

第 7 章

結論

7.1 まとめ

本節では、最新の杭基礎に関する技術的知見（学会規準，指針）に基づいて実施した，既製コンクリート杭基礎による設計例（3章～6章）を実施した結果，得られた知見を整理する。

7.1.1 杭基礎構造システムの耐震設計及び設計方針について

耐震性能評価の方針は，最新の杭基礎に関する技術的知見（学会規準，指針）に基づいており，また大地震時に対する保証設計を含めた設計方針を以下の通り整理した。

表 7.1.1-1 設計方針のまとめ（降伏埋込工法，中実杭工法）

想定する地震		稀地震 (レベル1)	極稀地震 (レベル2)		
設計レベル		1次設計	2次設計	保証設計	
設計法	設計応力	慣性力	1次設計時 応力	Cbは必要保有水平耐力以上かつ0.4以上	
		地盤 変位	考慮しない	2次設計用地盤変位	
	応力算定方法		単杭モデル 弾性解析	<ul style="list-style-type: none"> 群杭フレームモデル 慣性力と地盤変位応力の増 分解析 	<ul style="list-style-type: none"> 二次設計応力に対して割増 を考慮
要求性能	杭体	ランク S	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 許容応力度以内 	<ul style="list-style-type: none"> 終局強度以内（圧縮軸力は Ds=0.55 相当に割増） せん断余裕度 n=1.25
	杭頭部 パイル キャップ	ランク A	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 終局強度以内 	<ul style="list-style-type: none"> ランク S と同じ
	基礎梁	ランク B	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭部以外は終局強度以内 杭頭部は $\theta_u^{(*)}$ 以内 	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭部以外はランク S と同 じ 杭頭部は $\theta_u^{(*)}$ 以内（圧縮 軸力は Ds=0.55 相当に割増）

(*) θ_u はパイルキャップ下面における杭の終局回転角。降伏埋込工法（SC杭）で $\theta_u=0.05$ (rad)，中実杭工法で $\theta_u=0.04$ (rad) とする。

表 7.1.1-2 設計方針のまとめ（杭頭半剛接工法）

想定する地震		稀地震 (レベル1)	極稀地震 (レベル2)		
設計レベル		1次設計	2次設計	保証設計	
設計 法	設計応力	慣性力	1次設計時 応力	Cbは必要保有水平耐力以上かつ0.4以上	
		地盤 変位	考慮しない	2次設計用地盤変位	
	応力算定方法		単杭モデル 弾性解析	<ul style="list-style-type: none"> 群杭フレームモデル 慣性力と地盤変位応力の増分解析 	<ul style="list-style-type: none"> 二次設計応力に対して割増を考慮
要 求 性 能	杭体 基礎梁	ランク S~A	杭頭固定杭と 同じ	杭頭固定杭と同じ (杭頭回転角を除く)	杭頭固定杭と同じ (杭頭回転角を除く)
	パイル キャップ	ランク S	2次設計にて 安全性確認 ^{(*)2}	<ul style="list-style-type: none"> パイルキャップが短期許容せん断力以下 引抜対応タイプは鋼棒が短期許容応力度以下 杭頭回転角が損傷限界回転角以内 	<ul style="list-style-type: none"> パイルキャップが終局せん断耐力以下（せん断余裕度n=1.25に対して） 引抜対応タイプは鋼棒が終局耐力以下（引張力はDs=0.55相当） 杭頭回転角が終局限界回転角以内（圧縮軸力はDs=0.55相当に割増）
	杭頭部	ランク A	許容応力度 以内	<ul style="list-style-type: none"> パイルキャップが終局せん断耐力以下 引抜対応タイプは鋼棒が終局耐力以下 杭頭回転角が終局限界回転角以内 	<ul style="list-style-type: none"> ランクSと同じ

(*)2) 試設計ではF.T.PileをランクSで使用しており、二次設計における要求性能を短期許容応力度（損傷限界）以下としたため、一次設計の検討を省略している。

7.1.2 学校校舎 A を用いた試設計のまとめ

学校校舎 A： 地上3階，耐震壁付き，地震時の変動軸力がある建物

降伏埋込工法および中実杭工法による既製コンクリート杭について，ランク B を性能目標とし試設計を行った。杭頭部の損傷を許容することにより杭に生じる応力が低減可能なことを解析にて確認できた。杭頭部の応力低減により基礎梁に生じる曲げ戻しが低減され過大な付加軸力が低減されることにより杭断面の低減も可能となっている。

特に地盤が悪い場合には杭頭部の曲げ応力が大きくなる傾向にあり、杭頭部の損傷を許容し生じる応力を制御可能な工法を用いる効果は大きいと考えられる。

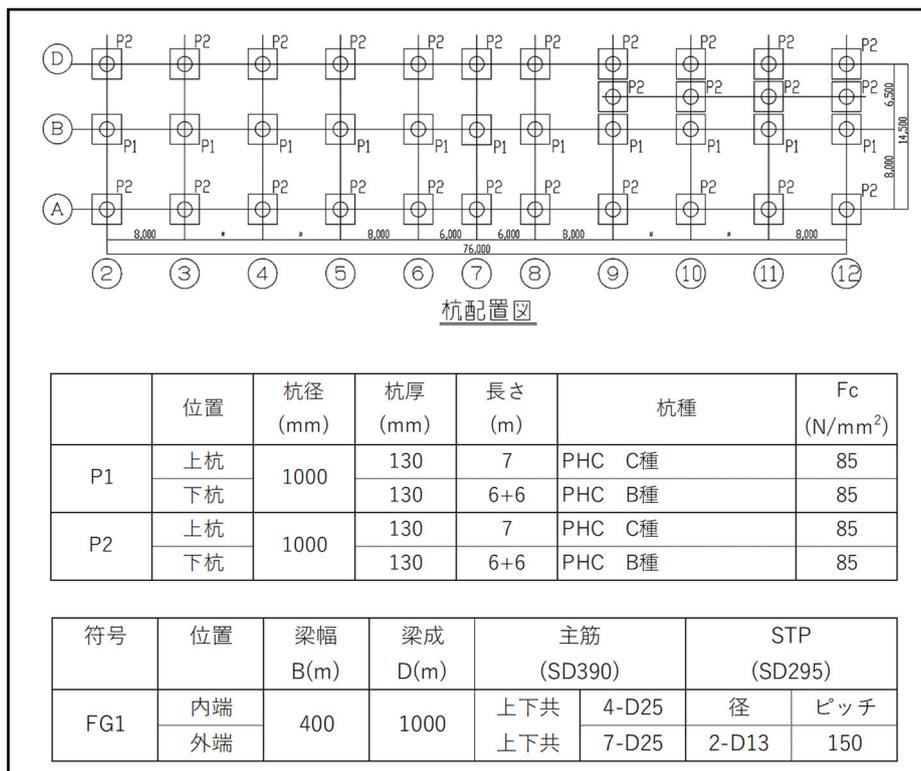


図 7.1.2-1 1次設計による必要断面 (地盤1)

