

鋼管巻き PHC 杭 (SPHC 杭) に関する研究—その 4 解析結果

正会員 ○毛井 崇博*4 正会員 加倉井正昭*1
 正会員 桑原 文夫*2 正会員 林 隆浩*3
 正会員 萩原 昌宏*5 正会員 吉田 新治*6
 正会員 浅井 陽一*7

SPHC 杭 累加強度 全塑性耐力
 曲げ解析 M-φ 関係 変形性能

1. はじめに

前報の試験結果について、累加強度式や全塑性耐力式の適用性の検討、及び断面分割法による曲げ解析による構造性能の比較検討を行った。

2. 累加強度式及び全塑性耐力式による検討

表.1 に鋼管の引張降伏強度時の曲げ強度 M_y と PHC 杭と鋼管の累加強度による算定値について、表 2 に最大曲げ強度 M_{max} と累加強度および全塑性耐力算定値の比較を示す^{1)~3)}。全塑性耐力の算定では、簡易的にグラウト材をコンクリートとみなし、PC 鋼材を無視している。

表.1 鋼管引張降伏時の累加強度の比較

試験体名	実験値 ($\times 10^{-6}/\text{mm}$)		PHC+S*1 累加(kN・m)			$M_y/$ SPHC M_y	
	M_y	Φ_y	PHC	S	SPHC		
			PHC M_y	s M_y	SPHC M_y		
シリーズ1	S0P5A-0m	-	-	-	-	-	
	S6P5A-0m	1,068	5.0	124	933	1,057	1.01
	S6P5A-0	1,090	5.2	124	933	1,057	1.03
	S6P5C-0m	1,199	5.5	290	933	1,223	0.98
	S6P5C-0	1,215	5.4	290	933	1,223	0.99
シリーズ2	S6P5A-N	1,145	5.8	124	1,027	1,151	0.99
	S6P5A-L	1,262	5.6	315	1,027	1,342	0.94
	S6P5A-H	1,349	6.3	447	1,027	1,474	0.92
曲げせん断	S5P4A-L	952	8.8	236	577	812	1.17
	S5P4A-H	986	8.4	322	577	899	1.10
	S5P0-H	1,075	9.5	-	-	(993)	(1.08)

*1 SPHC $M_y = \text{PHC}M_y + sM_y$ $sM_y = s \sigma_y sZ$ PHC $M_y = \min(pM_y, cM_y)$
 PHC M_y : PC 鋼材引張降伏またはコンクリート圧縮降伏強度時の M

鋼管引張降伏強度時の M_y は実験値と累加強度値の比率が 0.92~1.17 であり実験値は算定値とほぼ等しくなった。最大曲げ強度 M_{max} は、ほぼ 1.2 倍以上あり累加強度値は十分に安全側になった。全塑性耐力 M_u は、曲げ試験では実験値に対して 1.1~1.2 倍であり、曲げせん断実験ではほぼ 1.0 であった。曲げ試験体の方が M_{max}/M_u が大きな値を示したのは、鋼管径厚比 ($D/t=66.7, 83.3$) の違いもあるが、PHC 杭に内蔵された PC 鋼材の影響が大きいと考えられる。即ち、試験体の曲げ変形に伴い、付加軸力の増大やせん断抵抗が作用するためと考えられる。

3. 曲げ解析 (断面分割法) による検討

鋼管と PHC 杭の一体性 曲げ解析に先だって、鋼管と PHC 杭の一体性を確認するために、鋼管と PHC 杭の曲率を比較した。ひずみ分布が明瞭な単調載荷試験体 [S6P5C-0m] (その 2 参照) について検討した。図 1 に、鋼管の曲率 $s\phi$ と PHC 杭の曲率 $\text{PHC}\phi$ の比 $\text{PHC}\phi/s\phi$ を示す。 $s\phi$ と $\text{PHC}\phi$ は各々の上端と中央と下端のひずみから上部および下部の曲率を求めた。なお、鋼管上部の曲率 $s\phi_{上}$ と鋼管下部の曲率 $s\phi_{下}$ と鋼管全体の曲率 $s\phi$ ($=(\epsilon_{下} - \epsilon_{上})/D$) は、全体にわたりほぼ等しかった。下部引張側と上部圧縮側共に PHC 杭に曲げひび割れが入ったと推定される荷重 ($M/M_{max} \approx 0.30$) まで $\text{PHC}\phi/s\phi$ は約 1.0 であり、 $s\phi$ および $\text{PHC}\phi$ は上部と下部でほぼ同

