

2022 年度日本建築学会大会（北海道）  
構造部門（基礎構造）  
パネルディスカッション資料

**高支持力杭工法の  
信頼性確保のための課題**  
～何が変わったのか、今後どうあるべきか～

**基調講演「信頼性を考慮した杭の設計」**

2022 年 9 月

日本建築学会 構造委員会

基礎構造運営委員会

## 目次

### プログラム

### 基調講演資料

#### 「信頼性を考慮した杭の設計」

神田政幸（鉄道総合技術研究所）

2

### パネルディスカッション資料

#### 主旨説明

金子 治（広島工業大学）

11

#### 主題解説

##### 1. 既製杭の工法開発の歴史と評価・評定

久世直哉（ベターリビング）

13

##### 2. 実務設計における高支持力杭の沈下特性の評価

鈴木直子（大林組）

23

##### 3. 高支持力杭の性能グレードと今後の開発目標

阪上浩二（山下設計）

31

##### 4. 高支持力杭の施工 ～ データによる施工管理の可視化と記録の保管

細田光美（ジャパンパイル）

45

##### 5. 杭先端の支持層到達判定方法の現状と課題

土屋富男（竹中工務店）

54

##### 6. 高支持力埋込み杭工法の根固め部ソイルセメントの組成と圧縮強度

浅香美治（清水建設）

59

# 高支持力杭の性能グレードと今後の開発目標 Seismic performance and Future development goals of High bearing capacity pile

阪上 浩二<sup>1)</sup>,  
Koji Sakagami

1) (株) 山下設計 構造設計部, チーフエンジニア(東京都中央区日本橋小網町6-1, sakagami@yamashitasekkei.co.jp)  
Yamashita Sekkei inc., Structural Design Office, Chief Engineer

高支持力杭は工法開発が進み、先端支持力係数 $\alpha$ が600を超える工法も開発されている。一方、杭材料は高強度化や杭体の大断面化は進んでいるもののその開発スピードは工法開発に比べて鈍い。耐震設計では建築基礎構造設計指針の改定により、地震時水平力や地盤変位応力の考え方が示され、大地震時(レベル2荷重時)の性能グレード導入等により杭の耐震設計が強化された。このような状況下において既製コンクリート杭は、部材の軸力、曲げ、せん断耐力により部材寸法が決定されることがほとんどである。そこで、本報では常時および地震時の杭体の断面設計から決定される杭の断面寸法と支持力の関係を調査し、今後の工法開発や部材開発の方向性を探る。

## 杭基礎、耐震設計、性能グレード、鉛直支持力 Pile foundations, Seismic design, Performance grade, Vertical bearing capacity

### 1. はじめに

高支持力杭を設計する場合、杭径は地震時応力で、長期支持力は杭体の許容軸力によって決定される場合が多い。つまり、先端支持力係数 $\alpha$ (以下、 $\alpha$ 値と称す)が大きい工法を採用しても、工法が保有する支持力性能は発揮されず、杭体の断面性能で建物の支持能力が決定されることがしばしばある。

そこで本報では、高支持力杭の今後の開発の方向性を探るため、杭体の長期許容軸力と $\alpha$ 値の関係を調査し、どの程度の $\alpha$ 値があれば杭体の長期許容軸力と地盤の長期支持力が同程度となるのかを調査する。さらに最新の耐震設計や性能グレードにより、杭断面の大きさがどの程度差が生じるかを同一建物で比較設計を行い、水平力により決定される杭断面と $\alpha$ 値の関係も調査する。

### 2. 常時荷重と長期許容支持力(軸力)

地盤で決まる先端地盤の長期許容支持力( $R_{AL}$ )および杭体の長期許容軸力( $N_{AL}$ )をそれぞれ式(1)、式(2)に示す。

$$R_{AL} = R_p / 3 \quad \text{———— (1)}$$

$$N_{AL} = (f_c - \sigma_e) A_c \quad \text{———— (2)}$$

ここで、

$R_{AL}$ : 先端地盤の長期許容支持力

$R_p$ : 先端地盤の極限支持力(=  $\alpha \bar{N} A_p$ )

$\bar{N}$ : 杭先端地盤の平均N値

$A_p$ : 杭先端閉塞断面積

$N_{AL}$ : 杭体の長期許容軸力

$f_c$ : コンクリートの長期許容応力度(=  $F_c / 3.5$ )

$\sigma_e$ : 有効プレストレス量

$A_c$ : 換算断面積

杭体の長期許容軸力で支持力が決まる場合は  $R_{AL} = N_{AL}$  なので、式(1)、式(2)を $\alpha$ 値で整理すると式(3)となる。

$$\alpha = \frac{(f_c - \sigma_e) A_c}{\bar{N} A_p} \quad \text{———— (3)}$$

中規模以上の建築物では、既製コンクリート杭の杭径は600mm以上となる場合が多いため、杭径600~1000mm、杭の厚さが標準的な厚さ杭(以下、標準厚と称す)と厚みを増した杭(以下、特厚と称す)、コンクリートの設計基準強度 $F_c$ が105N/mm<sup>2</sup>と123N/mm<sup>2</sup>の杭体の組み合わせで、杭体の長期許容軸力から決まる $\alpha$ 値を算出する。

標準厚の杭の寸法および断面性能を表1に、特厚のそれを表2に示す。

標準厚の場合の断面諸元は、杭メーカー間の違いはほとんどないが、特厚の場合は杭メーカー間の違いが大きいため、本報では筆者の独断で選定した。

表1 杭の断面性能(その1: 標準厚)

杭種	軸径 (mm)	先端径 (mm)	厚さ (mm)	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$A_p$ (m <sup>2</sup> )
A	600	700	90	105	4	147300	0.3848
	700	800	100	105	4	192600	0.5027
	800	900	110	105	4	243500	0.6362
	900	1000	120	105	4	299800	0.7854
	1000	1100	130	105	4	362500	0.9503
B	600	700	90	105	8	150500	0.3848
	700	800	100	105	8	196700	0.5027
	800	900	110	105	8	248500	0.6362
	900	1000	120	105	8	306900	0.7854
	1000	1100	130	105	8	371300	0.9503
C	600	700	90	105	10	152200	0.3848
	700	800	100	105	10	198900	0.5027
	800	900	110	105	10	252400	0.6362
	900	1000	120	105	10	310100	0.7854
	1000	1100	130	105	10	375300	0.9503

表 2 杭の断面性能 (その 2 : 特厚)

杭種	軸径 (mm)	先端径 (mm)	厚さ (mm)	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$A_p$ (m <sup>2</sup> )
A	600	700	110	105	4	172500	0.3848
	700	800	120	105	4	222700	0.5027
	800	900	130	105	4	278700	0.6362
	900	1000	140	105	4	340000	0.7854
	1000	1100	150	105	4	407800	0.9503
B	600	700	110	105	8	175600	0.3848
	700	800	120	105	8	226800	0.5027
	800	900	130	105	8	283700	0.6362
	900	1000	140	105	8	347100	0.7854
	1000	1100	150	105	8	416600	0.9503
C	600	700	110	105	10	177300	0.3848
	700	800	120	105	10	229100	0.5027
	800	900	130	105	10	287600	0.6362
	900	1000	140	105	10	350300	0.7854
	1000	1100	150	105	10	420600	0.9503

また、高支持力工法の先端径は軸径よりも大きいため、本検討では、軸径+100mmを杭先端径として計算を行う。一部の工法では、先端径杭ではなく節杭を使用する工法もあるが、ここでは先端径杭でまとめる。

杭先端地盤の平均N値 ( $\bar{N}$ ) を 60、 $F_c=105\text{N/mm}^2$ 、標準厚の杭で式 (3) を用いて求まる  $\alpha$  値を表 3 に示す。

表 3 式 (3) の計算結果 (その 1 : 標準厚)

杭種	軸径 (mm)	先端径 (mm)	厚さ (mm)	$N_{AL}$ (kN)	$\alpha$	$\alpha \times N$ (N=60)	軸力比	
							対 $N_U$	対 $F_c$
A	600	700	90	3830	497.7	29862	0.26	0.29
	700	800	100	5008	498.1	29886	0.26	0.29
	800	900	110	6331	497.6	29856	0.26	0.29
	900	1000	120	7795	496.2	29772	0.26	0.29
	1000	1100	130	9425	495.9	29754	0.26	0.29
B	600	700	90	3311	430.2	25812	0.23	0.29
	700	800	100	4327	430.4	25824	0.23	0.29
	800	900	110	5467	429.7	25782	0.23	0.29
	900	1000	120	6752	429.8	25788	0.23	0.29
	1000	1100	130	8169	429.8	25788	0.23	0.29
C	600	700	90	3044	395.5	23730	0.21	0.29
	700	800	100	3978	395.7	23742	0.21	0.29
	800	900	110	5048	396.7	23802	0.21	0.29
	900	1000	120	6202	394.8	23688	0.21	0.29
	1000	1100	130	7506	394.9	23694	0.21	0.29

杭種がA種の場合、 $\alpha$  値は 495~498 となる。B種では 429~430、C種では 394~396 となる。標準厚の杭では支持層のN値が 60 以上の場合、 $\alpha$  値が 400 程度の工法で杭体の支持性能に見合った先端支持力を確保することができる。この値は  $\bar{N}=60$  で整理した結果なので、 $\alpha$  値に 60 を乗じ  $\alpha \bar{N} (= \alpha \times 60)$  を算出すると、A種で 29754~29886、B種で 25782~25824、C種で 23688~23742 となる。この  $\alpha \bar{N}$  を満足するように  $\alpha$  値を選択するとおおむね  $R_{AL}=N_{AL}$  となり、建設地の支持地盤に見合う無駄のない工法選定が可能となる。また、表中の軸力比の対  $N_U$ 、対  $F_c$  は式 (4)、式 (5) で算出した。

$$\text{軸力比 対 } N_U = N_{AL}/N_U \quad \text{--- (4)}$$

$$\text{対 } F_c = (N_{AL}/A_c + \sigma_c) / F_c \quad \text{--- (5)}$$

ここで、 $N_U = (F_c - \sigma_c) A_c$

いずれの杭も対  $F_c$  に対する軸力比は、コンクリート強度の 1/3 程度の値となっている。これは地震時変動軸力の小さい中柱下の杭においても長期、地震時ともに軸力