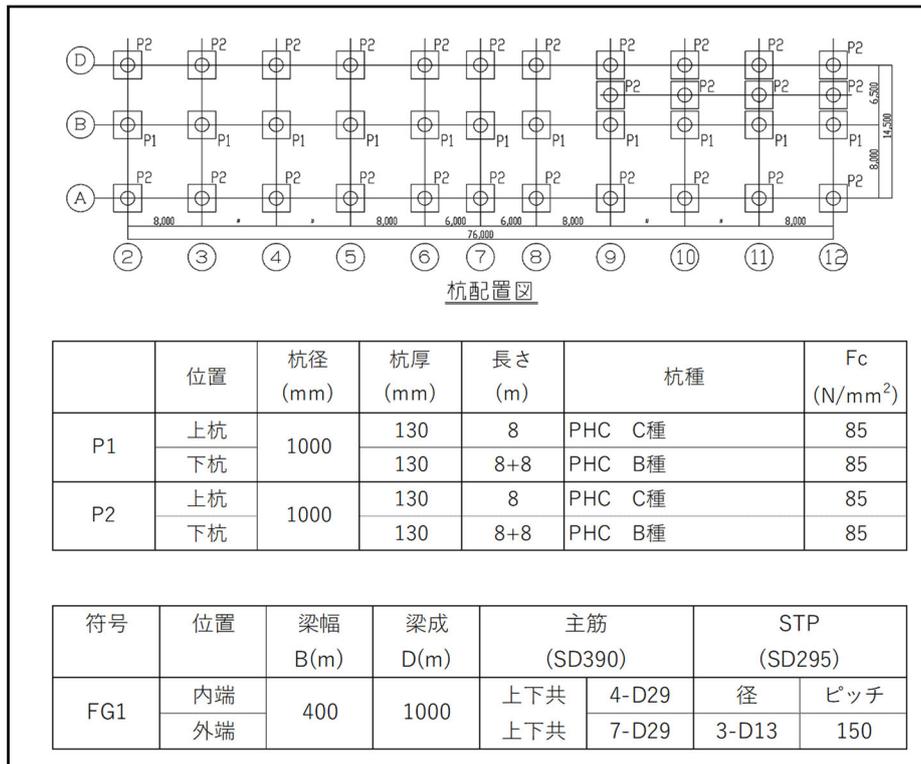


図 7.1.2-2 1次設計による必要断面 (地盤2)

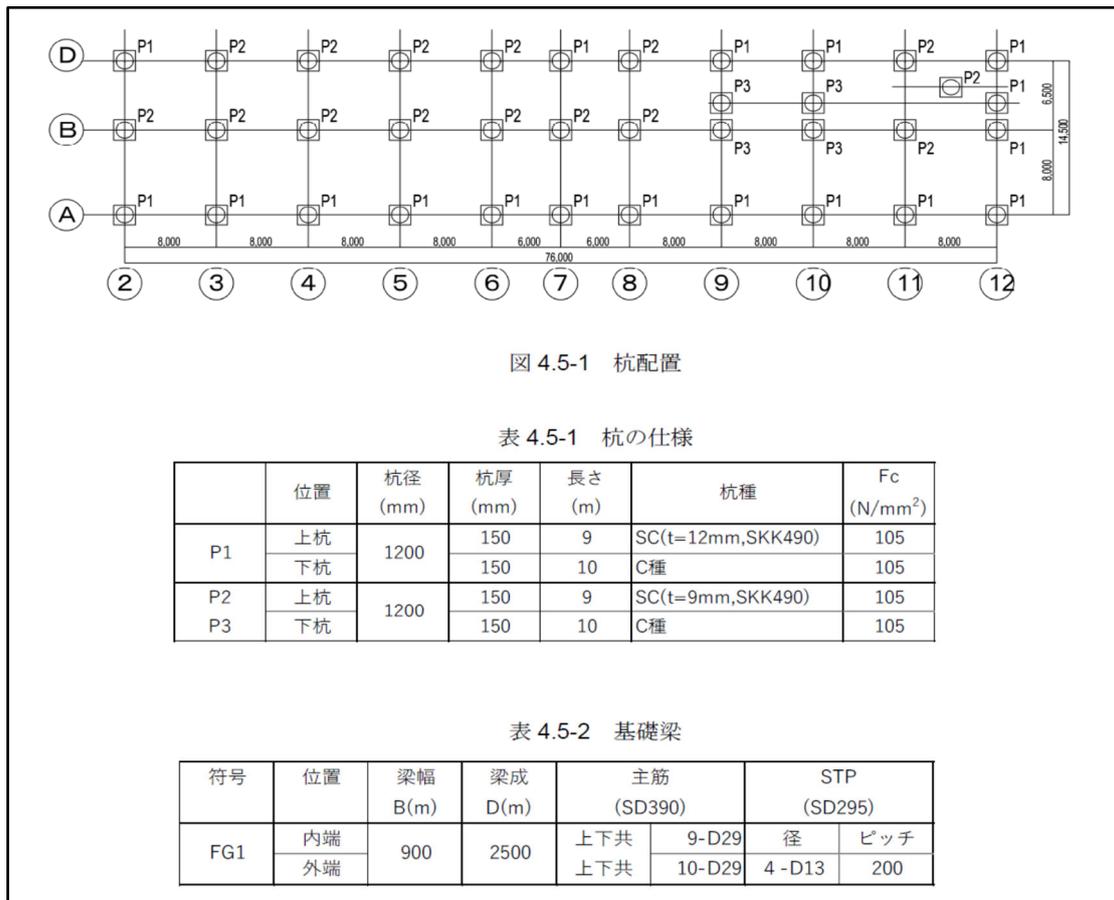


図 7.1.2-3 目標ランク S による必要断面 (地盤1)

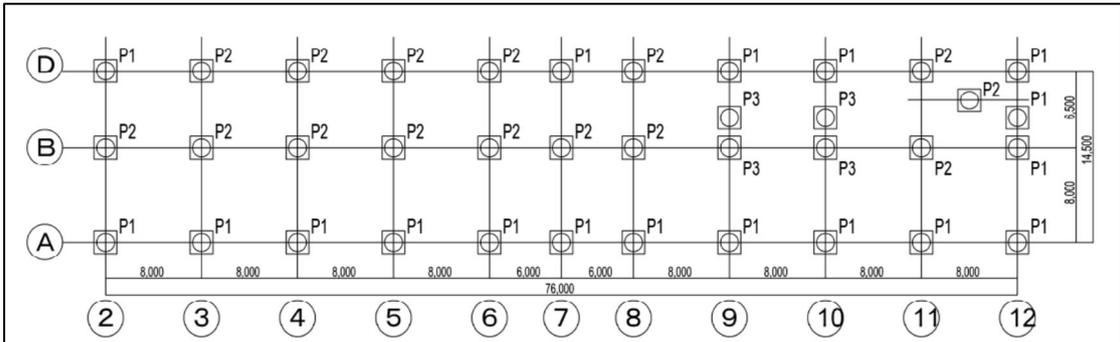


図 4.5-3 杭配置

表 4.5-3 杭の仕様

	位置	杭径 (mm)	杭厚 (mm)	長さ (m)	杭種	Fc (N/mm ²)
P1	上杭	1200	150	9	SC(t=19mm,SKK490)	105
P3	下杭		150	19	SC(t=12mm,SKK490)	105
P2	上杭	1200	150	9	SC(t=16mm,SKK490)	105
	下杭		150	19	SC(t=9mm,SKK490)	105

表 4.5-4 基礎梁

符号	位置	梁幅 B(m)	梁成 D(m)	主筋 (SD390)		STP (SD295)	
				上下共		径	ピッチ
FG1	内端	900	2500	上下共	12-D32	6-D13	100
	外端			上下共	13-D32		

図 7.1.2-4 目標ランク A による必要断面 (地盤 2)

