4.3 損傷杭の補修に適用した高圧噴射撹拌工法

1. はじめに

地震動によって基礎杭に被害が生じると建物が傾斜して、継続使用できない場合がある。 一般的に、既存建物の杭の補修・補強には多大な工期・工費を要するため、上部構造物に 大きな損傷が見られない場合であっても、既存建物を解体・撤去するケースが多い。近年 の災害経験を通じて、迅速な復興という観点から、補修・補強によって建築物の継続使用 を可能とする技術が求められており、杭の被害に対してもより簡便で確実な補修方法が望 まれている。

2016年に発生した熊本地震で、杭に被害を受けた共同住宅(表 1)を対象として、損傷 杭の補修計画が検討された。補修方法として、工期が短く、工費も比較的安価な高圧噴射 撹拌工法による地盤改良が検討された。高圧噴射撹拌工法による補修・補強効果は、「原位 置での鉛直載荷試験」および「原位置地盤条件と同様と考えられるサイトにおける水平載 荷試験」によって確認された。実際の施工にあたっては、水平載荷試験の結果に基づき、 第三者機関による個別評価が取得されている。ここでは、施工だけでなく、鉛直載荷試験 および水平載荷試験についても紹介する。

なお、対象建物の2棟は隣接した建物であり、設計、施工方法などが同じであるために、 主に1棟のみの事例を紹介する。

竣工	1985 年	
規模・戸数	地上5階・20戸(2棟)	
建築面積・延床面積	$271 \text{ m}^2 \cdot 1354 \text{ m}^2$	
構造種別	鉄筋コンクリート造	
基礎構造	中掘り先端根固め工法 杭種:PHC-A 種、杭径:φ600mm、杭長:L=37.0m	
	杭支持力 : 長期 Ra = 130 tf/本 [Ra = 1275 kN/本]	

表 1 建物·基礎構造諸元¹⁾

2. 地盤調査および設計

2.1 地盤調査

土質柱状図と改良深度を図1に示す。表層2~3m程度の埋土の下に、黒ボク・赤ボクを 含むローム層、凝灰質粘性土層が堆積している地質構造である。

2.2 設計

地震後に、建物の傾斜等の被害調査が実施された。また一部の杭についても被害調査が

実施された。杭頭部の目視調査の結果、杭頭部 1m の範囲においてせん断クラックが発生し ている杭が確認された。同時に杭の IT 試験による健全性の調査も行われた。IT 試験結果か ら、杭頭部の被害が目視確認されなかった杭においても、地中部での損傷が疑われる杭が あった。そこで、補修設計方針として、損傷が確認された杭は当該建物の杭のうち一部の みであったが、損傷が認められなかった健全な杭についても同様の地盤改良が計画された。 その理由は、地盤改良による補修後も杭頭部付近の水平剛性をすべての杭で同等なものと するためである。

図2 に補修計画図を示す。改良長は、設計用水平力に対する変動軸力による杭と地盤改 良体の付着長さと、杭のIT 試験結果により損傷が確認された深度を考慮して、杭頭から10 m とされた。設計基準強度 F_cは後述の水平載荷試験で計画した最大荷重を考慮して2000 kN/m²に設定された。



3. 地盤改良の概要

3.1 施工方法

高圧噴射撹拌工法による杭頭部補修の概念図を図3に示す。杭1本のフーチングについて、対角線上の2か所に造成ロッドを建て込み、ロッド下端より所定の圧力で固化材スラリーを噴射させながら揺動させ、90°(1/4円形)ずつ施工して損傷杭を巻き込むように矩形の地盤改良体が築造された。事前の室内配合試験および試験施工を基に現場配合は固化材添加量463 kg/m³、水固化材比は99%に設定された。地盤改良の仕様を**表2**に示す。