比の高い状態となっているおり、杭体の変形性能が乏しい状況下に置かれていることに注意を要する。

同様に特厚、 $F_c=123\text{N/mm}^2$  についても整理すると以下となる。

表 4 式 (3) の計算結果 (その 2 : 特厚)

杭種	軸径 (mm)	先端径 (mm)	厚さ (mm)	$N_{AL}$ (kN)	$\alpha$	$\alpha \times N$ (N=60)	軸力比	
							対 $N_U$	対 $F_c$
A	600	700	110	4485	582.8	34968	0.26	0.29
	700	800	120	5790	575.9	34554	0.26	0.29
	800	900	130	7246	569.5	34170	0.26	0.29
	900	1000	140	8840	562.8	33768	0.26	0.29
	1000	1100	150	10603	557.9	33474	0.26	0.29
B	600	700	110	3863	501.9	30114	0.23	0.29
	700	800	120	4990	496.3	29778	0.23	0.29
	800	900	130	6241	490.5	29430	0.23	0.29
	900	1000	140	7636	486.1	29166	0.23	0.29
	1000	1100	150	9165	482.2	28932	0.23	0.29
C	600	700	110	3546	460.8	27648	0.21	0.29
	700	800	120	4582	455.7	27342	0.21	0.29
	800	900	130	5752	452.1	27126	0.21	0.29
	900	1000	140	7006	446.0	26760	0.21	0.29
	1000	1100	150	8412	442.6	26556	0.21	0.29

表 5 式 (3) の計算結果 (その 3 :  $F_c=123\text{N/mm}^2$ )

杭種	軸径 (mm)	先端径 (mm)	厚さ (mm)	$N_{AL}$ (kN)	$\alpha$	$\alpha \times N$ (N=60)	軸力比	
							対 $N_U$	対 $F_c$
A	600	700	110	5366	697.2	41832	0.26	0.29
	700	800	120	6929	689.2	41352	0.26	0.29
	800	900	130	8670	681.4	40884	0.26	0.29
	900	1000	140	10579	673.5	40410	0.26	0.29
	1000	1100	150	12684	667.4	40044	0.26	0.29
B	600	700	110	4755	617.9	37074	0.24	0.29
	700	800	120	6142	610.9	36654	0.24	0.29
	800	900	130	7684	603.9	36234	0.24	0.29
	900	1000	140	9400	598.4	35904	0.24	0.29
	1000	1100	150	11281	593.5	35610	0.24	0.29
C	600	700	110	4448	578.0	34680	0.22	0.29
	700	800	120	5743	571.2	34272	0.22	0.29
	800	900	130	7211	566.7	34002	0.22	0.29
	900	1000	140	8782	559.1	33546	0.22	0.29
	1000	1100	150	10545	554.8	33288	0.22	0.29

$\bar{N}=60$ 、杭種C種の場合、標準厚で  $\alpha \approx 395$ 、特厚で  $\alpha \approx 450$ 、 $F_c=123\text{N/mm}^2$  で  $\alpha \approx 560$  であり、高支持力杭には軸耐力の大きい杭体が不可欠である。

なお、本検討では杭周面地盤の摩擦力の影響を無視した結果であるが、計画敷地の杭周面摩擦力の影響を考慮して同様の検討を行えば、建設地盤特有の結果を求めることができる。

### 3. 既製コンクリート杭の耐震設計

2019年に建築基礎構造設計指針 (以下、基礎指針と称す) が改定され、耐震設計の強化と性能グレードが導入された。一方、法的な改定はまだ行われていないため、基礎の耐震設計は中地震動の慣性力に対する安全性の確認 (許容応力設計) に留まっている建物が多い。今回の基礎指針の改定は、既製コンクリート杭への影響がかなり大きく、許容応力度設計された杭に対して大幅な部材断面増となっている。

そこで、本報では 3. 1. 1 に示す中層の建物に対し、2種類の地盤 (3. 1. 2 参照) で許容応力度設計から性能グレードAの耐震設計を行い、杭断面の違いを調査するとともに今後の既製コンクリート杭の開発の方向性を探る。

### 3. 1 検討条件

#### 3. 1. 1 建物概要

検討用の建物は、地上5階の学校で建物概要を表6に、平面図を図1に、軸組図を図2に示す。

表6 建物概要

用途	学校
建築面積	480 m <sup>2</sup>
延床面積	約2,300 m <sup>2</sup>
階数	地上5階、地下無
高さ	G.L.+20.6m
構造種別	鉄筋コンクリート造
架構形式	耐震壁付きラーメン構造

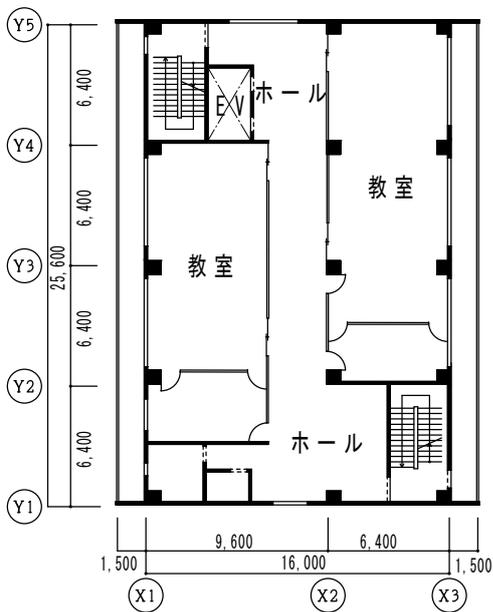


図1 基準階平面図

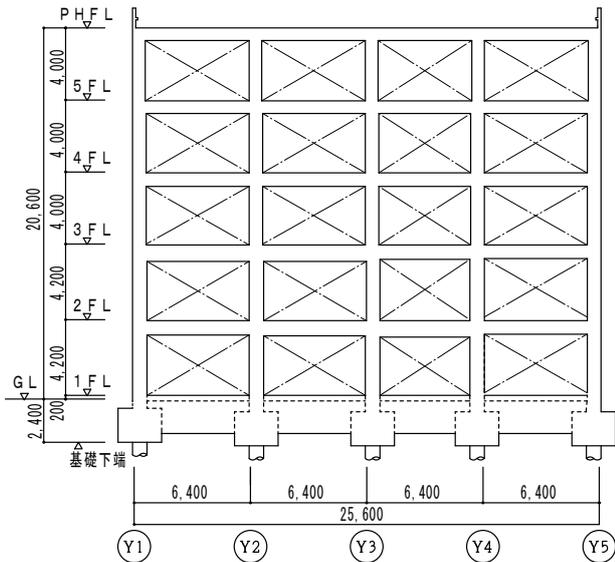


図2 X2通り軸組図

#### 3. 1. 2 地盤概要

検討に使用する2種類の地盤（地盤AおよびB）の地盤定数および柱状図を以下に示す。

##### (1) 地盤条件A

表7 地盤定数（その1：地盤A）

土質	深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)
埋土	0~2	2	18.0	100
シルト	2~10	8	14.0	270
砂礫	10~	—	18.0	450

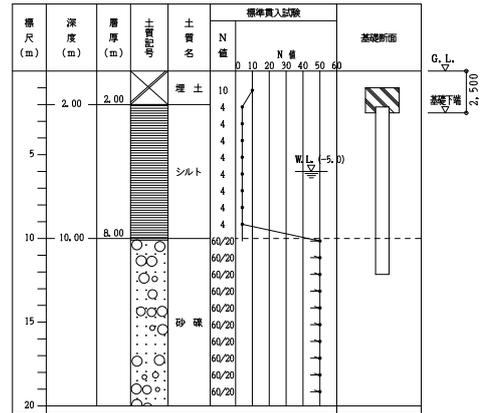


図3 柱状図（その1：地盤A）

##### (2) 地盤条件B

表8 地盤定数（その2：地盤B）

土質	深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)
埋土	0~2	2	18.0	100
シルト	2~20	18	14.0	270
砂礫	20~	—	18.0	450

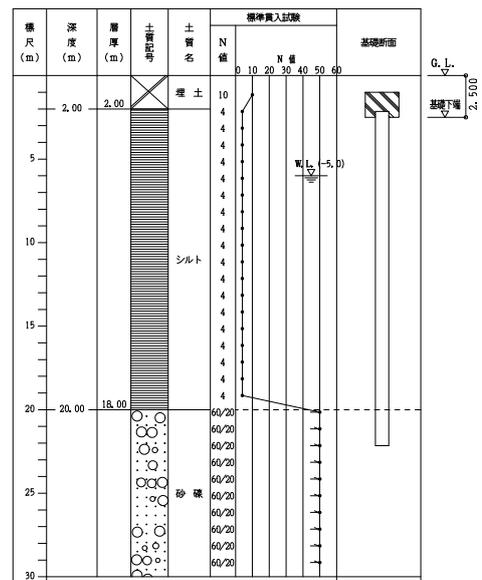


図4 柱状図（その2：地盤B）

### 3. 1. 3 設計荷重

設計用軸力、設計用地震時水平力、地盤変位を以下に示す。

#### (1) 設計軸力

	X1			X2			X3		
	13			14			15		
Y5	長期	3131		長期	3318		長期	2439	
	L1 X	2000	4262	L1 X	2198	4438	L1 X	4690	189
	L1 Y	4790	1472	L1 Y	4801	1835	L1 Y	4065	814
	L2 X	1544	4774	L2 X	1695	4806	L2 X	5642	-692
	L2 Y	5902	382	L2 Y	6251	405	L2 Y	5234	-244
Y4	長期	4074		長期	4431		長期	2976	
	L1 X	2887	5260	L1 X	3752	5110	L1 X	4842	1109
	L1 Y	3928	4219	L1 Y	4280	4582	L1 Y	2867	3085
	L2 X	2376	5754	L2 X	3108	5727	L2 X	6002	2
	L2 Y	3644	4327	L2 Y	3977	4759	L2 Y	2680	3066
Y3	長期	3680		長期	4258		長期	2756	
	L1 X	2487	4873	L1 X	3612	4905	L1 X	4595	916
	L1 Y	3630	3730	L1 Y	4212	4304	L1 Y	2722	2789
	L2 X	1973	5369	L2 X	2966	5526	L2 X	5763	-204
	L2 Y	3700	3843	L2 Y	4275	4443	L2 Y	2773	2900
Y2	長期	3767		長期	4399		長期	3009	
	L1 X	2576	4959	L1 X	3718	5081	L1 X	4884	1134
	L1 Y	3996	3539	L1 Y	4605	4194	L1 Y	3162	2856
	L2 X	2067	5459	L2 X	3073	5693	L2 X	6043	22
	L2 Y	4156	3274	L2 Y	4906	3887	L2 Y	3239	2666
Y1	長期	3131		長期	3555		長期	2669	
	L1 X	2001	4261	L1 X	2425	4685	L1 X	4927	411
	L1 Y	1440	4822	L1 Y	2064	5047	L1 Y	1033	4305
	L2 X	1559	4759	L2 X	1908	5038	L2 X	5880	-439
	L2 Y	365	5947	L2 Y	600	6498	L2 Y	-104	5445