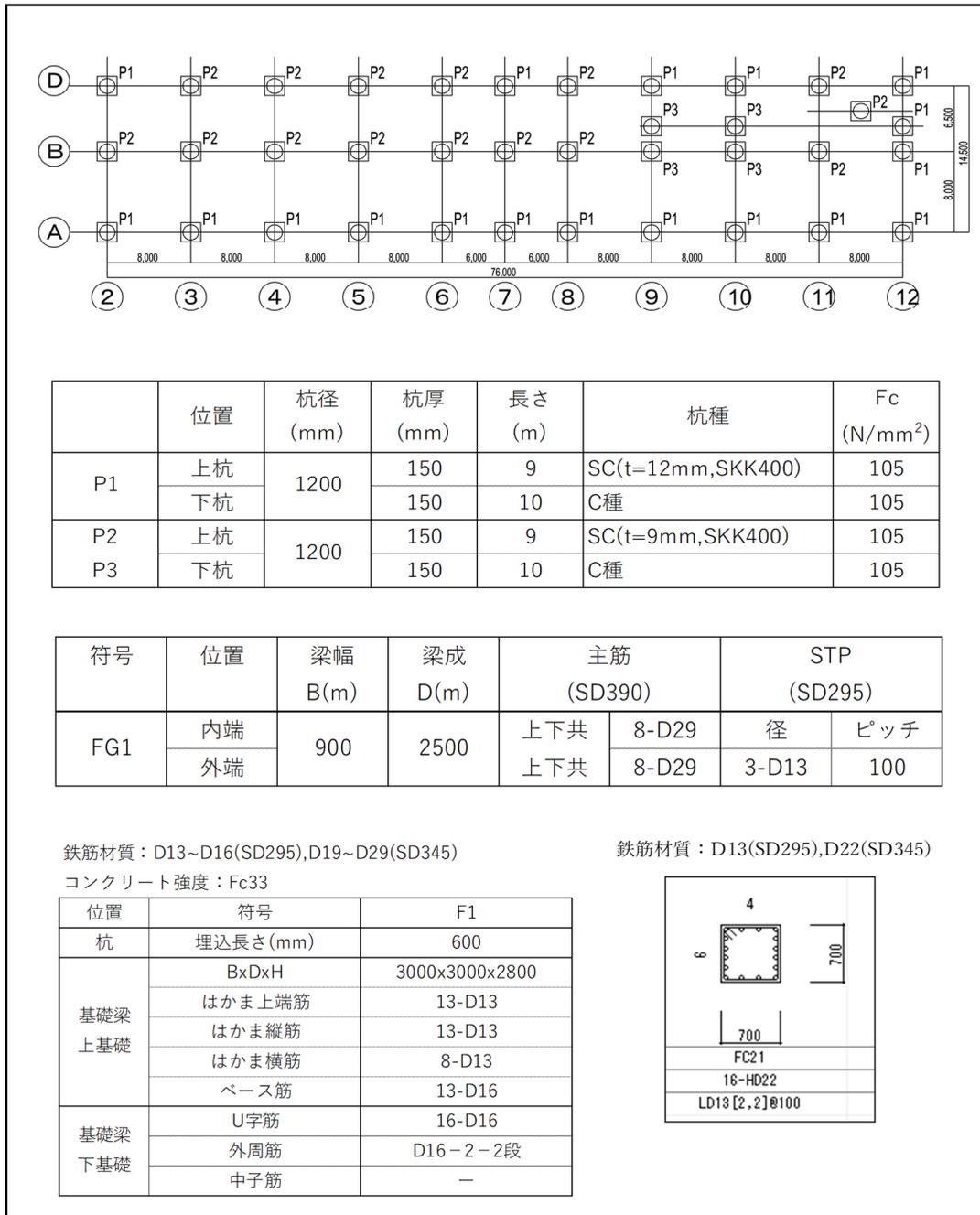


図 7.1.2-5 目標ランク B による必要断面：中実杭工法 (地盤 1)

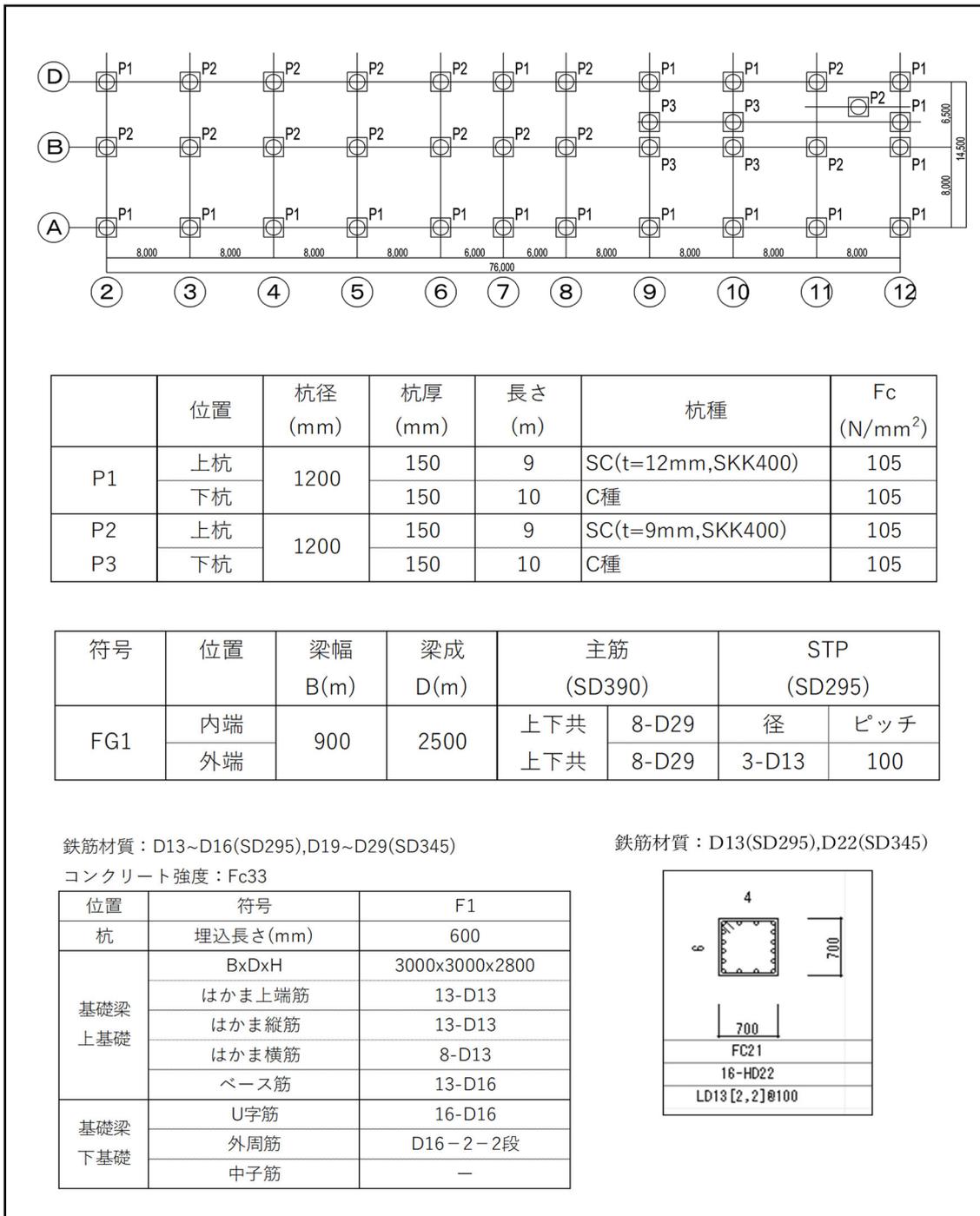


図 7.1.2-6 目標ランク B による必要断面：降伏埋込杭工法 (地盤 2)