表2	地盤改良の仕様	
12 2		

項目		仕様
工法		高圧噴射撹拌工法
改良長	(m)	10
設計基準強度 Fc	(kN/m^2)	2000
固化材の種類		工法専用固化材
固化材添加量	(kg/m^3)	463
添加方法		スラリー添加 (W/C=99%)

3.2 施工管理

高圧噴射撹拌工法の本工事における施工管理項目を**表 3** に示す。これに加えて、施工中の建物の傾斜角を管理した。建物の傾斜角が管理値 θ = 1/300(角度 0.19°)を越えた場合には、施工が中止される。

イモ	体细话口	管理方法		签用店	
上住	官理項目	手法	頻度	官埋値	
杭芯出し	コラム芯位置	測量機器で測量	全数	計画位置	
削孔	芯セットの位置	コラム芯に削孔用パイプを合わせる	全数	5cm以内	
	据付精度	施工機の据付精度(鉛直度)のチェック		±0.1°以内	
	削孔深度	削孔用パイプの残尺と全長の計測	全数	計画值以上	
造成	改良開始深度	造成ロッドの残尺と全長の計測	全数	計画値	
	改良終了深度	造成ロッドの残尺	全数	計画値	
	噴射圧力	圧力計	全数	計画値(MPa)±5%	
	単位噴射量 流量計 圧縮空気圧力 圧力計		全数	計画値(0/分)±5%	
			全数	0.6MPa以上	
	圧縮空気量	風量計	全数	2~6Nm ³ /分以上	
	回転数	回転計(ストップウォッチで確認)	全数	計画値(rpm)	
	引上げ時間	ステップタイマー	全数	計画值以上	
	固化材	目視(使用材料の種類,使用量)	納入毎	計画使用量以上	
	スラリー比重	比重測定器(マッドバランス)	1回/日	計画值±0.02以内	
	排泥噴出状況	常時噴泥	全数	常時噴泥	
	穴埋め・洗浄	穴埋め	全数	穴埋め	

表 3 施工管理項目

3.3 施工状況

施工状況を図4に示す。室内施工(図4a))では、養生シートなどで室内防護を十分に行ったうえで、分解した小型施工機を空頭1.8 m 程度のベランダから搬入した。その後、小型施工機を組立ててから、施工が行われた。排出した未固結改良体は、スラブ下に深さ1.5 m 程度の釜場を設置して、強力サンドポンプにより圧送された。

一方、屋外施工(図4b))では、通常サイズの施工機を小型クローラクレーンでの揚重作 業により移動させながら、施工が行われた。排出した未固結改良体については、室内施工 と同様に釜場を設置して、強力サンドポンプにより圧送された。





図 4 施工状況 a) 室内 b) 室外 ¹⁾

3. 4 品質検査

品質検査は、「2018 年版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」³⁾に従い、 100 コラム(改良体)で1箇所以上の頻度でコアサンプリングされ、改良体の強度と連続性 の確認が実施された。 強度は、材齢 28 日のコアの一軸圧縮試験(JIS A 1216:2009)によって検査が行われた。 図 5 に一軸圧縮強さの深度分布を示す。同図には、検査対象層である「ローム層」、「凝灰 質粘性土層」の地層区分線も併記している。表 4 に改良体品質の判定結果を示す。いずれ の検査対象層についても、平均強度は式(1)により算出した合格判定値を上回った。なお、 ローム層下部において、黒ボク・赤ボクが介在したために、強度発現の低下が引き起こさ れたことにより、ローム層全体の変動係数は凝灰質粘性土層と比べて大きかった。