注) L1 : レベル1地震時軸力、L2 : レベル2地震時軸力

図 5 設計用軸力

#### (2) 設計用地震時水平力

表 9 設計用地震時水平力

	レベル1 荷重時	レベル2 荷重時	
		X方向	Y方向
上部構造	7559	13706	17322
基礎構造	1005	4018	4018
合計	8564	17724	21340

#### (3) 地盤変位

##### 1) 地盤 A

表 10 地盤変位 (その1 : 地盤A)

深さ (m)	土質	Vs (m/s)	地盤変位 (mm)	
			レベル1	レベル2
0	埋土	100	1.8	14.2
1	埋土	100	1.7	12.8
2	シルト	270	1.3	8.6
3	シルト	270	1.2	8.0
4	シルト	270	1.1	7.3
5	シルト	270	0.9	6.4
6	シルト	270	0.8	5.3
7	シルト	270	0.6	4.2
8	シルト	270	0.4	2.9
9	シルト	270	0.2	1.5
10	砂礫	450	0.0	0.0

##### 2) 地盤条件 B

表 11 地盤変位 (その2 : 地盤B)

深さ (m)	土質	Vs (m/s)	地盤変位 (mm)	
			レベル1	レベル2
0	埋土	100	5.7	41.3
1	埋土	100	5.6	40.0
2	シルト	270	5.2	36.2
3	シルト	270	5.1	35.5
4	シルト	270	5.0	34.7
5	シルト	270	4.8	33.7
6	シルト	270	4.7	32.5
7	シルト	270	4.5	31.1
8	シルト	270	4.2	29.6
9	シルト	270	4.0	27.8
10	シルト	270	3.7	25.9
11	シルト	270	3.4	23.9
12	シルト	270	3.1	21.7
13	シルト	270	2.8	19.4
14	シルト	270	2.4	16.9
15	シルト	270	2.0	14.4
16	シルト	270	1.7	11.7
17	シルト	270	1.3	8.9
18	シルト	270	0.8	6.0
19	シルト	270	0.4	3.0
20	砂礫	450	0.0	0.0

#### 3. 1. 4 設計クライテリアと性能グレード

各検討ケースの荷重の組み合わせ、設計のクライテリアおよび性能グレードを以下に示す。

##### (1) 荷重の組み合わせ

表 12 荷重の組み合わせ

ケース	レベル1 荷重時		レベル2 荷重時	
	水平力	地盤変位	水平力	地盤変位
①	○	—	—	—
②	○	—	○	—
③	○	○	○	○
④	○	○	○	○
⑤	○	○	○	○

注) ○ : 考慮、— : 無視

水平力と地盤変位応力の組み合わせは  $T_b < T_g$  のため、同位相、低減係数 1.0 で組み合わせる。

##### (2) 設計クライテリア

表 13 設計クライテリア

ケース	レベル1 荷重時	レベル2 荷重時
①	短期許容応力以内*1)	—
②	短期許容応力以内*1)	終局強度以内*1)
③	短期許容応力以内*1)	終局強度以内*1)
④	短期許容応力以内*1) *2)	信頼強度*2) および 終局強度以内*1)
⑤	短期許容応力以内*3)	終局強度以内*3)

文献 3) によると、既製コンクリート杭は塑性変形能力に乏しく、降伏後、急激な耐力低下が生じ脆性的な破壊が発生する。この現象はSC杭でも同様である。このため、大地震時においても曲げ破壊を生じさせない設計が求められる。この問題を解決するために本間ら\*2) は、SC杭の中空部に鋼管を挿入し、曲げ降伏後の変形能力を確保した高靱性型のSC杭（以下、WSC杭と称す）を開発した。

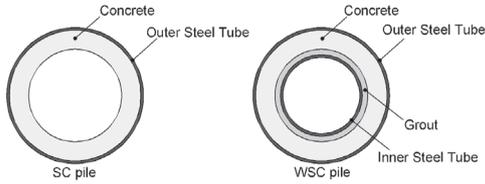


図 6 SC杭とWSC杭の断面概要

このWSC杭は一定の軸力の範囲において、曲げ降伏後も耐力を保持し続けることが可能で、部材塑性率6以下の範囲で、最大曲げ耐力の80%の曲げ耐力（信頼強度）を保持することができる。図8に示す試験体で実施された軸力曲げ試験の結果（変形角と曲げモーメントの関係、変形角と軸力の関係）を図9、図10に示す。SC杭は最大降伏耐力に達した後、急激に耐力が低下しおおむね鋼管の曲げ耐力あたりで安定する。一方、WSC杭は最大耐力に達したあとも大きな耐力低下を生じることなく曲げ応力を保持しており、高い靱性を保有していることがわかる。検討ケース④では、このWSC杭を上杭に採用し、杭頭部の曲げ降伏を許容する設計を行う。

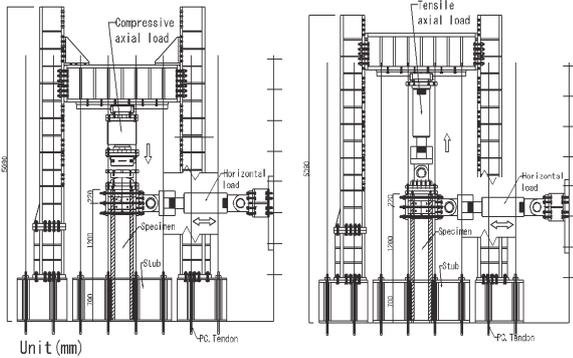


図 7 軸力曲げ試験の加力装置\*2

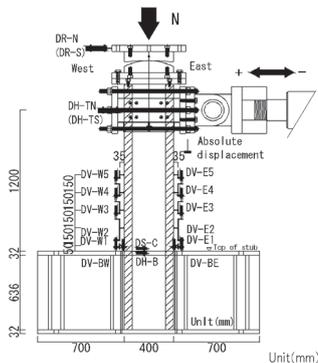


図 8 軸力曲げ試験の試験体\*2

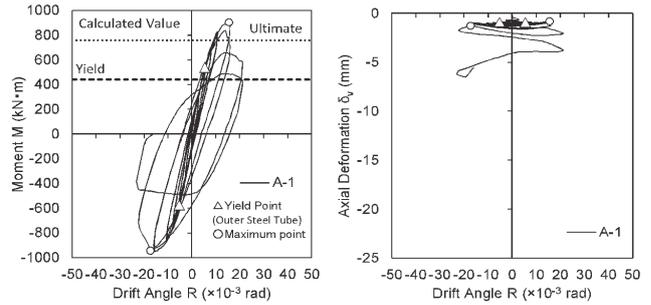


図 9 軸力曲げ試験結果（その1：SC杭）\*2

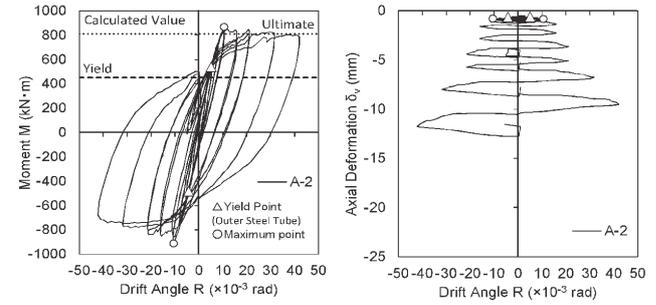


図 10 軸力曲げ試験結果（その2：WSC杭）\*2

### (3) 性能グレード

各ケースの性能グレードは次のように考える。

ケース⑤は基礎指針の荷重および文献3)の耐力評価に沿った設計をしており性能グレードAに該当する。

ケース④では、荷重の取り扱いは基礎指針に準拠しており、部材耐力は独自の実験結果より定めている。実験で得られた荷重変形曲線から、降伏後の耐力低下も考慮して部材耐力が定められている。設計では杭頭に降伏を許容しているが、著しい耐力低下は発生せず軸力保持能力は確保できると判断できるので性能グレードAに該当する。

ケース③では、荷重の取り扱いは基礎指針に準拠しているが、部材耐力は文献3)の低減係数を採用しない耐力で設計を行っている。杭体は終局耐力を超えない設計となっているため、性能グレードAの性能は満足しないが、耐力低下は生じない設計と判断できるため建物の鉛直支持能力は確保できていると考える。よって、本報では筆者の独断で性能グレードCに該当するとした。なお、性能グレードCの考え方は、十分は議論がなされていないので扱いにはくれぐれも注意を要する。

ケース①、ケース②は地震時地盤変位を考慮しないので、性能グレードの設定の対象外とする。

表 14 各ケースの性能グレード

ケース	性能グレード	塑性ヒンジの発生
①	—	—
②	—	—
③	グレードC	許容しない
④	グレードA	許容する
⑤	グレードA	許容しない

### 3. 2 検討結果

3. 1の検討条件で設計した結果を以下に示す。

#### 3. 2. 1 地盤A

##### (1) ケース①

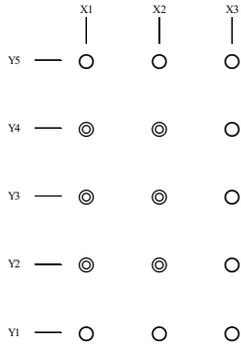


図 11 杭伏図①

表 15 杭リスト①

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=14 (490材)	90	105	5	10	9
		下杭	ST-B	120	105	5		
◎	P2	上杭	SC t=12 (490材)	100	105	5	10	6
		下杭	ST-A	100	105	5		