7.1.3 共同住宅 B を用いた試設計のまとめ

共同住宅 B： 地上 8 階，連層耐震壁付き，地震時の変動軸力が大きい建物

降伏埋込工法の既製コンクリート杭について，ランク B を性能目標とし試設計を行った。杭体については，軸力比の制限値を満足させるため X3,YC 通りについては 2 本杭としたが，ケース B1 (ランク A) に対して杭径，鋼管板厚を低減することが出来た。

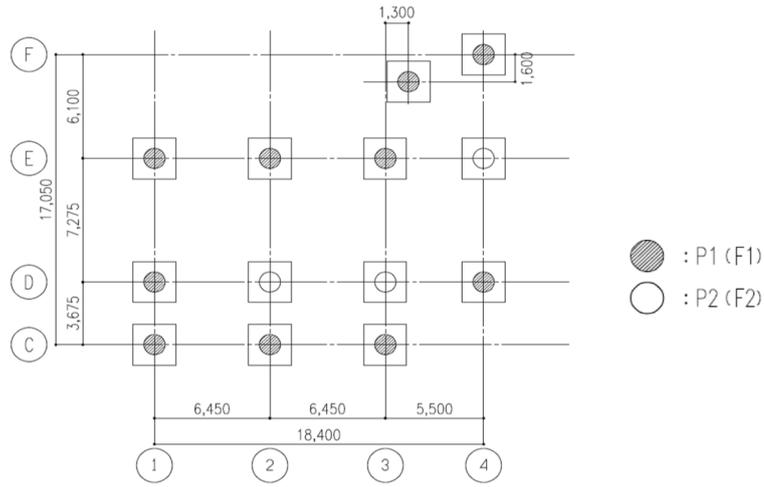
パイルキャップについては，「RC 基礎指針 (案)」^[7-1]の場所打ち杭の 1 本杭の検討式に準じて検討を行った。開く側の検討については，ケース B1 (ランク A) の検討結果よりも曲げ強度の余裕度は改善したが，今回の設計条件では設計困難な結果となった。

建築研究所では，この曲げ破壊を計画した杭頭接合部試験体を用いて実験した結果^[7-2]，開く方向ではパイルキャップが層せん断力 199.4kN でせん断破壊した。一方でこの試験体の曲げ耐力は 149.6kN であった。このことから，少なくともこの試験体では曲げ耐力式の余裕度は 1.33 倍以上だと考えられる。

「RC 基礎指針 (案)」^[7-1]の曲げ耐力式の精度検証のためには，今後も継続的にパイルキャップ曲げ破壊に関する実験的な検討が必要である。

その他，引抜に対して高い抵抗力を発揮できる杭頭半剛接合工法が開発された場合を想定し，ランク A を性能目標とした試設計を行った。

杭頭半剛接合工法を採用することで，杭頭固定とした場合の試設計に対して杭頭部の曲げモーメントは低減され，杭材，基礎梁およびパイルキャップにおいて合理的な設計が行えると考えられる。



杭配置

杭リスト

	杭径 (mm)	位置	杭種	Fc (N/mm ²)	L (m)	板厚 (mm)	杭頭接合筋 (SD390)
P1	1200	上杭	PHC(C種)	85	5	150	28-D29
		下杭	PHC(B種)	85	20	150	
P2	1200	上杭	PHC(B種)	85	5	150	20-D29
		下杭	PHC(A種)	85	20	150	

基礎梁リスト

鉄筋材質 : D13(SD295A), D25(SD345)

コンクリート強度 : Fc27

符号		FGX1	
B×D		500×2300	
位置		外端(C,E端)[D,F端]	内端(D端)[E端]
上端筋	一段	4-D25	4-D25
	二段	2-D25	—
下端筋	二段	2-D25	—
	一段	4-D25	4-D25
スターラップ		D13-2-@200	

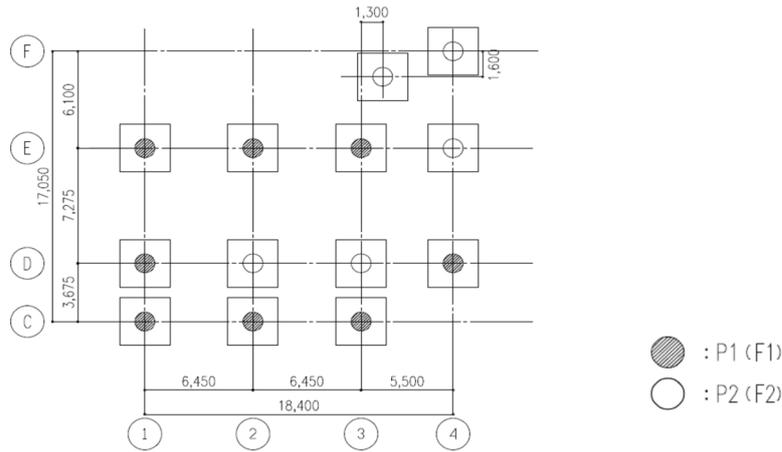
基礎リスト

鉄筋材質 : D13, D16(SD295A), D29(SD390)

コンクリート強度 : Fc27

符号	F1(P1杭)	F2(P2杭)	備考
B×D×H	2400×2400×1500		
はかま上筋	13-D13		
はかま縦筋	13-D13		
はかま横筋	8-D13		
ベース筋	13-D19		

図 7.1.3-1 1次設計による必要断面 (地盤2)



杭配置

杭リスト

	杭径 (mm)	位置	杭種	F_c (N/mm^2)	L (m)	板厚 (mm)	杭頭接合筋 (SD390)
P1	1200	上杭	SC(t=22mm,SKK490)	105	11	150	24-D35
		下杭	SC(t=12mm,SKK490)	80	37	150	
P2	1200	上杭	SC(t=16mm,SKK490)	80	11	150	24-D35
		下杭	PHC(C種)	85	14	150	

基礎梁リスト

鉄筋材質 : D16,D35(SD390)

コンクリート強度 : F_c42

符号	FGX1		
B×D	900×3000		
位置	外端(C,E端)[D,F端]	内端(D端)[E端]	
上端筋	一段	6-D35	5-D35
	二段	5-D35	2-D35
下端筋	二段	5-D35	2-D35
	一段	6-D35	5-D35
スターラップ	D16-6-@150		

※)パイルキャップ検討において外端の配筋を、下記に変更し検討を行った。

FGX1 : 下端筋 二段筋 : 5-D35→6-D35、三段筋 : 0→6-D35

基礎リスト

鉄筋材質 : D13,D16(SD295A), D19,D22,D25,(SD345), D32(SD390)

コンクリート強度 : F_c42

符号	F1(P1杭)	F2(P2杭)	備考
埋込み長さ(mm)	1600	1200	
B×D×H	3000×3000×4700	3000×3000×4300	検討3(R2-159)
はかま上筋	14-D16	14-D16	
はかま縦筋	24-D16+16-D32	24-D16+16-D29	
はかま横筋	8-D16	8-D16	
ベース筋	16-D19	16-D19	
U字筋	8-D32	8-D29	
外周筋	D25-2-10段	D22-2-10段	
中子筋	D25-4-9段	D22-4-9段	
J字筋	24-D16	24-D16	

図 7.1.3-2 目標ランク A による必要断面 (地盤 2)