表4 改良体品質の判定結果¹⁾

百日	単位	検査対象層			
坦日		ローム層	凝灰質粘性土層		
試験数	個	27	27		
最大強度		9963	10948		
最小強度	kN/m²	2216	4530		
平均強度		5364	7426		
標準偏差		2074	1560		
合格判定值		4696	4028		
変動係数	%	38.7	21.0		
判定結果	_	0	0		

$$X_L = F_c + k_b \cdot \sigma_n \qquad \cdots \not \exists (1)$$

ここに、 X_L : 合格判定値 (kN/m^2) F_c : 設計基準強度 (kN/m^2) k_b : 合格判定係数 (1.3) σ_n : 一軸圧縮強さの標準偏差 (kN/m^2) 改良径および連続性は、採取コアの採取率によって検査が行われた。図6にボーリング コアとコア採取率の一例を示す。全長のコア採取率は98%であった。同時にサンプリング した他のコア(2本)についても、全長のコア採取率(90%以上)かつ1mごとの採取率 (85%以上)の基準を満たした。

深度 GL –(m)		
-170	-2 70	07
1.70 Long to the top top the top top the top top top the top	2.70	51
-2.70	-3.70	100
-3.70	-4.70	100
-4.70	-5.70	95
-5.70	-6.70	100
-6.70	-7.70	95
-7.70	-8.70	100
-8.70	-9.70	100
-9.70	-10.70	100
-10.70	-11.70	95
-11.70	-12.70	100

図6 ボーリングコアとコア採取率の一例¹⁾

4. 杭の補修・補強効果のための原位置載荷試験(鉛直支持性能・水平抵抗特性)

上述の補修工事に先立ち、工事対象の共同住宅に隣接する建物について、上部構造を解体した後、基礎を残した状態で、高圧噴射撹拌工法による杭基礎の補修効果を確認するため、原位置載荷試験が行われた。

4. 1 鉛直支持性能に対する補修・補強効果^{4)、5)}

損傷を受けた杭は PHC 杭 (φ=500 mm、L = 39 m) である。杭周辺地盤を掘削して杭 の損傷状況を目視確認した結果、杭頭 1 m 程度の位置に圧縮破壊が確認された (図 7)。掘 削土を埋め戻し、高圧噴射撹拌工法で補修が行われた後、「杭の押込み載荷試験方法

(JGS1811-2002)」による鉛直載荷試験が実施された。なお、高圧噴射撹拌工法の仕様は、 設計基準強度 F_c = 1500 kN/m²、改良長 2.0 m(杭頭から)、改良体半径 r = 1.5 m である。

図8に鉛直載荷試験システムを示す。鉛直載荷試験の荷重載荷方式は、段階載荷方式・ 多サイクルとして、最大荷重3600kNの計6サイクル(600kNを1サイクル)に設定さ れた。この値は、杭が打設された当時の設計図書による杭の長期許容鉛直支持力110t(≒ 1078kN)の3倍(3234kN)の値であり、杭先端抵抗と周面摩擦を考慮した式によって算 出される極限支持力 Ruと概ね整合する値である。

図9に鉛直載荷試験結果の鉛直荷重·沈下関係を示す。同図より、最大荷重(3600 kN)時におけるフーチングの沈下量は8.7 mmであった。一般的に杭の極限支持力の判定に用い

られる第2限界抵抗力における杭先端沈下量は杭径の10%(今回では50mm)であるが、 本載荷試験の先端沈下量はこの値より小さい。したがって、この損傷した杭と地盤改良体 による基礎の極限支持力の値は、3600 kN をさらに上回ることが推察される。しかし、杭 と地盤改良体の複合構造の鉛直支持力発現機構は杭単体と異なると考えられ、解明は今後 の課題とされている。



4. 2 水平抵抗性能に対する補修・補強効果^{6)、7)}

試験サイトに3本の試験杭が打設された。3本の試験杭はPHC杭($\phi = 600 \text{ mm}, \text{L} = 12.0$ m) で埋込工法にて打設された。水平抵抗特性に対する補強効果を確認するために、計 3 ケース(図 10 参照)の水平載荷試験が実施された。【No.1】は、地盤改良体を施さない杭 で、【No.2】と【No.3】は、高圧噴射撹拌工法で地盤改良体を頭部に施した杭である。また、 【No.3】は、人工的に杭頭部 1m の範囲を損傷させて、杭頭部において曲げ・せん断抵抗 が働かないようにされている。なお、高圧噴射撹拌工法の仕様は、設計基準強度 $F_c = 2000$ kN/m²、改良体半径 r = 1.5 m である。

