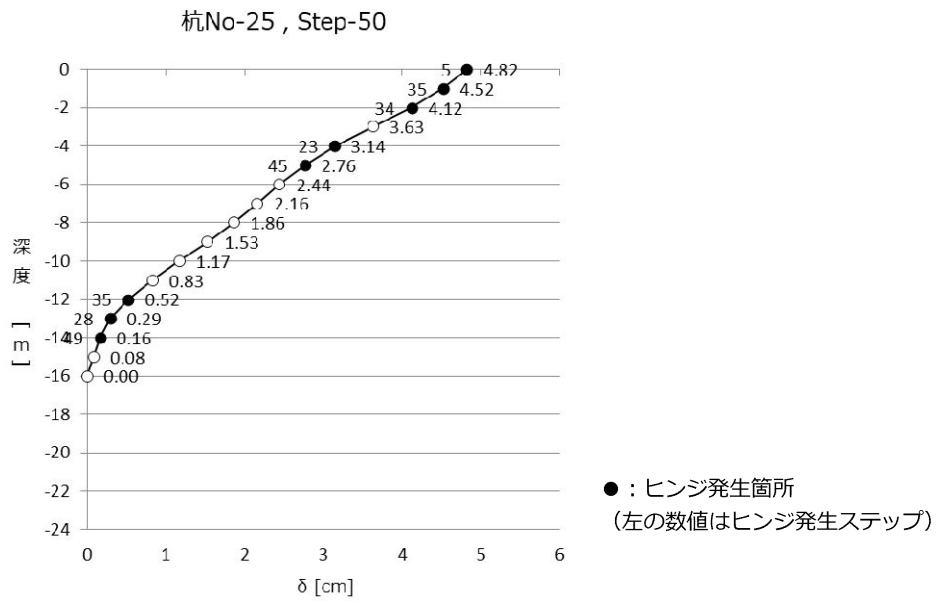


図 5-27 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.25)

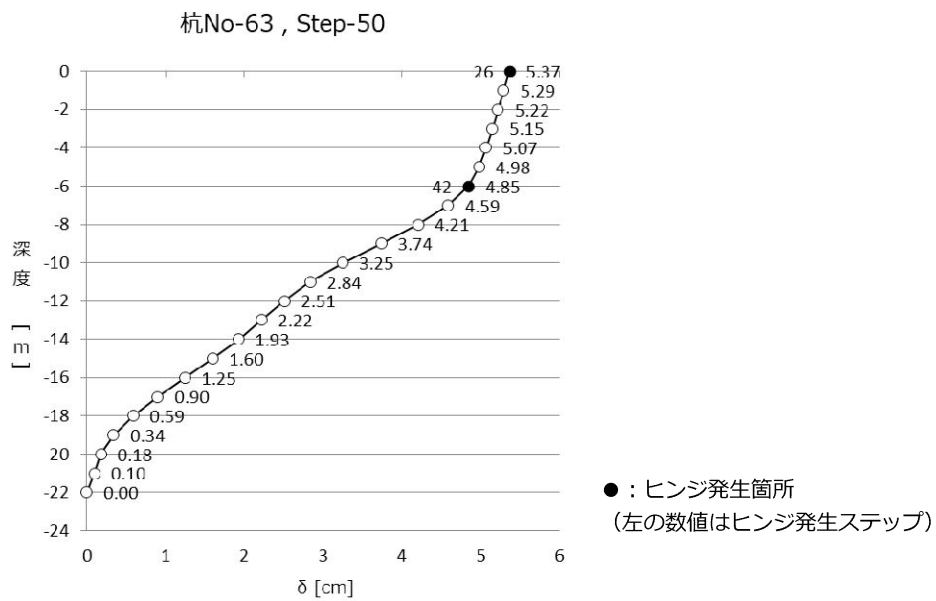


図 5-28 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.63)