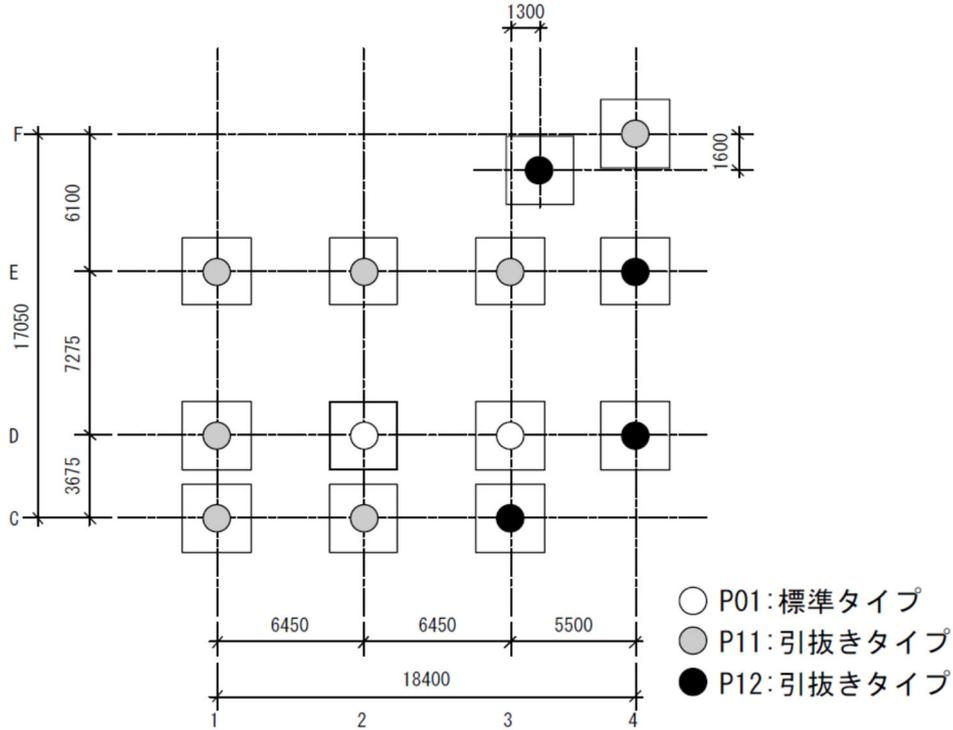


図 7.4-1 杭配置

表 7.4-1 杭の仕様

杭符号	杭径 (mm)	上杭		中杭		下杭		杭本数 (セット)	杭頭 接合法	引抜き抵抗用鋼棒			
		杭種名称	長さ (m)	杭種名称	長さ (m)	杭種名称	鋼棒 種別			全長 (mm)	本数 (杭1本 あたり)	配置 直径 (mm)	
P01	1200	SC105-490-t9	12	PHC105-C	8	PHC105-C	2	標準タイプ	-	-	-	-	
P11	1200	SC105-490-t12	12	PHC105-C	8	PHC105-C	7	引抜きタイプ	φ11-C種	1750	80	800	
P12	1200	SC105-490-t19	12	SC105-490-t12	8	PHC105-C	4	引抜きタイプ	φ11-C種	1750	120	800	

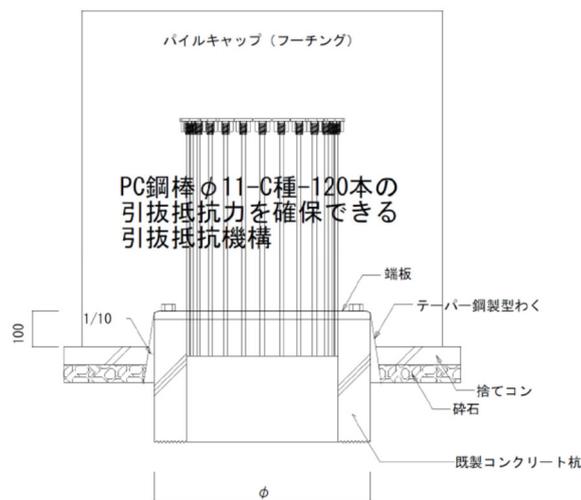
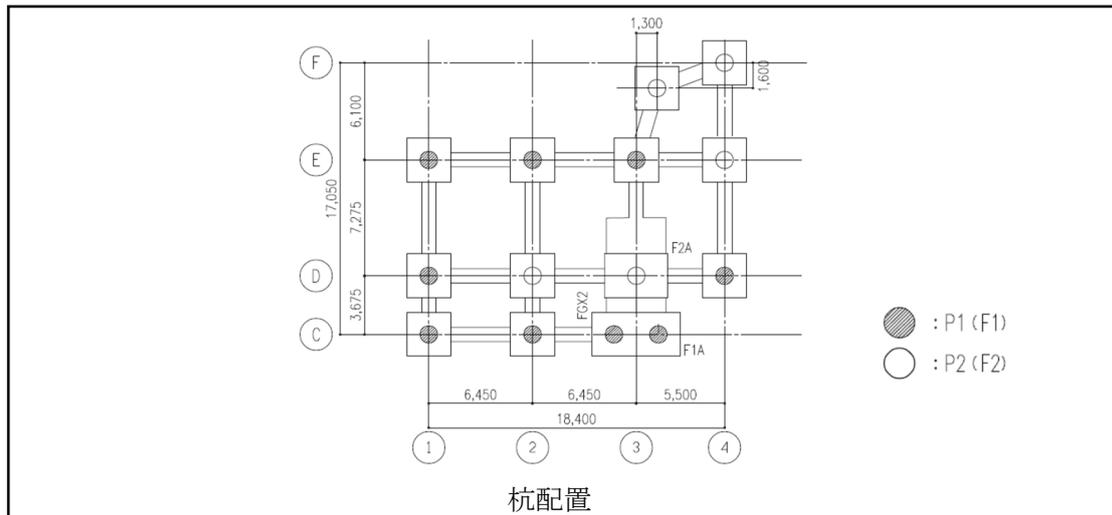


図 7.1.3-3 目標ランク A による必要断面：杭頭半剛接合法 (地盤 2)



杭リスト

	杭径 (mm)	杭 体				パイルキャップ		
		位置	杭種	Fc (N/mm ²)	L (m)	板厚 (mm)	Fc (N/mm ²)	杭頭定着筋 (SD490)
P1	1100	上杭	SC(t=19mm,SKK490)	80	11	140	Fc42	22-D41
		下杭	SC(t=12mm,SKK490)	80	23	140		
P2	1100	上杭	SC(t=14mm,SKK490)	80	11	140	Fc42	12-D41
		下杭	PHC(B種)	85	14	140		

基礎梁リスト

鉄筋材質 : D16,D35(SD390)
コンクリート強度 : Fc42

符号	FGX1		FGX2	
B×D	900×3000		3700×3000	
位置	外端(C,E端)[D,F端]	内端(D端)[E端]	外端(C端)	内端(D端)
上端筋	一段	6-D35	6-D35	12-D35
	二段	6-D35	3-D35	12-D35
	三段	—	—	—
下端筋	一段	—	—	—
	二段	3-D35	3-D35	6-D35
	三段	6-D35	6-D35	12-D35
スターラップ	D16-8-@200		D16-8-@200	

※)パイルキャップ検討において外端の配筋を、下記に変更し検討を行った。
FGX1 : 下端筋 二段筋:3-D35→6-D35、三段筋:0→6-D35
FGX2 : 下端筋 二段筋:0→12-D35、三段筋:0→12-D35

