

報 告

[1155] 逆打工法における構真柱の施工性に関する実験研究

正会員○柳田克巳（鹿島建設技術研究所）

正会員 和美広喜（鹿島建設技術研究所）

田村直久（鹿島建設東京支店）

小西昭臣（鹿島建設東京支店）

1. はじめに

逆打工法は、地上・地下の同時躯体施工による工期短縮、構台・切梁をはじめとする仮設工事量の低減など、種々の省力化が図れる工法の一つである。当工法においては、上部躯体の施工を地下躯体の完了前に着手するため、あらかじめ構真柱と呼ばれる鋼材を杭中に建て込んでおき、上部躯体の施工時荷重を構真柱と杭コンクリートの付着によって支持地盤に伝達する必要がある。

構真柱の施工は、杭コンクリート打設前に行う場合と打設後に行う場合とがあるが、杭底のスライム処理後直ちにコンクリートを打設できる後者の施工手順を取る方が品質を確保する上で有利である。この場合、コンクリート打設後から構真柱を建て込むまでの間に、トレミー管の除去、構真柱建入れ架台のセット、構真柱の揚重・建て込み精度調整などの作業が生じる。従って、杭コンクリートは打込み終了から数時間のあいだ、構真柱を挿入できるだけの流動性を保持していることが必要である。

また、構真柱建入れ後の建入れ架台は、杭の生産性を向上するため、翌朝には別の杭へ転用するのが通常である。従って、杭コンクリートは、支持架台を取去った時点で構真柱が自立するだけの付着強度を発現していることが必要となる。

上記の背景に基づき、構真柱の施工性について、実験室実験、現場施工実験および実施工時の測定からなる一連の実験検討を行った。本報告はその結果についてまとめたものである。

2. 構真柱のコンクリートへの挿入抵抗に対する考え方

図-1に示すとおり、構真柱の受ける挿入抵抗は、構真柱先端の断面に働く抵抗力 p 、側面に働く摩擦抵抗力 τ および浮力に分解して考えることができる。 p および τ がコンクリートの流動性状と鋼材の種類によって一定であると仮定すると、構真柱全体が受ける挿入抵抗値 R の大きさは以下のとおり表せる。

$$R = Ap + \tau \psi l + \rho A l \times 10^{-3}$$

$$= Ap + (\tau \psi + \rho A \times 10^{-3}) l \quad \dots\dots\dots (1)$$

R : コンクリートから受ける抵抗の大きさ(kgf)

A : 構真柱の断面積(cm^2) ψ : 構真柱断面の周長(cm)

p : 構真柱の先端断面の抵抗応力(kgf/cm^2)

τ : 構真柱の表面の摩擦応力(kgf/cm^2)

ρ : コンクリートの比重 l : 構真柱の挿入深さ(cm)

従って構真柱の挿入抵抗 R は挿入深さ l に比例し、 R と l の関係から p と τ の値を求められる。ここでは、コンクリート練り混ぜから2～5時間後の挿入抵抗について検討した。

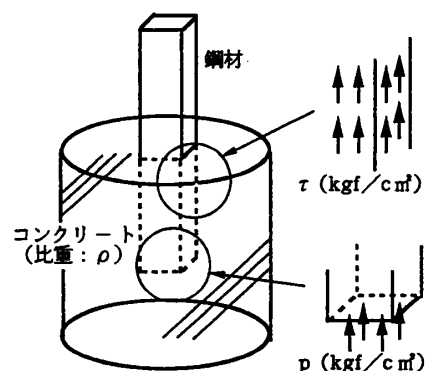


図-1 鋼材が受ける抵抗

3. 実験室実験

3. 1 実験概要

実験室実験では、コンクリート調合の各因子（水セメント比、温度、高性能AE減水剤の添加量）が以下の項目に与える影響を検討した。

(1)コンクリート練り混ぜから2～5時間後における貫入抵抗の大きさ

(2)コンクリート練り混ぜから24時間までの初期強度発現

3. 2 実験計画

(1)実験の因子と水準

実験の因子と水準を表-1に示す。シリーズ1では、水セメント比およびコンクリート温度を実験要因とし、挿入抵抗と初期強度発現について検討した。また、混和剤として高性能AE減水剤（以下SP剤）の標準型を使用し、その添加量によってスランブの値を調整した。シリーズ2では、SP剤（遅延型）の添加量を実験要因とし、細骨材率によってスランブの値を調整した。