表.2 最大曲げ強度時の累加強度と全塑性耐力の比較

試験体名	実験値 ($\times 10^{-6}/\text{mm}$)		PHC+S*2 累加(kN・m)			$M_{max}/$ SPHC M_{max}	全塑性*3			$M_{max}/$ SPHC M_u	
	M_{max}	Φ_y	PHC	S	SPHC		cM_u	sM_u	M_u		
			PHC M_{max}	s M_{max}	SPHC M_{max}						
シリーズ1	S0P5A-0m	193	3.6	180	-	180	1.07	-	-	-	-
	S6P5A-0m	1,848	43.0	180	1,206	1,386	1.33	782	911	1,693	1.09
	S6P5A-0	1,879	36.9	180	1,206	1,386	1.36	782	911	1,693	1.11
	S6P5C-0m	2,058	47.5	400	1,206	1,606	1.28	782	911	1,693	1.22
	S6P5C-0	2,027	31.3	400	1,206	1,606	1.26	782	911	1,693	1.20
シリーズ2	S6P5A-N	2,241	28.2	187	1,327	1,514	1.48	827	1,020	1,847	1.21
	S6P5A-L	2,298	23.0	377	1,327	1,704	1.35	955	1,069	2,024	1.14
	S6P5A-H	2,442	29.0	536	1,327	1,863	1.31	1,084	1,106	2,190	1.12
曲げせん断	S5P4A-L	1,233	40.5	279	744	1,023	1.21	627	606	1,233	1.00
	S5P4A-H	1,395	44.9	391	744	1,135	1.23	750	643	1,393	1.00
	S5P0-H	1,320	39.9	-	-	(1271)	(1.04)	723	652	1,375	0.96

*2 SPHC $M_u = \text{PHC}M_u + sM_u$
 $sM_u = s\sigma_y Z_p$
 PHC M_u : PHC 杭圧縮側コンクリートが終局ひずみ (0.5%) 時の M
 *3 全塑性耐力式
 $M_u = cM_u + sM_u$
 $cM_u = \sin^3\theta_n cD_o^3 c\sigma_y / 12$
 $\theta_n = \cos^{-1}(1 - 2x_n/sD_o)$
 x_n : 中立軸位置
 $sM_u = (\beta_1 + \beta_2)/2 \cdot \sin\theta_n \cdot (sD_o - st)^2 \cdot st \cdot s\sigma_y$
 β_1, β_2 : 鋼管の圧縮・引張側強度比 ($\beta_1=0.89, \beta_2=1.08$)
 注) SC 杭の M_y および M_{max} の算定値は曲げ解析(断面分割法)による

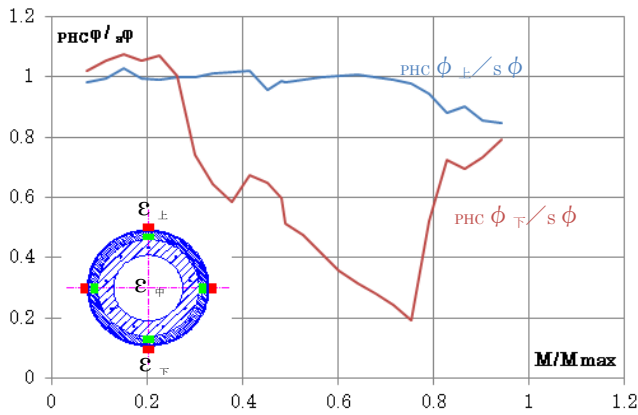


図.1 鋼管とPHC杭の曲率比 $[\phi_{上} = \frac{\epsilon_{中} - \epsilon_{上}}{D/2} \quad \phi_{下} = \frac{\epsilon_{下} - \epsilon_{中}}{D/2}]$

じである。その後、PHC 杭の曲げひび割れにより、下部引張側 PHC $\phi_{下}/s\phi$ は、低下しているが、上部圧縮側 PHC $\phi_{上}/s\phi$ は、最大荷重の約 80%程度までほぼ 1.0 で推移し、 $s\phi_{上}$ と PHC $\phi_{上}$ はほぼ同じである。最大荷重の約 80%位付近から、PHC $\phi_{上}/s\phi$ は約 80%低下しているが、これはグラウトの圧壊により鋼管の拘束効果が発揮され軸方向ひずみに影響がでたと推定される。従って、最初から最大荷重まで、鋼管と PHC 杭が一体化して挙動していると見なせることがわかる。

材料のモデル化 各材料の応力度 σ —ひずみ度 ϵ 関係は、従来の曲げ解析 ϕ - M を参考にして、鋼管はバイリニア ($s\sigma_y, sE=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)、コンクリートはバイリニア (圧縮降伏強度 $0.85c\sigma_B, cE=4.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 圧縮限界ひずみ 0.5%), PC 鋼材はトリリニア (引張限界ひずみ 5%) とした。グラウト材は、鋼管と PHC 杭で拘束されていることからバイリニアとし限界ひずみは設定していない。なお、圧縮試験結果からグラウト材のヤング係数 gE は $1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とした。各材料強度は材料試験結果を用いた。