基礎リスト

鉄筋材質 : D16(SD295A)
コンクリート強度 : Fc42

符 号	F1(P1杭)	F2(P2杭)	F2A(P2杭 ,X3,YD)	備 考
埋込み長さ(mm)	550	550	550	
B×D×H	2750×2750×3700	2750×2750×3700	3900×2750×3700	
はかま上筋	11-D16	11-D16	11-D16	
はかま縦筋	11-D16	11-D16	11-D16	
はかま横筋	12-D16	12-D16	12-D16	
ベース筋	11-D16	11-D16	11-D16	
U字筋	6-D16	6-D16	6(12)-D16	括弧内はY方向を示す
外周筋	D16-2-4段	D16-2-4段	D16-2-4段	
中子筋	D16-2-4段	D16-2-4段	D16-2-4段	
J字筋	20-D16	20-D16	20-D16	

図 7.1.3-4 目標ランク B による必要断面 : 降伏埋込工法 (地盤 2)

7.1.4 共同住宅 C を用いた試設計のまとめ

共同住宅 C： 地上 11 階，板状連層耐震壁構造，地震時の変動軸力が特に大きい建物

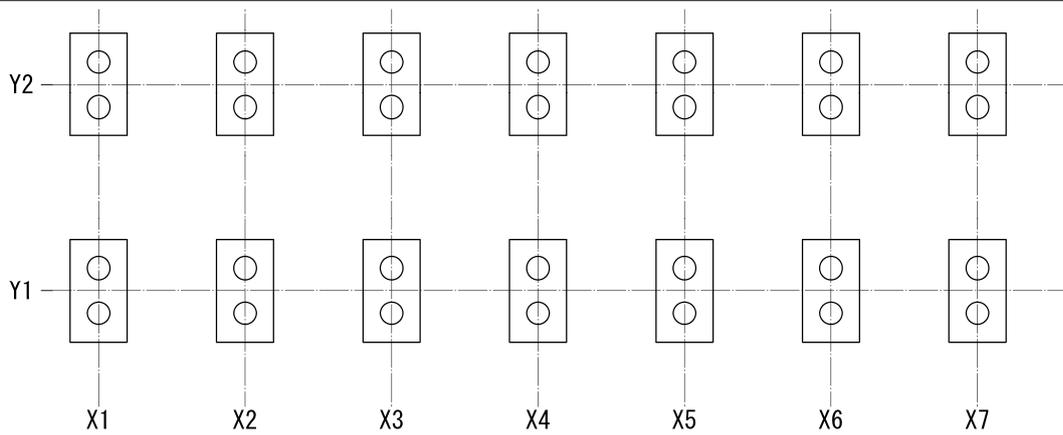
上部構造が連層耐震壁のせん断破壊であったため $D_s=0.55$ 相当による慣性力を用いた杭の設計を行い、さらに上部構造が連層耐震壁の曲げ破壊を想定した $D_s=0.40$ 相当による慣性力を用いて、建物の Y 方向に対して既製コンクリート杭の性能目標ランク B およびランク A の試設計をおこなった。

慣性力（地震荷重）の違いによる影響については、ランク B で杭頭固定とした場合、上部構造慣性力 $D_s=0.40$ 相当では、上杭は $D_s=0.55$ 相当と変わらず SC 杭（ $\phi 1200$ ，鋼管の最大板厚 $t=16\text{mm}$ ）であったが下杭の範囲が 1m 上方へ適用できる結果となった。ランク A では、上杭は上部構造慣性力 $D_s=0.55$ 相当が SC 杭（ $\phi 1200$ ，鋼管の最大板厚 $t=23\text{mm}$ ）であったが $D_s=0.40$ 相当では SC 杭（ $\phi 1200$ ，鋼管の最大板厚 $t=21\text{mm}$ ）となり、下杭は 1m 上方へ適用できる結果となった。

降伏埋込工法の既製コンクリート杭について、上部構造慣性力 $D_s=0.40$ 相当でランク B を性能目標とし試設計を行った。杭頭固定モデルに比べて杭頭部の回転剛性の影響で応力が大きく低減され、上杭は SC 杭（ $\phi 1200$ ，鋼管の最大板厚 $t=14\text{mm}$ ），下杭の範囲が $D_s=0.55$ に比べて 5m 上方へ適用できる結果となり、一般的な断面切り替え位置（範囲）となった。

中実杭工法の既製コンクリート杭について、上部構造慣性力 $D_s=0.40$ 相当でランク B を性能目標とし試設計を行った。上杭は中実杭（ $\phi 1000$ ，鋼管の最大板厚 $t=25\text{mm}$ Fc36 主筋 17-D38）となり、下杭の範囲が $D_s=0.55$ に比べて 5m 上方へ適用できる結果となり、一般的な断面切り替え位置（範囲）となった。

なお、中実杭工法でランク B を性能目標とした検討では、引張側においても柱頭隙間部に曲げ降伏ヒンジは生じなかった。引張側の杭頭隙間部（接合部）の回転剛性が終局状態（最大軸力時）を想定した剛性評価としていることから、初期荷重状態から回転剛性が低くなることが要因と考えられ、モデル化に注意が必要であることが確認できた。また圧縮側においても杭頭隙間部（接合部）の回転剛性を評価することで応力が低下し終局曲げ耐力が十分に確保でき、曲げ降伏ヒンジは生じなかった。



杭配置 (杭符号: P1)

杭リスト

杭符号	杭径 (mm)	位置	杭種	杭厚 (mm)	Fc (N/mm ²)	杭長 (m)	杭全長 (m)
P1	800	上杭	SC (t=9mm,SKK490)	110	60	5	17
		下杭	PHC (C種)	110	60	12	

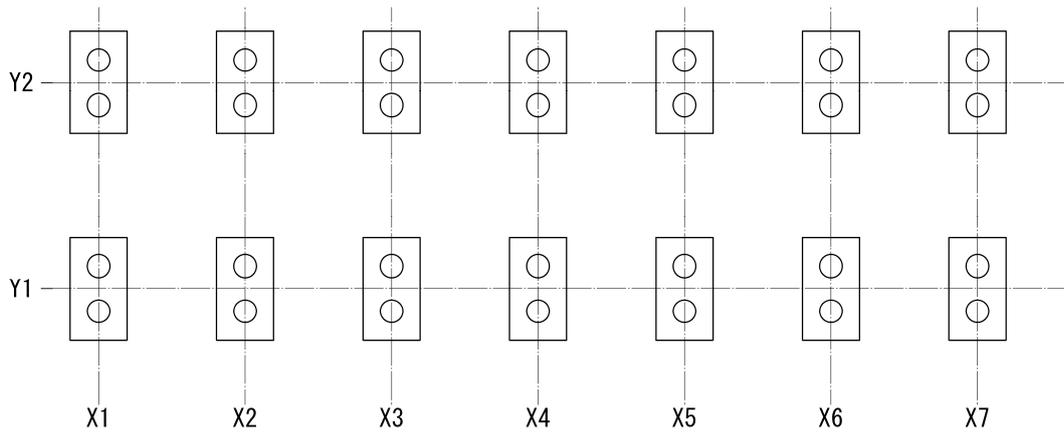
基礎梁リスト

杭符号	梁幅 (mm)	梁せい (mm)	主筋 (SD345)		STP (SD295)
			上端筋	5-D25	2-D13@200
下端筋	5-D25				

基礎リスト

杭符号	F1
BxDxH	3000x3600x2500
はかま上筋	15-D13
はかま縦筋	15-D13
はかま横筋	13-D13
ベース筋	13-D22

図 7.1.4-1 1次設計による必要断面 (地盤1)