(2)コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-2に示す。

(3)試験項目と試験方法

a.スランブ・空気量・コンクリート温度 スランブはJIS A 1101に、空気量はJISA 1128によって測定した。コンクリート温度は棒状温度計によって測定した。

b.凝結試験

凝結試験は、ASTM C 403に準じて行った。また、鋼材の挿入抵抗の値を想定し、貫入抵抗が100psiに達するまでの経過時間についても求めた。

c.鋼材貫入試験

鋼材貫入試験は、プロクター貫入計の貫入針を鋼材（断面2×2cm、長さ30cm）に替え、これを円筒状の金属製容器（内径30cm、内高43.5cm）に詰めたコンクリート中に鉛直に貫入して行った。貫入に要した力（kgf）を貫入抵抗と定義し、貫入深さが2.5cm進むごとに貫入抵抗を読み取った。貫入の速さは、貫入深さ2.5cmあたり10秒を目安に一定とした。これを3回繰り返し、貫入抵抗の平均値をとって試験結果とした。シリーズ1ではコンクリート練り混ぜ後2,3,4時間経過した時点で、シリーズ2では3,4,5時間経過した時点で試験を行った。

d.初期圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ10×20cmの供試体をJIS A 1129に準じて作成し、材令6,8,12,16,24時間および3日で、JIS A

表-1 実験の要因と水準

実験 シリーズ	実験の因子	水セメント 比 (%)	コンクリート 温度 (℃)	スランブ (cm)	高性能AE減水剤	
					種類	添加量 *
1	水セメント比 コンクリート温度	50, 55	20, 30	20	標準型	1.6～1.8%
2	高性能AE減水剤 の添加量	50	30	20	遅延型	1.7, 2.0, 2.3, 2.5%

(*) 添加量はセメント量に対する比率を表す

表-2 コンクリートの調合

実験 シリーズ	調合 No.	W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	重量調合 (kg/m ³)			高性能減水剤	
					C	S	G	種類 *	添加量
1	1	55	50	180	327	886	914	SP-N	1.6
	2	55	50	180	327	886	914	SP-N	1.7
	3	50	50	180	360	872	899	SP-N	1.7
	4	50	50	180	360	872	899	SP-N	1.8
2	5	50	50	180	360	872	899	SP-R	1.7
	6	50	53	180	360	925	845	SP-R	2.0
	7	50	56	180	360	975	791	SP-R	2.3
	8	50	58	180	360	1011	756	SP-R	2.5

(*) SP-N: 高性能AE減水剤標準型、SP-R: 高性能AE減水剤遅延型

1108に準じて行った。試験体の本数は各材令で3本とし、練り混ぜ温度と同温度の養生室で所定の材令まで封緘養生を行った。

3. 3 実験結果と考察

(1) コンクリートの貫入抵抗

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3に示す。各調合において、スランブは目標値(20 cm) ± 1.0 cm、温度は目標値 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ の範囲の値を得ることができた。

凝結試験結果を図-2に示す。貫入抵抗値が100psiに達するまでの時間は、シリーズ1では、水セメント比が小さく温度が低いほど遅れ、シリーズ2では、SP剤の添加量が多い場合ほど遅れる傾向を示した。

シリーズ2の鋼材貫入試験の結果を図-3に示す。貫入抵抗は、貫入深さに比例して大きくなった。貫入深さと貫入抵抗の関係から、(1)式に基づいて鋼材先端の抵抗 p と側面の抵抗 τ を求めた結果を表-3に示す。 τ の値は、水セメント比が大きい場合ほど大きくなった。これは、単位水量を一定としたため、水セメント比が大きい場合ほどコンクリート中に占める粗骨材量が大きくなり、鋼材と骨材が接触する確率が高かったことによると考える。

シリーズ2について、SP剤の添加量と p および τ の値の関係を図-4に示す。 p と τ の値は、SP剤の添加量が多い場合ほど小さくなる傾向を示し、経過時間とともにこの傾向は明確になった。添加量2.3%以下の範囲において、 p の値は4時間から5時間後に2.97~4.46倍に、 τ は3時間から4時間後に3.0~4.18倍に増大した。この結果から、遅延型のSP剤を2.3%以内の範囲で添加したコンクリートの貫入抵抗は、練り混ぜから4~5時間後の時間帯において急激に増加することがわかった。

(2) 初期圧縮強度試験

積算温度($T'T$)と圧縮強度の関係を、120~560 $T'T$ における回帰直線とともに図-5に示す。初期の圧縮強度は、既往の報告〔1〕どおり、いずれの場合も積算温度と良い相関を示した。圧縮強度の発現は、水セメント比が大きく、SP剤の添加量が増えるほど遅れる傾向を示した。また、SP剤遅延型を用いた場合(シリーズ2-No.5)の方が標準型を用いた場合(シリーズ1-No.3,4)に対して強度発現が遅れたが、積算温度が増えるとともに強度差は改善される傾向にあった。