主要仮定および解析結果 鋼管・グラウト・PHC 杭が一体となって曲げ抵抗するものとして、断面を 40 分割して解析した。PC 鋼材の初期プレストレスト応力度 σ_e は比較的小さく、鋼管の降伏強度や最大耐力への影響が小さいために無視した。また、グラウト材をコンクリートとみなし、PC 鋼材を無視して簡略化した曲げ解析 (SC 杭置換) でも行った。

図.2 と図.3 に高軸力を載荷した曲げ試験および曲げせん断試験体の実験および曲げ解析による M — ϕ 関係を示す。実験における曲げひび割れ発生荷重は、PHC 杭表面の引張ひずみが急変した前の荷重である。曲げ試験では、 $0.85c\sigma_B$ とすることにより最大荷重は低めに評価されているが、降伏時の曲率 ϕ_y も含めてほぼ良好に

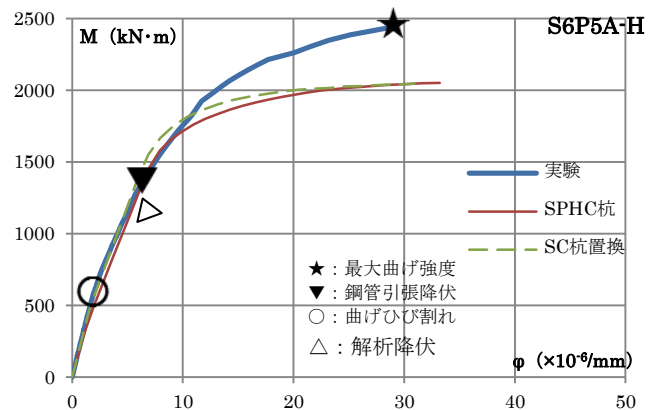


図.2 曲げ試験体の M - ϕ 関係

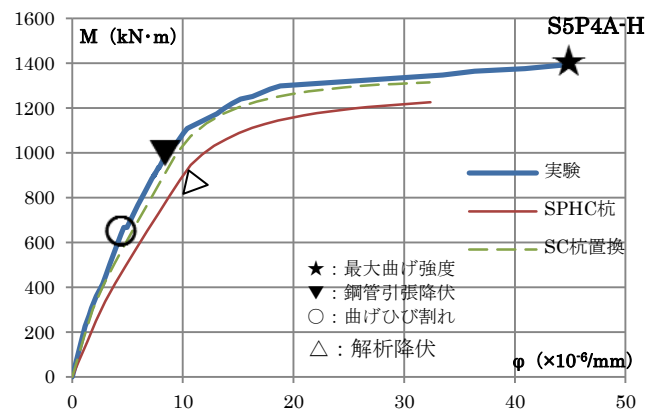


図.3 曲げせん断試験体の M - ϕ 関係

実験値を推定できている。曲げせん断試験では、実験では曲げ勾配もあり、解析値の剛性は実験に比べて低めであり、 ϕ_y も大きめに評価する。

4. おわりに

複合材からなる中空合成断面 SPHC 杭に対して、鋼管引張降伏強度時や最大荷重時の曲げモーメントの算定は、累加強度や全塑性耐力で安全側に評価できること、曲げ解析は、曲げ試験では良好に実験値を推定できることを明らかにした。

謝辞

本研究の取りまとめの多くは、九工大前学部生・作本尚弥 & 石川元喜君、前大学院修士生岩永匠君によるものです。

参考文献

- 1) (一社) 日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」2008年10月
- 2) 松井千秋「コンクリート充填鋼管構造」2009年2月
- 3) 毛井・加倉井他「鋼管補強した PHC 杭に関する研究」(その1) ~ (その3) 建築学会九州支部報告 2014年3月
- 4) (一社) 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、2009年5月
- 5) (一社) 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」土木編、2003年4月
- 6) (一財) 日本建築センター「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」1995年6月
- 7) (一財) 国土技術研究センター「SC くい設計指針」1979年8月

*1,*2 パイルフォーラム(株),*3 丸門建設(株),
*4 九州工業大学,*5 日本コンクリート工業(株),
*6 三谷セキサン(株),*7(株)トーヨーアサノ

*1,*2Pile Forum,*3Marumon Construction,
*4Kyushu Institute of Technology,*5Nippon Concrete Industries,
*6Mitani Sekisan,*7Toyo Asano Foundation