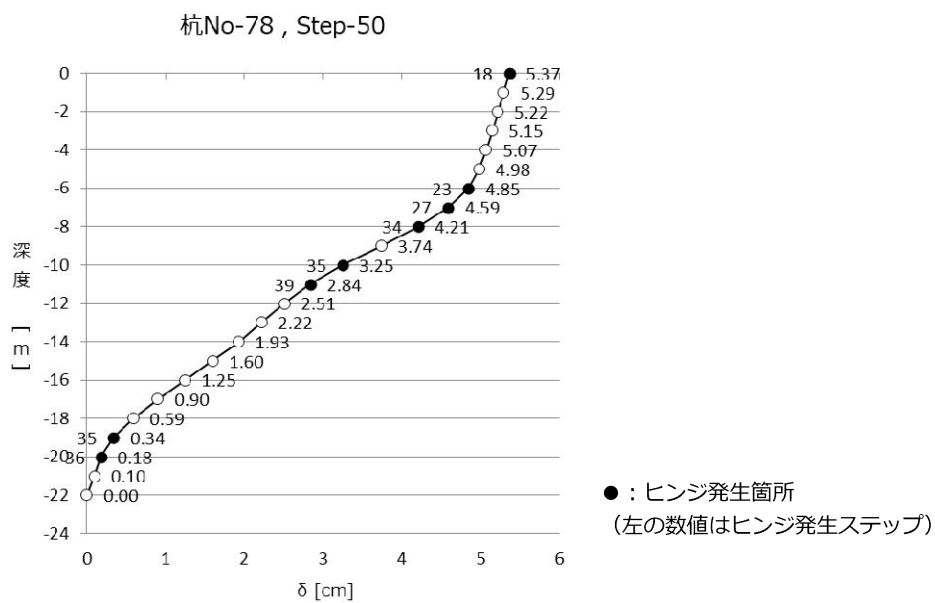


図 5-29 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.78)

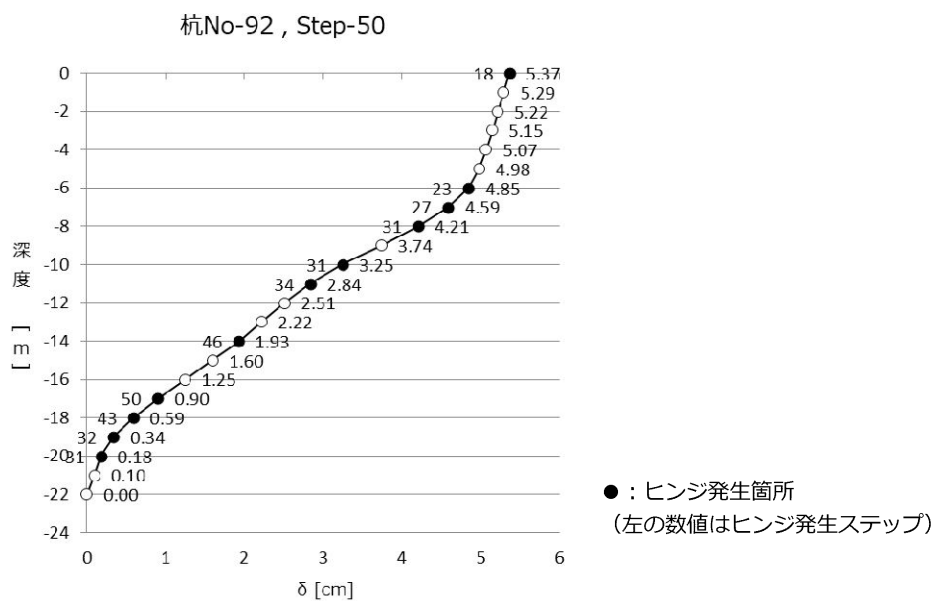


図 5-30 X 方向負加力時 最終ステップのヒンジ図 (杭 No.92)

## § 6 まとめ



## 6. まとめ

本業務の検討内容に対する検証結果を以下と表 6-1 にまとめる。

- (1) 上部構造の応答は、杭の密集効果を考慮したことで地震の揺れを低減する減衰をより高く評価できたため、Y方向では目標値の 1/100 を満足することとなったものの、X方向では満足しないこととなり、本庁舎の耐震安全性は目標値を満たさない結果となった。
- (2) 地中連続壁は、大地震時に生じる地盤変位を作用させた結果、応力が連続壁の耐力を上回る結果となり、地中連続壁による杭及び建物本体の地震時応力低減効果はないという結果となった。
- (3) 杭・建物と地盤の動的相互作用を考慮した検証の結果、杭の耐震性能が不足することから、建物全体として「耐震性能が不足する」と判断した。