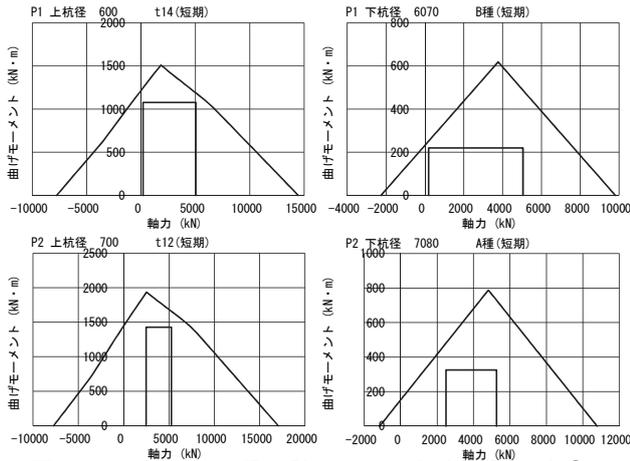


図 12 レベル1荷重時許容MN曲線と設計応力①

##### (2) ケース②

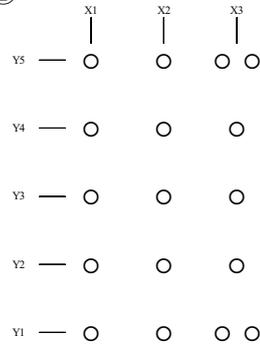


図 13 杭伏図②

表 16 杭リスト②

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=19 (490材)	110	105	5	10	17
		下杭	ST-C	160	105	5		

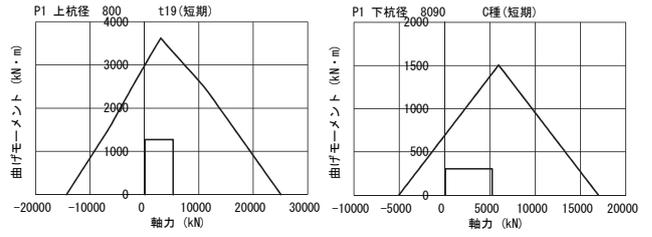
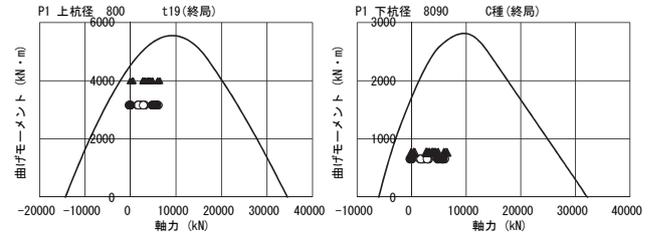


図 14 レベル1荷重時許容MN曲線と設計応力②



凡例 ○: X+ ●: X- △: Y+ ▲: Y-

図 15 レベル2荷重時許容MN曲線と設計応力②

##### (3) ケース③

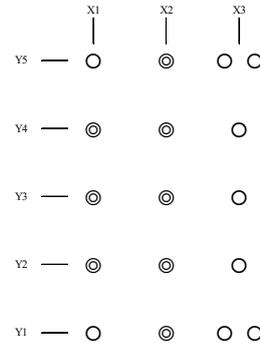


図 16 杭伏図③

表 17 杭リスト③

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=22 (490材)	110	105	5	10	9
		下杭	ST-B	160	105	5		
◎	P2	上杭	SC t=22 (490材)	120	105	5	10	8
		下杭	ST-B	160	105	5		

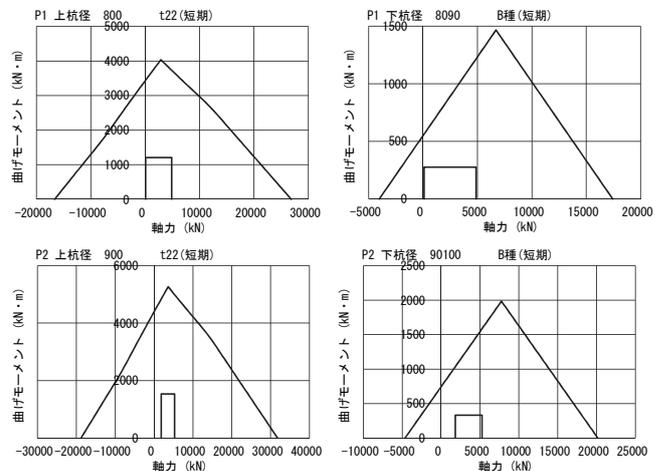


図 17 レベル1荷重時許容MN曲線と設計応力③

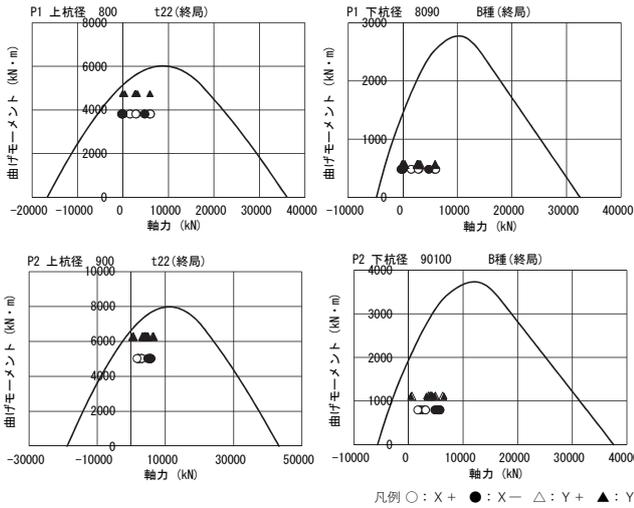


図 18 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力③

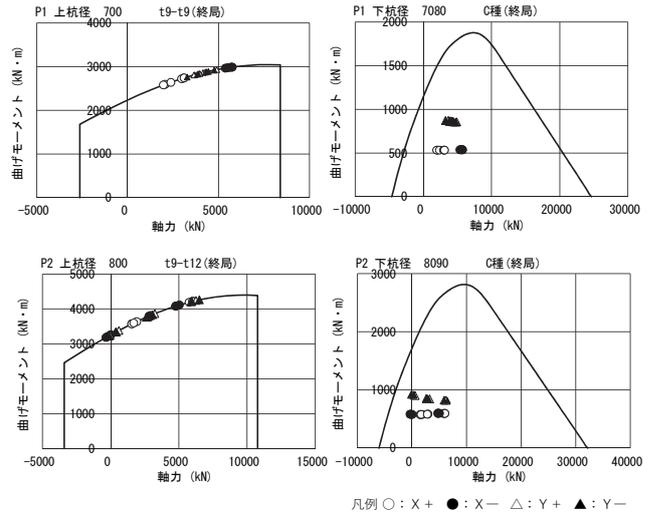


図 21 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力④

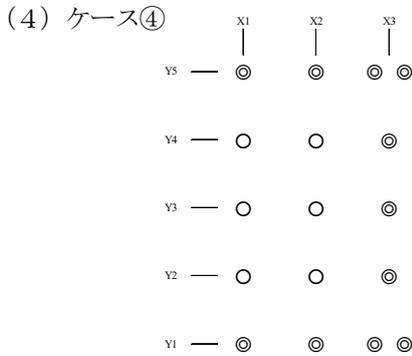


図 19 杭伏図④

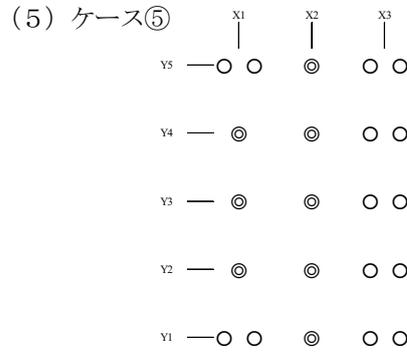


図 22 杭伏図⑤

表 18 杭リスト④

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	WSC 外 t=9(490材) 内 t=9(490材)	100	105	5	10	6
		下杭	ST-C	140	105	5		
◎	P2	上杭	WSC 外 t=9(490材) 内 t=12(490材)	110	105	5	10	11
		下杭	ST-C	160	105	5		

表 19 杭リスト⑤

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=16(490材)	130	105	6	10	14
		下杭	ST-C	160	105	4		
◎	P2	上杭	SC t=16(490材)	140	105	6	10	8
		下杭	ST-C	160	105	4		

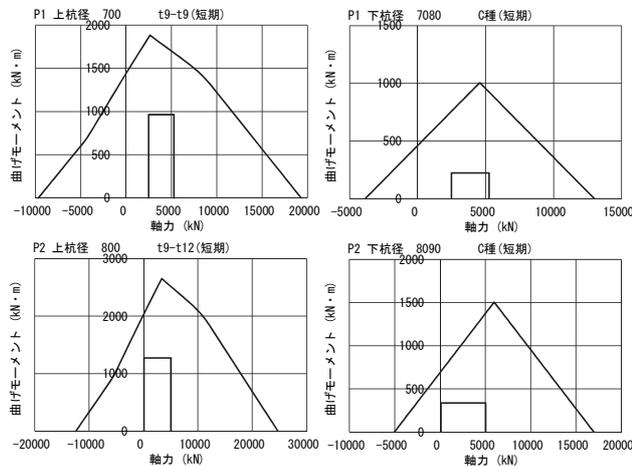


図 20 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力④

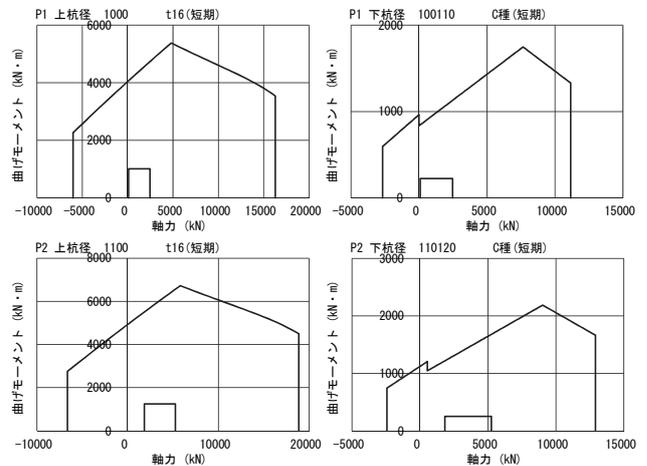


図 23 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑤

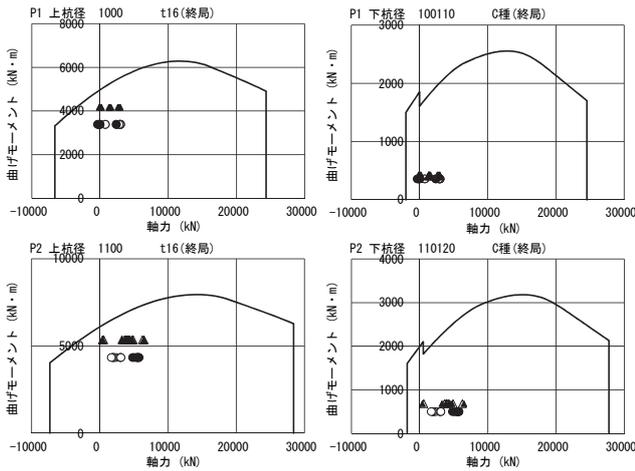


図 24 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力⑤

3. 2. 2 地盤B

(1) ケース①

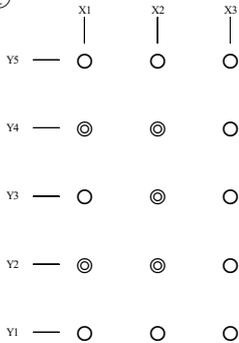


図 25 杭伏図⑥

表 20 杭リスト⑥

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=14 (490材)	90	105	8	20	10
		下杭	ST-B	120	105	12		
◎	P2	上杭	SC t=12 (490材)	100	105	8	20	5
		下杭	ST-A	100	105	12		