表-3 実験室実験の結果

実験 シリーズ	調合 No.	フレッシュコンクリート			鋼材挿入試験結果 (kgf/cm ²)					
		スランブ (cm)	空気量 (%)	練り上げ 温度 ($^\circ\text{C}$)	2時間後		3時間後		4時間後	
					p	τ	p	τ	p	τ
1	1	21.0	4.3	19.0	0.072	0.017	0	0.126	0	0.209
	2	21.0	4.0	31.0	0	0.061	0	0.235	2.986	0.331
	3	21.0	4.3	19.0	0.138	0.011	0	0.070	0	0.204
	4	21.0	3.9	30.5	0.044	0.191	0	0.170	1.745	0.271
2	5	20.5	4.3	30.5	0	0.030	1.045	0.090	4.278	0.086
	6	20.5	4.0	31.0	0	0.019	0.511	0.063	2.281	0.072
	7	21.0	4.3	30.0	0.049	0.011	0.441	0.046	1.312	0.051
	8	20.5	4.1	30.5	0.001	0.014	0.086	0.027	0.956	0.029

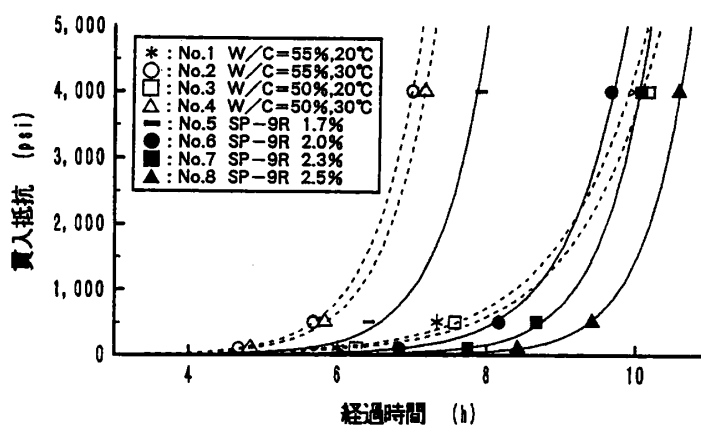


図-2 凝結試験結果

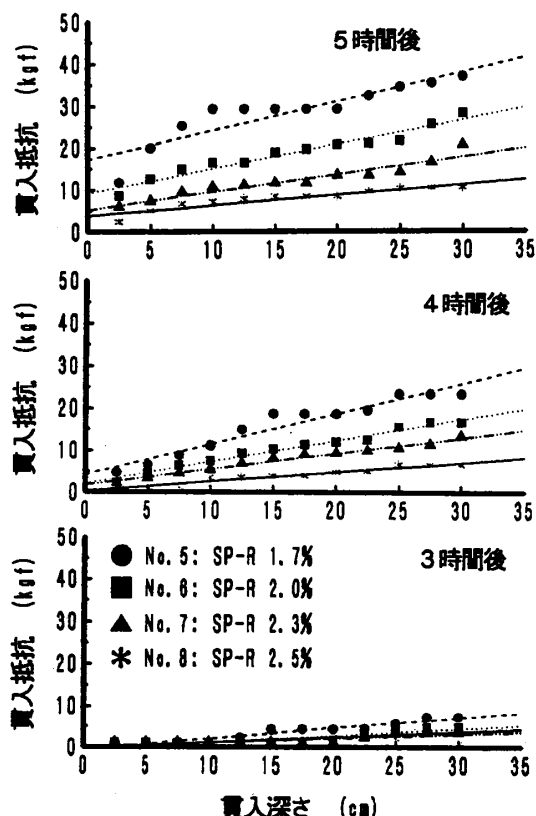


図-3 鋼材貫入試験結果(シリーズ2)