図 11 に水平載荷試験システムを示す。水平載荷試験は、「杭の水平載荷試験方法 (JGS1831-2010)」に基づき、設計用水平荷重 180 kN までは段階載荷方式による単サイ クルー方向載荷、その後段階載荷方式による多サイクル正負交番載荷試験が実施された。

図 12 に水平載荷試験結果の水平荷重・水平変位関係(負側の荷重・変位関係は省略)を示す。同図より、【No.1】は、設計用短期水平荷重(180 kN)を越えると水平剛性が低下し、

約 330 kN に到達後、荷重低下が確認された。杭頭周辺に地盤改良が施された【No.2】と 【No.3】は、いずれも【No.1】に比べ、最大水平荷重および水平剛性が増加したものと考 えられる。なお、【No.2】と【No.3】においては、脆性的な破壊挙動を示しているが、最大 荷重到達以降(ここでは仮に、y=45 mm 時)の水平抵抗力は、それぞれ 416 kN、376 kN 程度を保持しており、【No.1】の最大水平抵抗力 330 kN よりも大きい。このことは、地盤 改良体にひび割れが発生した後も、地盤改良体が存在することにより杭のみの場合よりも 地盤抵抗を受ける面積が前面、底面含めて大きいためと推察される。



図 11 水平載荷試験システム⁷⁾

図 12 水平荷重一水平変位関係 ^{7)に加筆}

5. おわりに

地震により損傷した杭について、杭頭部を高圧噴射撹拌工法により補修した事例を紹介 した。本事例において、建築物の本設の地盤改良の品質として、統計的なばらつきを考慮 した強度の基準を満足し、地盤改良体としての連続性についても満足したことを示した。 また、本補修設計が採用される契機となった、杭の補修・補強効果についても併せて示し た。

杭・地盤・地盤改良体の3種類の複合構造における鉛直・水平荷重伝達メカニズム、支持性能、抵抗特性の把握について、実施された事例はほぼ皆無である。杭の補修・補強技術の実装は、インフラストック時代における都市の強靭化の観点から急務の課題であり、 社会実装に向けた活動が行われている^{例えば8)}。 【参考資料】

- 鎌田 敏幸 ほか:杭の補修・補強のための高圧噴射撹拌工法による地盤改良とその適用、第14回地盤改良シンポジウム、pp.455-462 (2020).
- 2) 鎌田敏幸 ほか:高圧噴射撹拌工法による杭の補修・補強効果について、令和元年度土 木学会全国大会第74回年次学術講演会、Ⅲ-119(2019).
- 3) 日本建築センター・ベターリビング:2018 年版 建築物のための改良地盤の設計及び品 質管理指針(2018).
- 4) 島村 淳 ほか:高圧噴射撹拌式の地盤改良による損傷杭の補修・補強に関する研究(その1)補修・補強方法と実大実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、 pp.507-508 (2018).
- 5) 井上波彦 ほか:高圧噴射撹拌式の地盤改良による損傷杭の補修・補強に関する研究(その3)載荷試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.511-512 (2018).
- 6) 島村 淳 ほか:高圧噴射撹拌式の地盤改良による既存杭の補修・補強に関する研究(その1)補修・補強方法と実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、 pp.643-644 (2019).
- 7) 井上波彦 ほか:高圧噴射撹拌式の地盤改良による損傷杭の補修・補強に関する研究(その3)水平載荷試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.647-648(2019).
- 8) 国立研究開発法人建築研究所:令和元年度「革新的社会資本整備研究開発推進事業 (BRAIN)」の採択課題について.

https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/kakushinjigyou/pdf/saitaku_kadai_r01.pdf (2021 年 9 月現在)