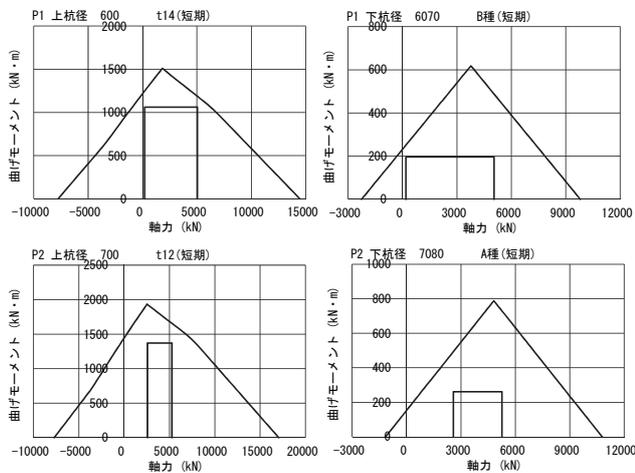


図 26 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑥

(2) ケース②

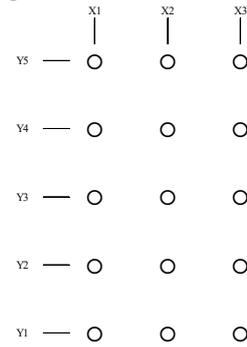


図 27 杭伏図⑦

表 21 杭リスト⑦

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=22 (490材)	110	105	8	20	15
		下杭	ST-B	110	105	12		

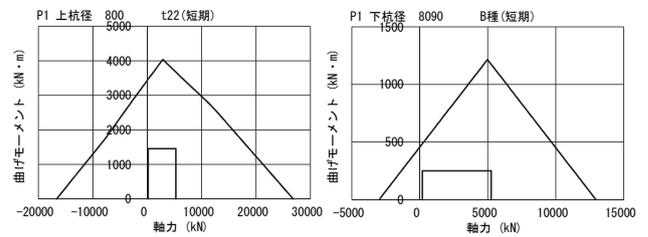


図 28 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑦

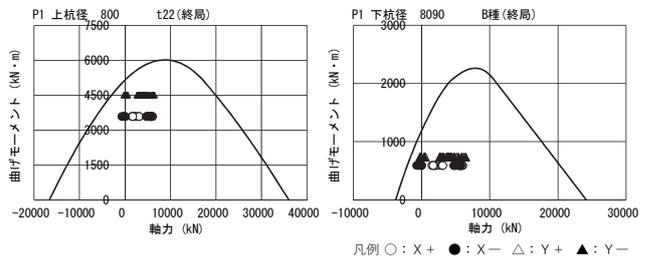


図 29 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力⑦

(3) ケース③

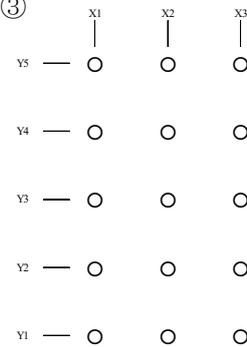


図 30 杭伏図⑧

表 22 杭リスト⑧

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ ( $N/mm^2$ )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=22 (490材)	120	105	8	20	15
		下杭	ST-B	120	105	12		

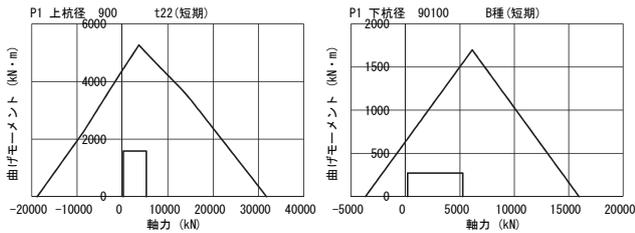


図 31 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑧

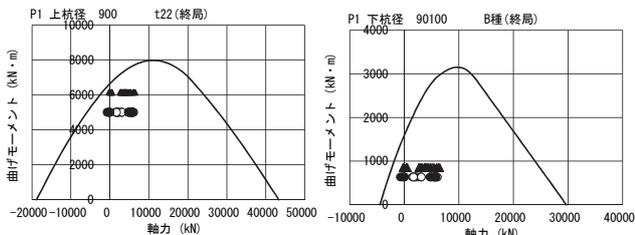


図 32 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力⑧

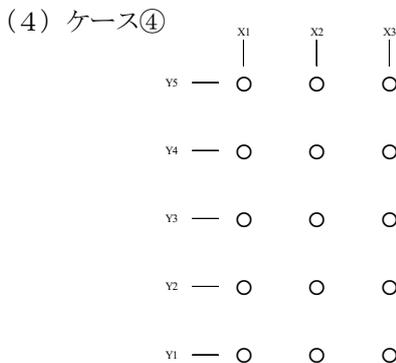


図 33 杭伏図⑨

表 23 杭リスト⑨

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	WSC 外t=12(490材) 内t=12(490材)	110	105	8	20	15
		下杭	ST-C	110	105	12		

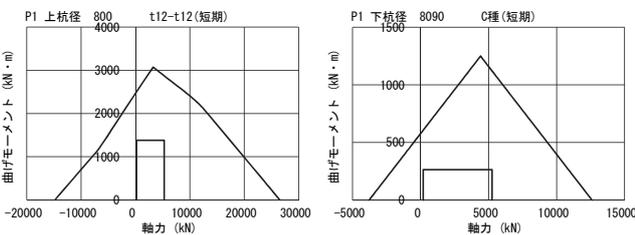


図 34 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑨

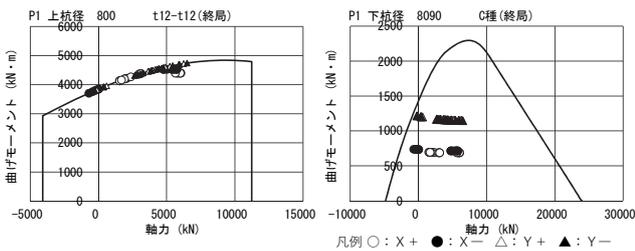


図 35 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力⑨

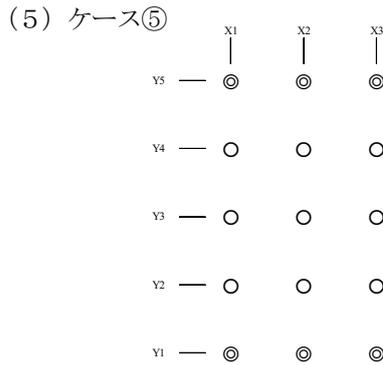


図 36 杭伏図⑩

表 24 杭リスト⑩

記号	符号	杭径 (mm)	杭の種類	厚さ (mm)	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	長さ (m)	全長 (m)	本数 (本)
○	P1	上杭	SC t=22(490材)	130	105	9	12	9
		下杭	ST-B	130	105	11		
◎	P2	上杭	SC t=22(490材)	140	105	9	12	6
		下杭	ST-B	140	105	11		

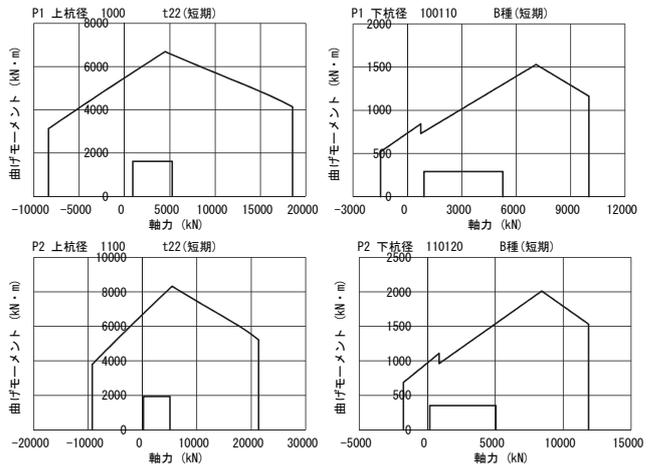


図 37 レベル1 荷重時許容MN曲線と設計応力⑩

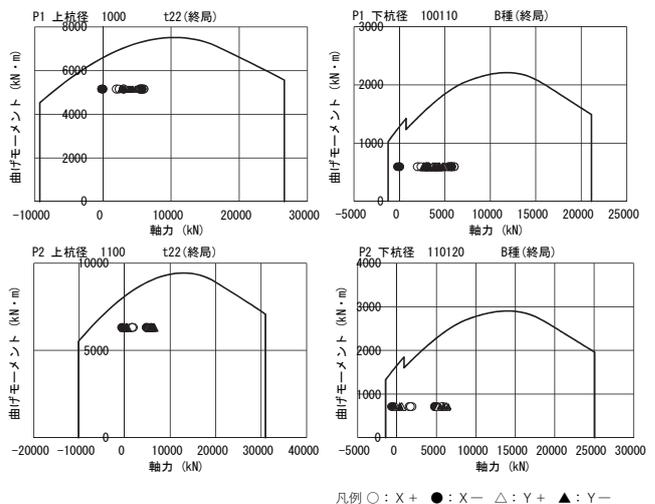


図 38 レベル2 荷重時許容MN曲線と設計応力⑩

### 3. 3 先端支持力と耐震設計の関係

杭の極限支持力 ( $R_u$ ) を式 (6) に示す。各支点のレベル 2 荷重時支点反力を  $N_{L2}$  とし、 $R_u=N_{L2}$  の関係より、 $N_{L2}$  を支持するために必要な  $\alpha$  値を式 (7) で求める。

$$R_u = \alpha \bar{N}A_p + (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \varphi \quad \text{—— (6)}$$