表 6-1 行政棟の基礎及び地下連続壁の効果等に関する耐震性能の検証結果

| 項目                |           | 目標値            | 検証結果                                                                                                                 |        |                                                                                                                               |        |
|-------------------|-----------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|                   |           |                | X方向                                                                                                                  |        | Y方向                                                                                                                           |        |
|                   |           |                | 結果                                                                                                                   | 判定     | 結果                                                                                                                            | 判定     |
| 上部構造              | 最大応答層間変形角 | 1/100以下※1      | 1/92（7階）                                                                                                             | NG     | 1/106（6階）                                                                                                                     | OK     |
| 杭                 | 破壊形式      | 鉛直力支持能力を失わない※2 | 杭2点以上曲げ降伏せん断破壊                                                                                                       | NG     | 杭2点以上曲げ降伏せん断破壊                                                                                                                | NG     |
| 地中連続壁による地震時応力低減効果 |           |                | 面外方向地盤変位により地中連続壁の耐力を超過する                                                                                             | 低減効果なし | 面外方向地盤変位により地中連続壁の耐力を超過する                                                                                                      | 低減効果なし |
| 総評                |           |                | 上部構造、杭共に目標値を満足せず、耐震性能が不足する結果となった。<br>また、地中連続壁は、面外方向の地盤変位作用時に発生する応力が、地中連続壁の耐力を超過することから、杭及び建物本体の地震時応力低減効果はないという結果となった。 |        | 上部構造は目標値を満足するが、杭が目標値を満足せず、耐震性能が不足する結果となった。<br>また、地中連続壁は、面外方向の地盤変位作用時に発生する応力が、地中連続壁の耐力を超過することから、杭及び建物本体の地震時応力低減効果はないという結果となった。 |        |
|                   |           |                | 耐震性能が不足する                                                                                                            |        |                                                                                                                               |        |

※1：H29年度耐震安全検証を基に設定

※2：杭の「せん断破壊」、「軸圧縮破壊」、「杭頭及び杭中間部の2点以上での曲げ降伏」が生じない。参考文献7) を基に設定



## 指定性能評価機関への見解聴取について

|                             |                                                                                                                                                 |                                                                                              |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 対象機関                        | 一般財団法人日本建築センター                                                                                                                                  | 日本 ERI 株式会社                                                                                  |
| 所在地                         | 東京都千代田区神田錦町 1-9                                                                                                                                 | 東京都港区赤坂 8-10-24                                                                              |
| 機関指定※ <sup>1</sup><br>指定取得日 | 国土交通大臣指定第 1 号<br>平成 12 年 6 月 12 日                                                                                                               | 国土交通大臣指定第 10 号<br>平成 13 年 7 月 31 日                                                           |
| 見解聴取日                       | 令和 2 年（2020 年）9 月 2 日                                                                                                                           | 令和 2 年（2020 年）9 月 16 日                                                                       |
| 見解聴取部署                      | 一財）日本建築センター評定部構造課                                                                                                                               | 日本 ERI 株式会社評定部                                                                               |
| 提出資料                        | 原設計時評定資料抜粋<br>H29 年度耐震安全性検証結果<br>動的相互作用を考慮した地震応答解析結果及び地中連続壁の検証結果                                                                                |                                                                                              |
| 見解聴取の観点                     | 動的相互作用を考慮した地震応答解析結果及び地中連続壁の検証結果に関して、<br>任意評定※ <sup>2</sup> の取得が見込まれる程度の一定の妥当性を有するか。                                                             |                                                                                              |
| 見解聴取の結果                     | 耐震性能を満たさないケースの任意評定<br>を行った事例はなく、新築時の健全性を<br>保持しているという前提の解析モデルで<br>は、現状の建物を評価していることになら<br>ず、社会的な混乱を招く恐れがあるため、<br>審査することはできず、任意評定の取得<br>は不可能とされた。 | 任意評定書（構造性能評価書）の取<br>得は可能と想定されるという回答であり、<br>今回の解析手法は任意評定の取得が見<br>込まれる程度の一定の妥当性を有すると<br>判断された。 |

※ 1：高さ 60m を超える超高層建築物等の構造安全性に関する評価等の機関指定

※ 2：任意評定とは、通常の構造計算に加えて、特に検討を要する建築物等で、指定性能評価機関から技術評価を取得するもの。

---

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006 年
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2019 年
- 3) 建築行政情報センター：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015 年
- 4) 土方勝一郎・今村晃ほか：群杭係数の評価方法に関する研究、日本建築学会構造系論文集 No.476,pp57-66, 1995
- 5) 岸田英明・中井正一：地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗、日本建築学会論文報告集第 281 号・昭和 54 年 7 月, 1984
- 6) 構造計画研究所：地盤・杭・建物計の地震応答解析プログラム Resp-S マニュアル 第 6 版, 2004
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説, 2017 年