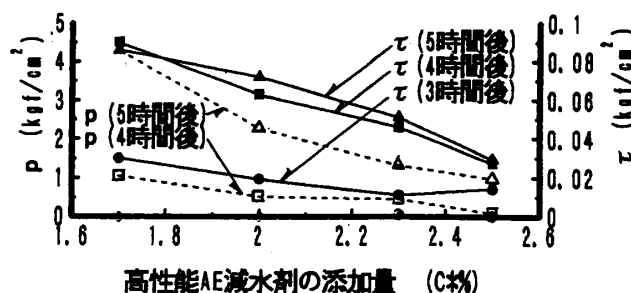
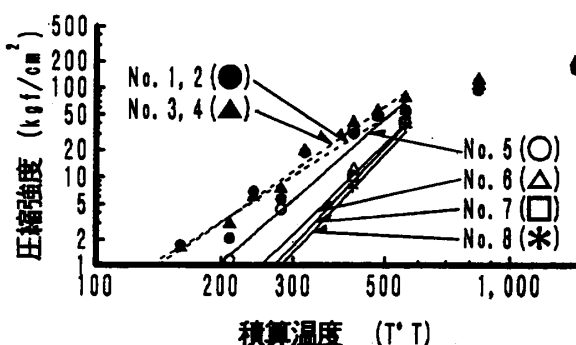
図-4 SP剤の添加量と p および τ の関係

図-5 積算温度と圧縮強度の関係

4. 現場施工実験

4.1 実験概要

現場施工実験では、実験室実験と同調合のコンクリートを用い、現場に打設した杭コンクリートの鋼材挿入抵抗について、実験室実験の結果と同等の性能が得られるかどうかを確認した。また、コンクリートと鋼材との付着強度の発現についても検討した。

4.2 実験計画

(1) コンクリートの調合

コンクリートの調合は、実験室実験のNo.6 (シリーズ2) と同調合とした。

(2) 実験項目と実験方法 (図-6 参照)

a. フレッシュコンクリート試験

実験室実験に準じて行った。

b. 鋼材挿入試験

断面150×150mmのH型鋼材にウェイトを接合し、練り混ぜ後3,4時間経過した時点で杭コンクリート中にクレーンで深さ300cmまで挿入した。このときの挿入抵抗を測定し、挿入深さとの関係から鋼材先端の抵抗 p と鋼材側面の抵抗 τ の値を算定した。

c. 鋼材引抜き試験

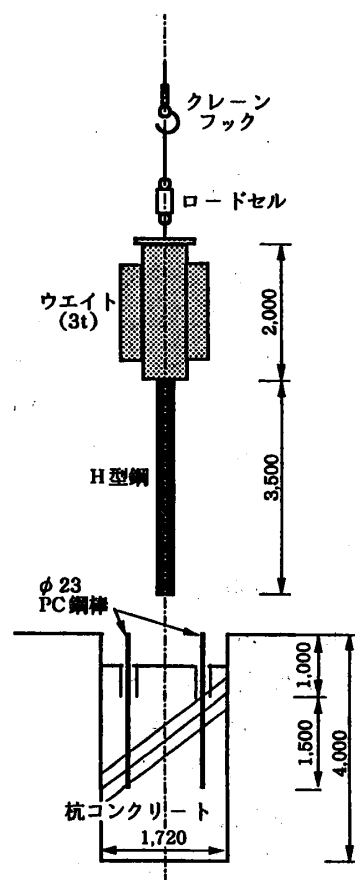


図-6 現場施工実験の概要

杭コンクリート中に深さ1.5mまで埋め込んだ $\phi 23$ PC鋼棒を、センターホールジャッキを用いて引抜き、このときの引抜き力とコンクリート中の鋼材表面積から付着強度を算定した。付着強度は、①実施工における構真柱の架台取外し時の値と、②コンクリート硬化後の最終的な値について求めた。すなわち、①については、構真柱を建て込んだ翌朝に架台を取外すという通常の施工条件を想定し、PC鋼棒先端部分のコンクリートの積算温度が 320°T (20°C , 16時間に相当)を記録した時点で試験を行った。②については、本来なら材令28日以降とするのが望ましいが、現場の都合上材令13日で実施した。また引抜き試験は、各材令で2本のPC鋼棒について行い、その平均値をとって付着強度を評価した。

4. 3 実験結果と考察

(1) 鋼材挿入試験

試験結果を表-4に、鋼材の挿入深さと挿入抵抗の関係を図-7に示す。練り混ぜから3時間後の挿入抵抗は、挿入深さによる変化の割合が小さかったが、4時間後の挿入抵抗は挿入深さに比例して増大した。

鋼材挿入試験結果から、 p と τ の値を算出した結果を表-4に示した。練り混ぜから4時間後において、 p は同調合の実験室実験結果(No.6)に対し15.5倍の大きな値を示し、逆に τ は20.5~65.2%の小さい値となった。これは、現場施工実験を夏期に行ったため、コンクリート表面の乾燥が早く、表層部の貫入抵抗が大きくなった分、コンクリート内部の側面抵抗が小さい値として評価されたものと考えられる。