ここで、

$R_u$  : 杭の極限支持力

$\alpha$  : 先端支持力係数

$\beta$  : 砂質地盤、礫質地盤

における杭周面摩擦係数

$\gamma$  : 粘土質地盤

における杭周面摩擦係数

$\bar{N}$  : 杭先端地盤の平均N値

$A_p$  : 杭先端閉塞断面積

$\bar{N}_s$  : 摩擦力を考慮する砂地盤の平均N値

$\bar{q}_u$  : 摩擦力を考慮する粘土質地盤の平均N値

$L_s$  : 摩擦力を考慮する砂地盤の杭の長さ

$q_u$  : 摩擦力を考慮する粘土質地盤の杭の長さ

$\varphi$  : 杭周長

$N_{L2} = R_u$  より、

$$N_{L2} = \alpha \bar{N}A_p + (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \varphi$$

$$\alpha = \frac{\{N_{L2} - (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \varphi\}}{\bar{N}A_p} \quad \text{—— (7)}$$

$\beta=10/3$ 、 $\gamma=0.5$  で杭周面摩擦力を算出し各ケース、各荷重における支持に必要な  $\alpha$  値を図 39、図 40 にまとめる。なお、同図では常時荷重およびレベル 1 荷重時の  $\alpha$  値を示しているが、常時の場合は式 (8)、式 (9) で算出した。また、地震時の  $\alpha$  値は、各支点のXY方向、正負加力の最大支点反力で算出している。

$$\alpha = \frac{\{3N_L - (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \varphi\}}{\bar{N}A_p} \quad \text{—— (8)}$$

$$\alpha = \frac{\left\{\frac{3}{2}N_{L1} - (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \varphi\right\}}{\bar{N}A_p} \quad \text{—— (9)}$$

ここで、

$N_L$  : 常時荷重時支点反力

$N_{L1}$  : レベル 1 荷重時支点反力

#### 3. 3. 1 地盤Aの $\alpha$ 値

耐震設計による部材断面への影響は、地盤条件にかかわらずレベル 1 荷重時の慣性力しか考慮しないケース①が最も小さく、次にケース②、性能グレードCのケース③、性能グレードAのケース④で、最も影響を受けるのがケース⑤と考えられる。

$\alpha$  値は全てのケース、すべての支点で常時荷重時が最も大きく、レベル 2 荷重時が最も小さくなっている。ケ

ース別では、ケース①が最も大きく常時荷重時の  $\alpha$  値が 296~441、次にケース④で同  $\alpha$  値が 81~423、ケース② (同  $\alpha$  値 81~333)、ケース③ (同  $\alpha$  値 81~269) と小さくなり、最も小さいのがケース⑤で同  $\alpha$  値が 53~186 である。特にケース④の変動軸力が小さい中柱下の杭、側中柱下の杭では、ケース①と同じ程度の  $\alpha$  値となっており、非常に効率のいい断面設定ができていると考えられる。一方、ケース⑤では、 $\alpha$  値が 200 を下回り、変動軸力の大きい隅柱下の杭および側柱下の杭では  $\alpha$  値が 100 を下回っており、地震時の断面設計の影響が大きいことを示している。

#### 3. 3. 2 地盤Bの $\alpha$ 値

$\alpha$  値は地盤Aと同様に、全てのケース、すべての支点で常時荷重時が最も大きく、レベル 2 荷重時が最も小さくなっている。ケース別では、ケース①が最も大きく常時荷重時の  $\alpha$  値が 275~437、次にケース②とケース④がほぼ同じで  $\alpha$  値が 160~316 である。次にケース③ (同  $\alpha$  値 127~254) で、最も小さいのがケース⑤で同  $\alpha$  値が 85~208 である。

地盤Bでは、ケース②とケース④が同程度の値を示している。ケース②は性能グレードの設定なし、ケース④は性能グレードAなので、地盤A同様にケース④は効率のいい断面設定ができていると考えられる。ケース⑤に関しては、地盤Aと同様の傾向を示している。

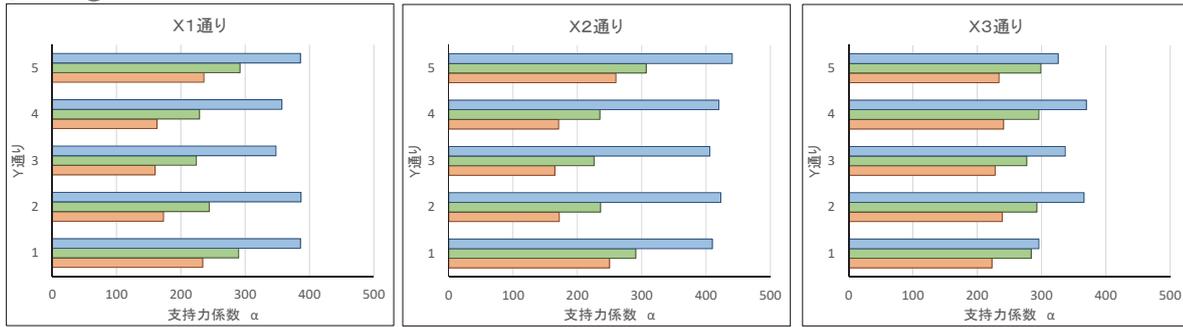
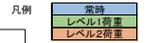
常時荷重時の  $\alpha$  値を表 25 にまとめる。本検討では同じ支点反力を使用しているため、地盤A、地盤Bで同じ杭径であれば、杭周面摩擦力が大きい地盤Bの方が杭先端の  $\alpha$  値が小さくなるが、表 25 ではほぼ同じ  $\alpha$  値となっている。これは、地盤Bより地盤Aの方が杭径が大きくなっている (正しくは杭本数が多くなっている) ことを示している。

表 25 各ケースの常時荷重時の  $\alpha$  値

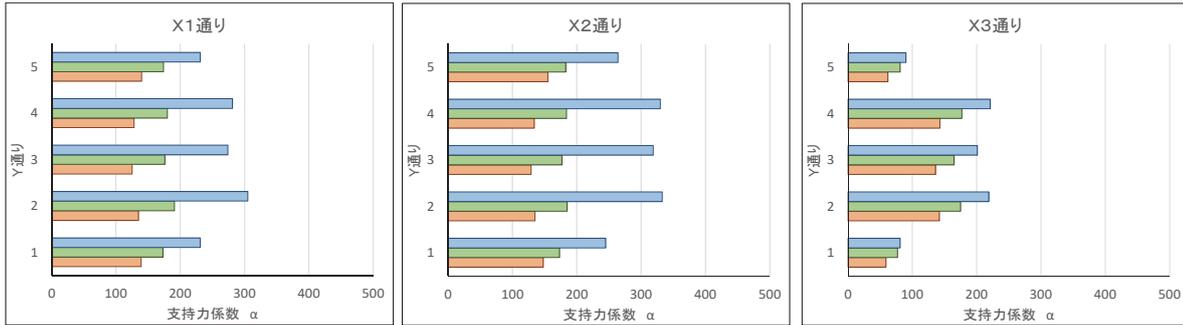
ケース	常時荷重時の $\alpha$ 値	
	地盤A	地盤B
ケース①	296~441	275~437
ケース②	81~333	160~316
ケース③	81~269	127~254
ケース④	81~423	160~316
ケース⑤	53~186	85~208

詳細な考察は次節で述べるが、本検討ではせん断設計が大きく影響したと思われる。とくに隅部の引抜き力が生じている杭で大きな影響が生じた。高支持力杭の場合、先端の下杭は、根固め部と一体化させるため、特殊な形状をしたST杭や節杭を用いる。このため、杭材はPHC杭となり、耐力の大きいSC杭を使用できない。引抜き力が発生し、下杭で大きな応力が発生するような条件では、必然的に断面が大きくなる (もしくは本数が多くなる) 傾向になる。