杭配置 (杭符号 : P1)

杭リスト

杭符号	杭径 (mm)	位置	杭種	杭厚 (mm)	Fc (N/mm ²)	杭長 (m)	杭全長 (m)
P1	1200	上杭	SC (t=21mm,SKK490)	150	105	11	16
		下杭	PHC (C種)	150	105	5	

基礎梁リスト

杭符号	梁幅 (mm)	梁せい (mm)	主筋 (SD390)		STP (SD295)
			FG1	900	4000

基礎リスト

杭符号	F1
BxDxH	3000x5400x3000
はかま上筋	20-D38
はかま縦筋	20-D38
はかま横筋	15-D16
ベース筋	20-D38

図 7.1.4-2 目標ランク A による必要断面 (地盤 1)

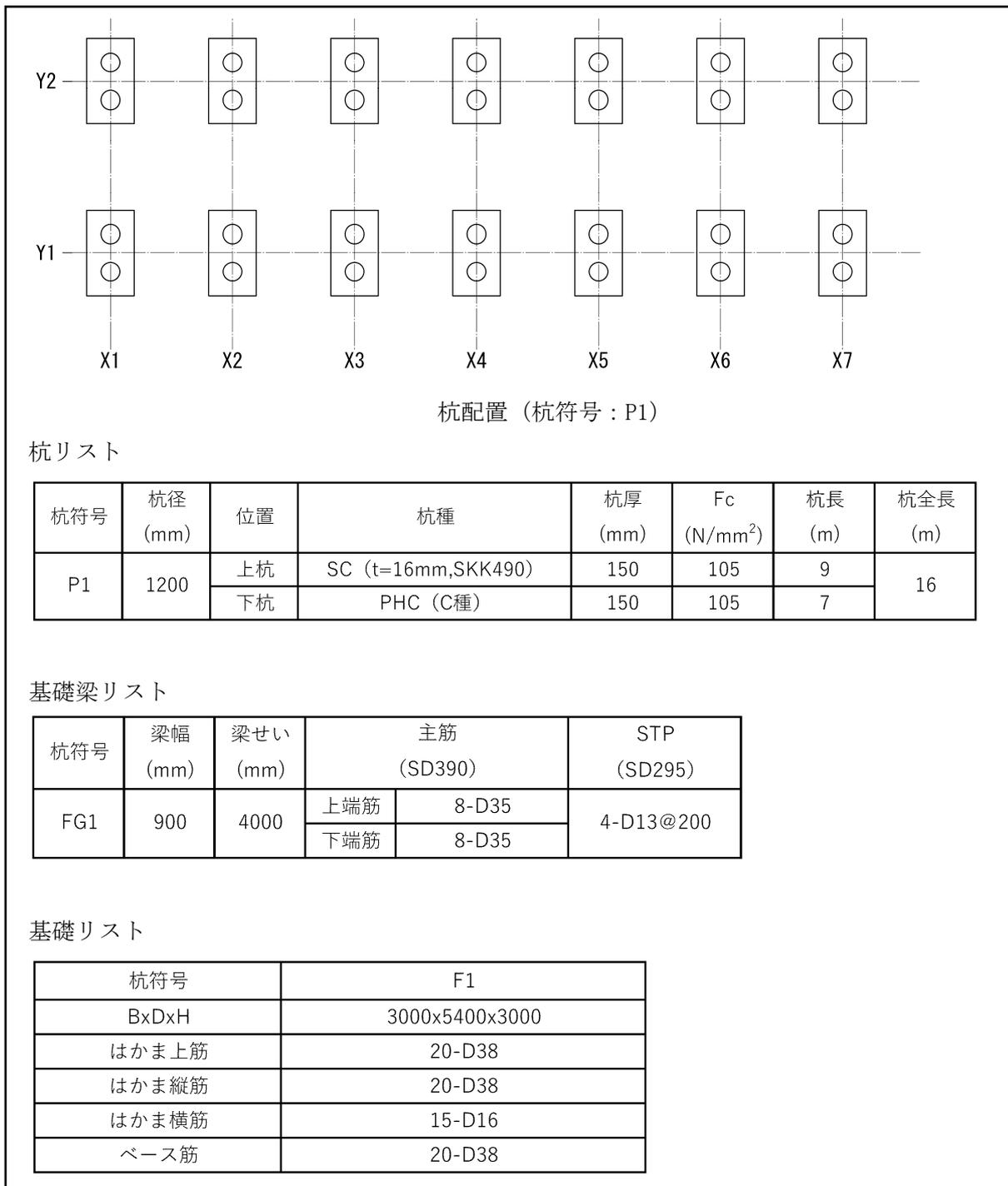
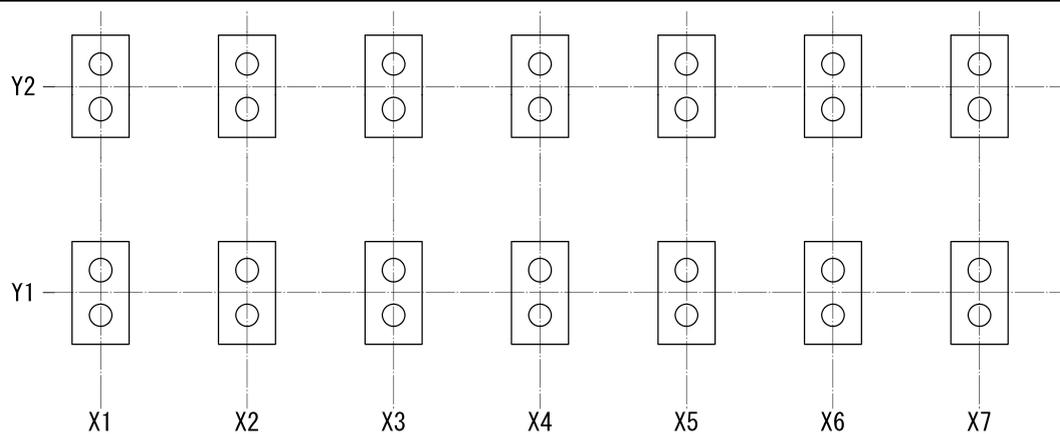


図 7.1.4-3 目標ランク B による必要断面 (地盤 1)



杭配置 (杭符号 : P1)

杭リスト

杭符号	杭径 (mm)	位置	杭種	杭厚 (mm)	Fc (N/mm ²)	杭長 (m)	杭全長 (m)
P1	1200	上杭	SC (t=14mm,SKK490)	150	105	5	16
		下杭	PHC (C種)	150	105	11	

基礎梁リスト

杭符号	梁幅 (mm)	梁せい (mm)	主筋 (SD390)		STP (SD295)
			上端筋	8-D35	3-D13@200
下端筋	8-D35				

基礎リスト

杭符号	F1
BxDxH	3000x5400x3000
はかま上筋	16-D38
はかま縦筋	16-D38
はかま横筋	15-D16
ベース筋	16-D38

図 7.1.4-4 目標ランク B による必要断面 : 降伏埋込工法 (地盤 1)