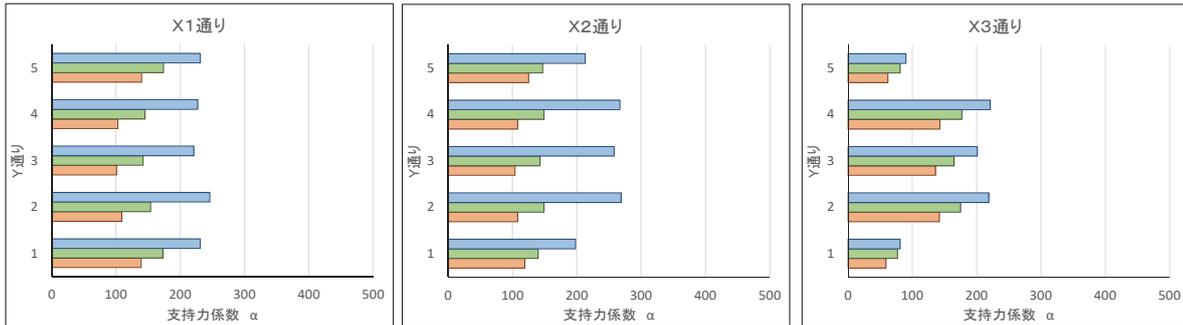
ケース①



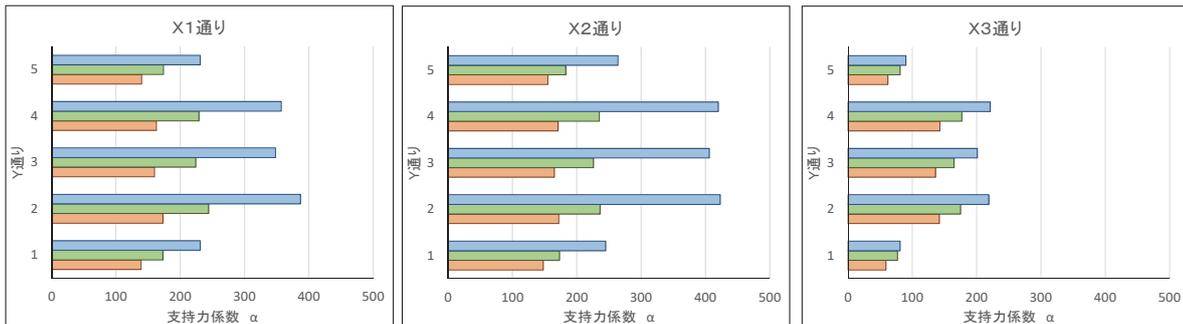
ケース②



ケース③



ケース④



ケース⑤

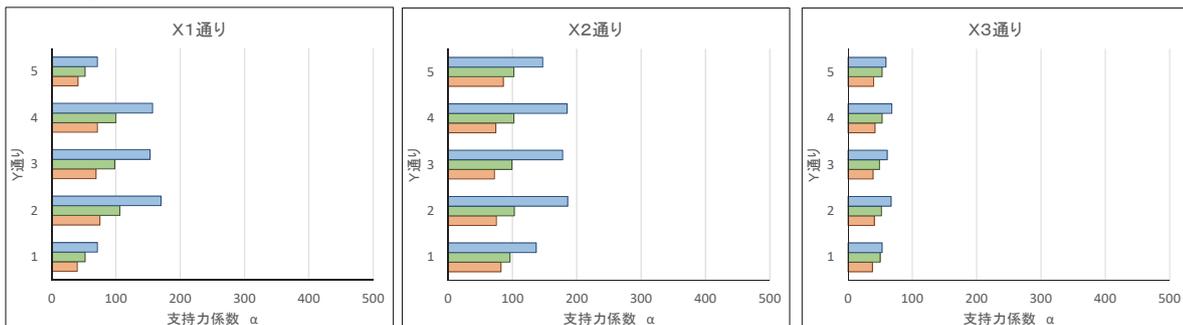
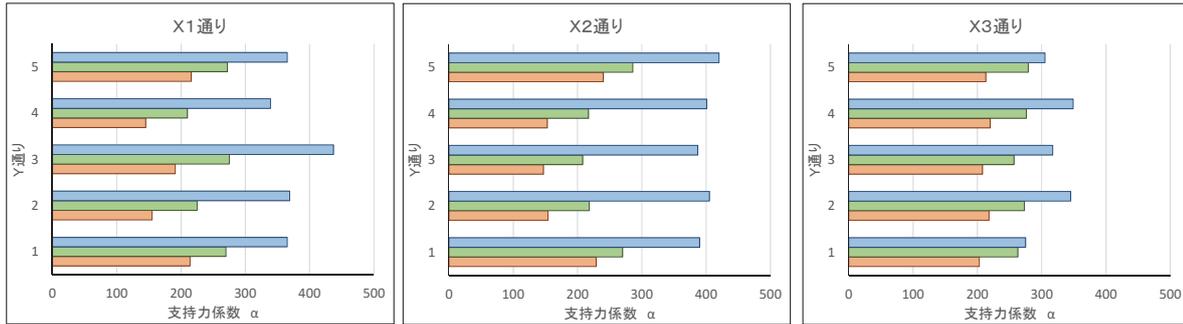
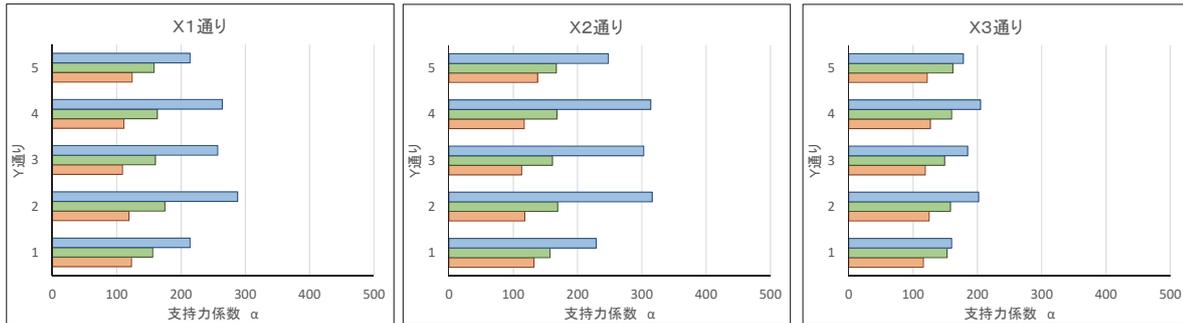


図 39 式 (7) の結果 (その1 : 地盤A)

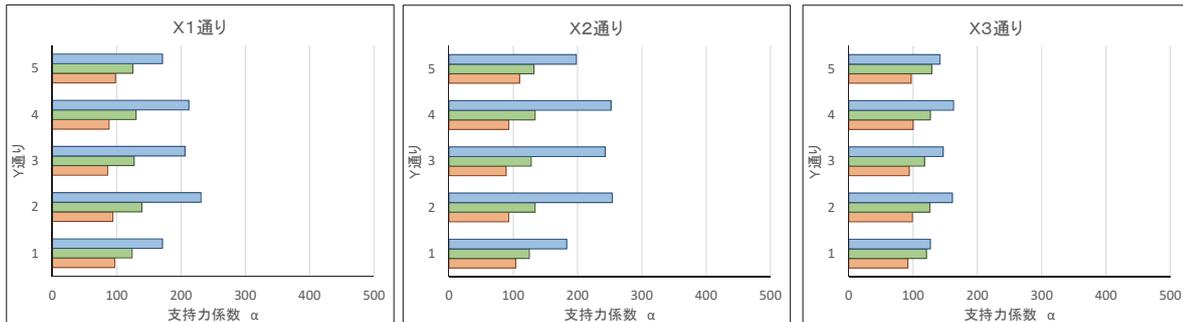
ケース①



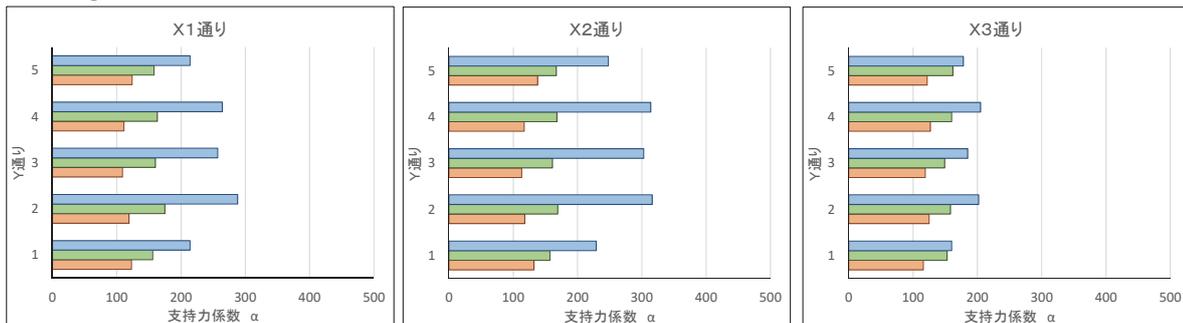
ケース②



ケース③



ケース④



ケース⑤

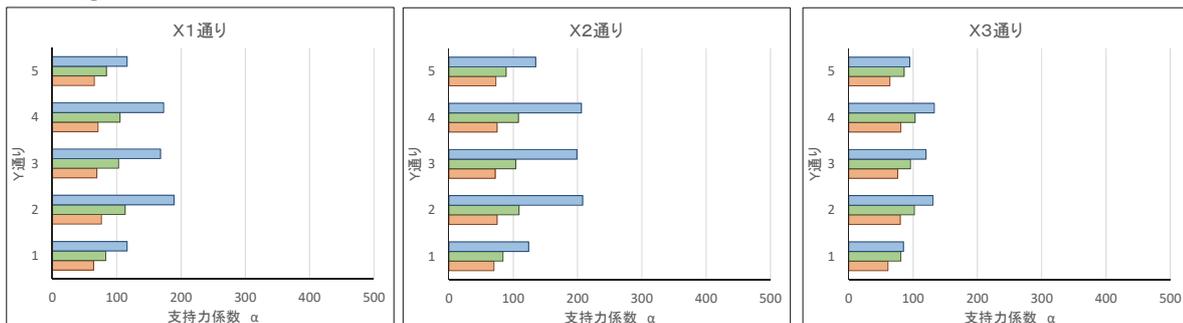


図 40 式 (7) の結果 (その2 : 地盤B)

#### 4. 考察

##### 4. 1 部材断面比較

地盤A、地盤Bそれぞれの各ケースの数量比較を表 26、表 27、図 41、図 42 に示す。この数量比較は、それぞれの地盤のケース①に対するコンクリート、鋼管、掘削体積の比率で、コンクリートと鋼管は重量、掘削体積は体積を比較している。

表 26 地盤Aの数量比較

ケース	重量比		掘削体積比
	鋼管	コンクリート	
①	1.00	1.00	1.00
②	2.04	1.84	1.74
③	2.50	1.99	1.96
④	1.65	1.90	1.60
⑤	3.49	3.85	3.91

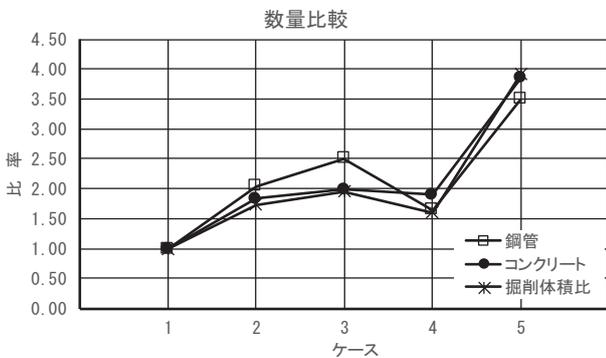


図 41 地盤Aの数量比較

表 27 地盤Bの数量比較

ケース	重量比		掘削体積比
	鋼管	コンクリート	
①	1.00	1.00	1.00
②	2.08	1.34	1.52
③	2.35	1.66	1.91
④	1.86	1.38	1.52
⑤	3.06	2.16	2.59

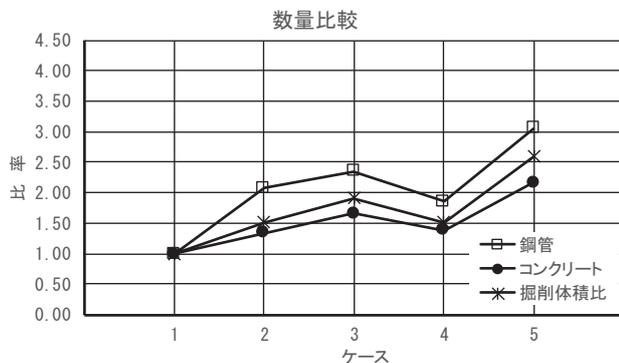


図 42 地盤Bの数量比較

地盤Aでは、ケース①に対し、材料がケース②で約 1.8 倍～2.0 倍、ケース③で約 2.0 倍～2.5 倍、ケース④で約 1.7 倍～1.9 倍、ケース⑤で約 3.5 倍～3.9 倍である。地盤 B では、ケース①に対し、材料がケース②で約 1.3～2.0 倍、ケース③で約 1.7 倍～2.4 倍、ケース④で約 1.4 倍～1.9 倍、ケース⑤で約 2.2 倍～3.1 倍である。いずれも地盤でも、2 次設計を行うと大幅な躯体増となっており、建設コストへの影響は避けられない。

ケース④、ケース⑤は同じ性能グレードAであるが、変形能力を高めた杭を使用したケース④の方が数量の増加率が半分程度であり、数量削減効果があることを示している。

##### 4. 2 高支持力杭特有の現象

表 26、表 27 を比較すると表 26 の地盤Aの方が数量の上昇率が大きい。これは隅部の引き抜きが生じている杭のせん断設計が大きく影響した。

地盤A、ケース③、X 3/Y 5、X 方向正加力の 2 次設計の解析モデル (杭単体部分) を図 43 に、解析結果を図 44 に示す。解析モデルは、杭先端を水平方向に地盤ばねを有するローラー支持としている。よって、杭先端の曲げモーメントは 0 であるが、せん断力は発生する。図 44 の変位図では、杭先端で加力方向と反対の変位が生じており、いわゆる短い杭の性状となっている。地盤 A では杭長が杭径に比べて短いため、このような現象が生じている。各ケースの杭頭断面のレベル 1 荷重時の  $\beta$  値と  $\beta L$  を表 28 に示す。いずれも  $\beta L < 2.25$  であり、短い杭に判別される。

高支持力杭は、杭先端の根固め球根と杭体の付着を高めるため、特殊な形状をした PHC 杭が使用され、耐力の高い SC 杭や鋼管を使用することができない。PHC 杭は、通常の軸力下でもせん断耐力が乏しい部材であり、引張軸力下になると非常にせん断耐力が小さくなる。図 45 に同部材のせん断設計の結果を示すが、非常に耐力の小さいところで設計していることがわかる。

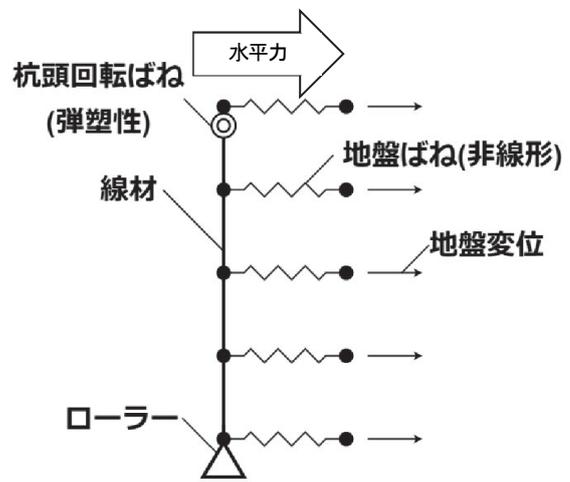


図 43 解析モデル (杭単体部分)

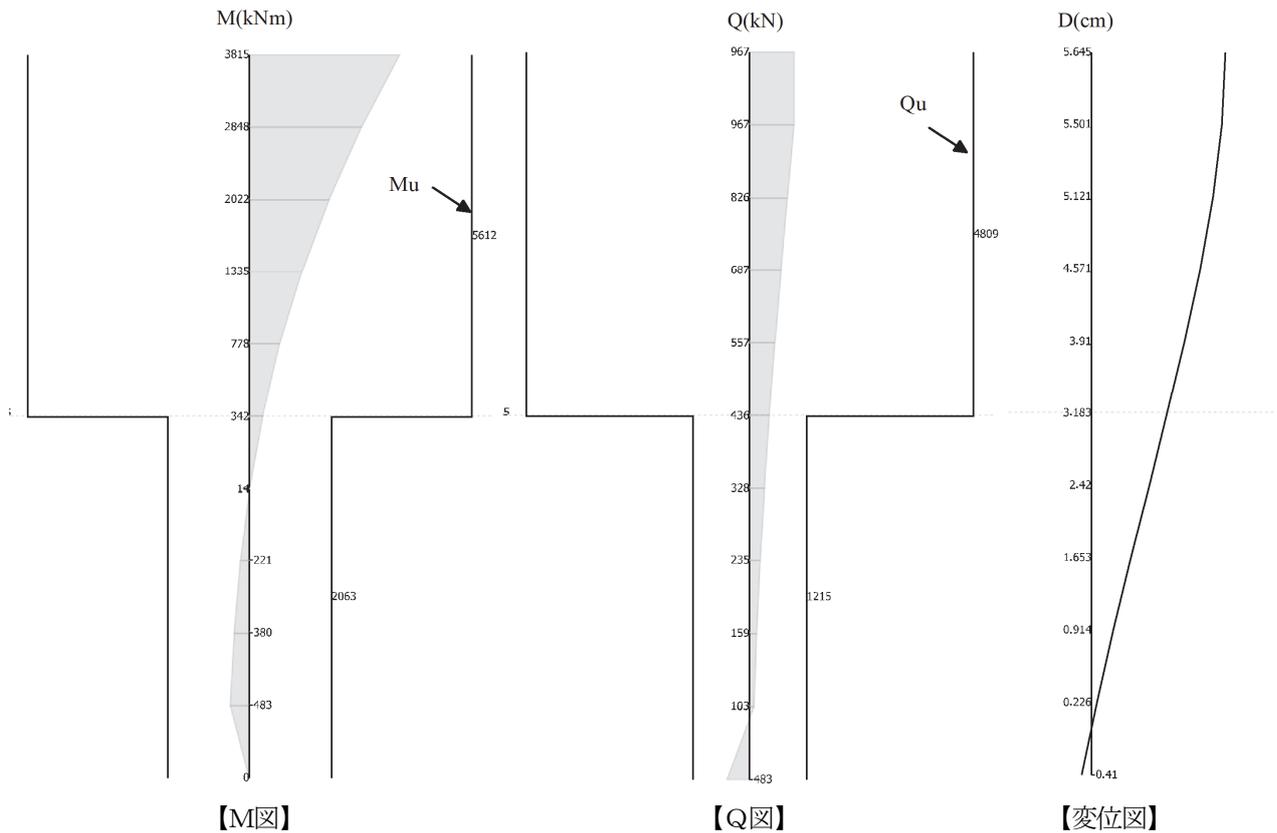


図 44 地盤A、ケース③、X3/Y5、X方向正加力応力図および変位図

表 28 上杭の $\beta$ 値と $\beta L$

ケース	D (mm)	$k_{i0}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$y_0$ (m)	$k_n$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$I_c$ ( $\text{m}^4$ )	$\beta$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$\beta L$
①	600	10390	0.0267	6359	0.0090	0.227	2.27
	700	9256	0.0267	5665	0.0144	0.204	2.04
②	800	8374	0.0141	7052	0.0282	0.188	1.88
③	800	8374	0.0126	7460	0.0303	0.187	1.87
	900	7666	0.0126	6829	0.0456	0.170	1.70
④	700	9256	0.0163	7250	0.0144	0.217	2.17
	800	8374	0.0163	6559	0.0236	0.193	1.93
⑤	1000	7084	0.0064	22384	0.0571	0.223	2.23
	1100	6595	0.0064	20840	0.0800	0.206	2.06

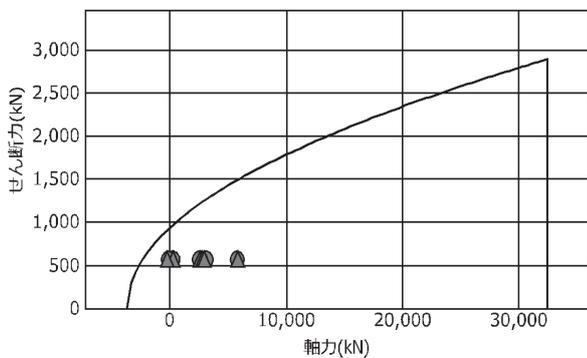


図 45 P1杭(下杭)のせん断耐力とせん断力の関係

## 5. まとめ

- ①支持地盤の平均N値が60を超える良好な地盤で杭材が標準厚の場合、杭の長期支持力は杭材の長期許容軸力で決定される場合が多い。この場合、杭体は変動軸力が少ない中柱下の杭でもレベル2地震時の軸力比が0.3程度となり、軸力比が高く変形能力に乏しい環境下に置かれる可能性が高い。これを改善するには杭の厚さを厚くするか、高いコンクリート強度の杭を使用することが有効である。
- ②レベル2地震時の設計を導入すると杭体への影響が非常に大きくなり、レベル1地震時の設計のみの場合に比べ、一般の既製コンクリート杭では約2.0~3.0倍の断面増加となる。靱性を高めた杭を杭頭部に使用すると約1.4~2.0倍程度の断面増加であり、変形能力のある杭を使用すると断面の増加を抑制できる。
- ③短い杭で引抜き力が生じる高支持力杭の場合、杭先端のせん断設計が非常に厳しい状況に陥り、長い杭の場合に比べ断面の増加が大きくなる。

### 参考文献

- 文献1) コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭—基礎構造設計マニュアル（建築編），pp.313~339，2009.5
- 文献2) 本間祐介・浅井陽一・山路麻未・小梅慎平・阪上浩二：二重管方式を採用した高靱性型SC杭の変形性能，日本建築学会構造系論文集，第760号，pp.819~829，2019.06
- 文献3) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，2022.03