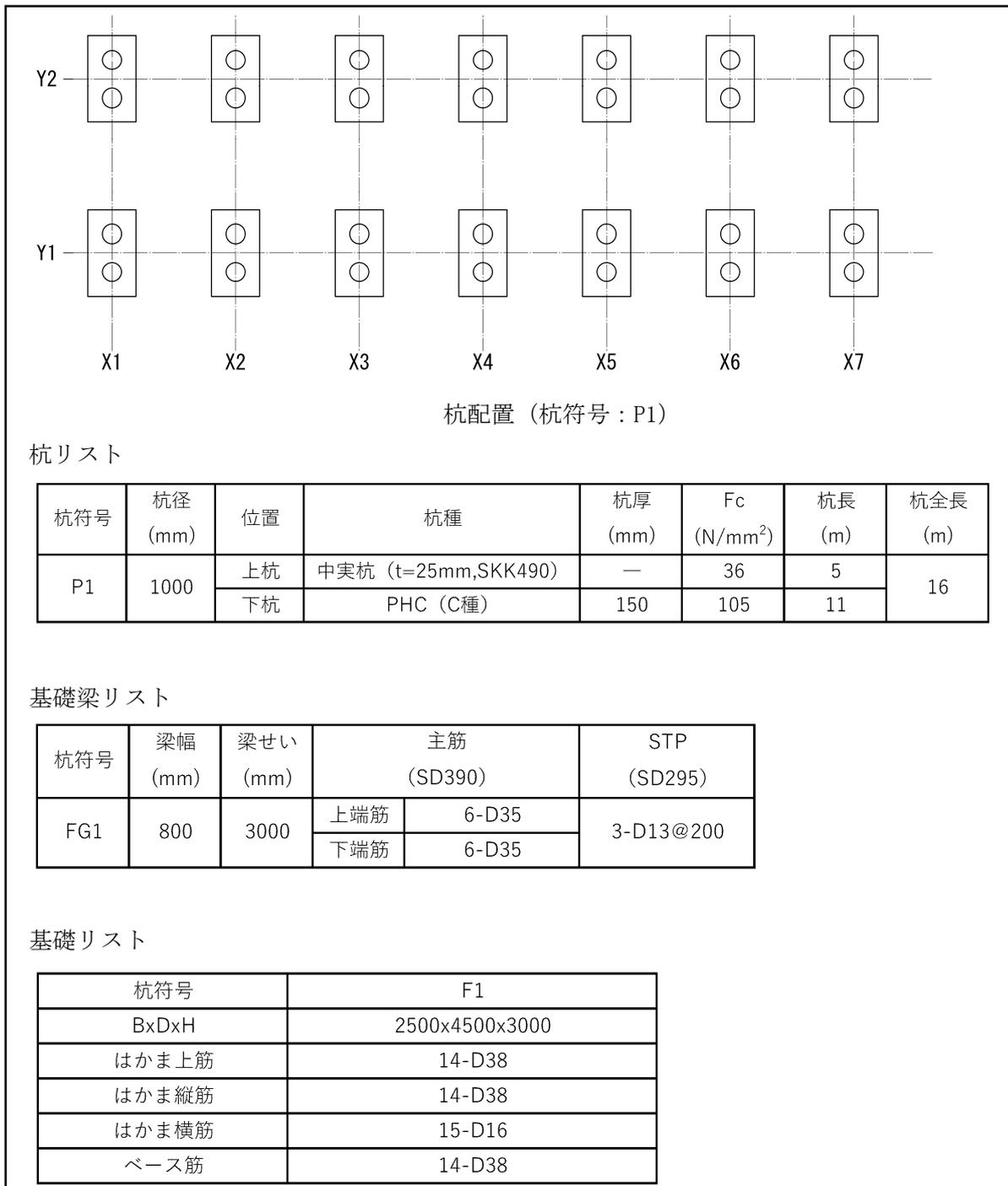


図 7.1.4-5 目標ランク B による必要断面 : 中実杭工法 (地盤 1)

7.2 今後の検討課題

7.1 節では、設計例によって得られた知見を整理した。本節では、設計例によって得られた今後の検討課題を整理する。

(1) 継続使用可能な損傷範囲を明らかにする

損傷に対する性能限界（値）を明らかにし、その限界範囲内で設計を納める。

例えば、杭頭部の曲げ降伏ヒンジを許容する設計【目標ランク B】として、杭頭部での塑性ヒンジを許容できると考える二つの工法と、その性能限界（値）の例について紹介した。（降伏埋込工法，中実杭工法）

今回の試設計を通して、二つの工法に対する効果と課題について確認している。

1) 降伏埋込工法の効果と課題

降伏埋込工法は特殊な既製杭でなく既に流通する既製杭を用いて設計可能であり、さらなる実験結果の蓄積と共に設計手法の一般化により、合理的な杭の二次設計が可能となり得ると考えられる。

設計手法の詳細では、埋込部終局曲げモーメントは「杭頭定着筋による曲げモーメント」と「てこ作用による曲げモーメント」の累加強度として計算する。一方で、現在公開されている技術資料を基に実施した今回の設計では、杭頭定着筋とてこ作用の適切な配分率や損傷がどちらで先行するか等の詳細が把握できていない。設計の観点から、これらを考慮した設計を行うことが望ましいと考えられる。

また、適用条件として埋込部の空洞部にコンクリート充填が必要であり、基礎フーチング下（杭頭部）への充填も含め合理的な充填範囲の設定が望まれる。

既製杭単杭の一般的な基礎フーチングの寸法である杭径の 2.5 倍の平面形状についても合理的な設定が可能と思われる。

2) 中実杭工法の効果と課題

中実杭工法は、杭頭部の鋼管・鉄筋・コンクリートを適切に設定することで塑性化を適度に制御可能となり得ると考えられる。

現状の適用範囲では鋼管厚さの制限等もあり、建物や地盤にもよるが必ずしも合理的な鋼管厚さとなっていない場合もある。

3) 杭頭回転ばねの効果と課題

今回の杭頭回転ばねのモデル化においては、初期剛性の設定等が結果に大きく影響した可能性がある。解析結果では杭頭回転ばねが塑性化しない場合でも、杭頭回転ばねを用いていないモデルと比べて杭頭応力が大きく低下する現象が見られ、これは杭頭回転ばねを 2 折れ線モデルに置換した際の初期剛性の設定が影響していると考えられるため、今後の検証が必要である。

(2) 継続使用可能な応力に納める工夫を考える

既製コンクリート杭は、工業製品であることからその製品規格に従った構造性能が安定して保証される一方、杭断面が高強度コンクリートを使用した薄肉断面であり、そのままの部材として靱性能を期待することは困難である。既製コンクリート杭の活用においては、先に紹介した二つの工法など、薄肉プレキャストコンクリート部が圧壊、爆裂的な脆性破壊を生じさせないための工夫が必要である。

また、杭材等は一般に目視確認（地震後の点検）が困難な地中部となるため、その限界時点での杭材の状況ならびに性能限界に至るまでの損傷の様子を、設計者へは勿論のこと建物所有者に対しても共通認識として示しておく必要があると考える。（構造実験で得られる杭体の損傷状況：写真，図，ひび割れの状況）

共同住宅B：【目標ランクA】の試設計として、杭頭半剛接合工法による一例を示した。現状では引張軸力への適応に限界はあるものの、杭頭の応力自体を抑える工夫として今後期待したいところである。

今回の試設計の結果から、パイルキャップの設計は杭頭応力で決まりパイルキャップの保証設計が杭基礎設計のクリティカルになりうることが読み取れる。

今後、杭頭応力（曲げモーメント）自体を抑える工夫・提案を含めて設計の適用範囲が広がり、既製コンクリート杭の継続使用性を期待した設計法の選択肢が広がることを期待する。

参考文献

- [7-1] 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）
- [7-2] 岸田慎司，向井智久，渡邊秀和：場所打ちコンクリート杭のパイルキャップの破壊性状の検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.43 No.2, pp.121-126, 2021.7