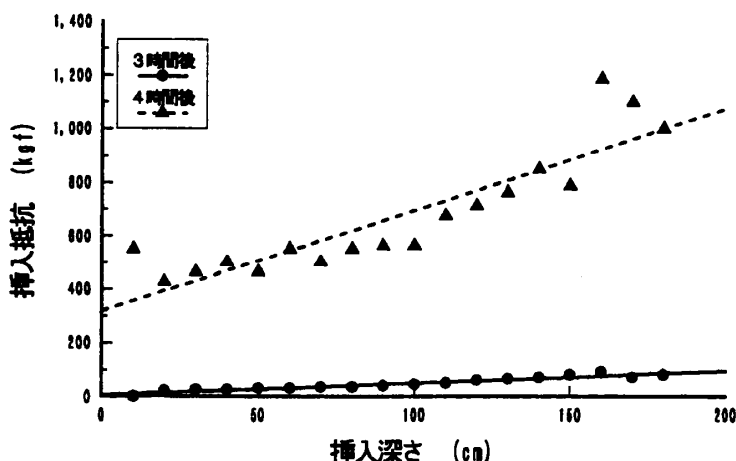


図-7 鋼材挿入試験結果

(2) 鋼材引抜き試験結果

付着強度は、積算温度 320°T 時において $1.56\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、材令13日において $7.68\text{kgf}/\text{cm}^2$ を示した。

クロスH型鋼の構真柱を例に取り、構真柱が自立するために必要な付着強度を図-8および表-5に示す。

今回の結果か

ら、積算温度 320°T において、これらの構真柱が自立できるだけの付着強度を発現していることがわかる。

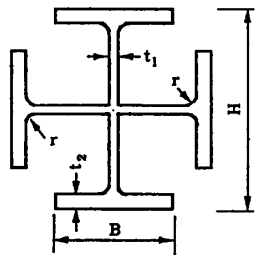


図-8 構真柱の形状

表-4 現場施工実験の結果

フレッシュコンクリート試験結果			鋼材挿入試験結果(kgf/cm^2)				鋼材引抜き試験	
スラブ	空気量	温度	3時間後		4時間後		付着強度(kgf/cm^2)	
(cm)	(%)	($^{\circ}\text{C}$)	p	τ	p	τ	320°T	13日
22.0	3.4	32.0	0.1161	0.0039	7.903	0.0411	1.564	7.687

表-5 構真柱が自立するために必要な付着強度

構真柱の寸法 (mm)				長さ	断面積	周長	重量	根入れ	必要
H × B	t_1	t_2	r	cm	cm^2	cm	kg	深さ cm	付着強度 kgf/cm^2
400 × 200	8	13	16	2,000	167.6	298.1	2,640	200	0.0443
600 × 200	11	17	22	2,000	267.6	369.8	8,480	200	0.115
600 × 300	14	23	28	2,000	442.8	441.6	14,000	200	0.159

5. 実施工時の測定

5-1 測定の概要

構真柱の実施工時において、構真柱の挿入抵抗を測定し、実験室実験の結果を検証した。測定した構真柱の概要と杭コンクリートのフレッシュ時の性状を表-6に示す。実施工時のコンクリートの調合は、実験室実験のシリーズ1-No.3と同調合である。

5-2 測定結果

構真柱の挿入抵抗の測定結果と回帰直線を図-9に示す。構真柱の挿入抵抗は、実験室実験及び現場施工実験の結果と同様に、挿入深さに比例する傾向を示した。構真柱C-1の挿入抵抗は、C-2, C-3に対して57~63%小さい値であった。これは、構真柱C-1の断面形状が小さかったこと、コンクリート練り混ぜから挿入までの時間が短かったことによると考える。

これより算定した構真柱先端の抵抗 p_s および側面抵抗 τ_s の値と、経過時間の違いを補正した実験室実験結果(p' , τ')を表-6に示した。 p_s の p' に対する比率は0.77~1.69の範囲に、 τ_s の τ' に対する比率は0.79~1.24の範囲にあった。測定結果と実験室実験結果の誤差は、コンクリート温度、コンクリート容積に対する鋼材断面積の比率などの違いによるものと考えられる。

また、挿入抵抗に対する先端抵抗 p と側面抵抗 τ の寄与率は、部材寸法が大きくなるほど、 τ の方の割合が大きくなり、実施工における構真柱の挿入抵抗は p よりも τ による影響が大きい。従って、今回 τ の値に比べ p の値のばらつきが大きくなる結果を得たが、上記の理由から、構真柱の挿入抵抗は、実験室で行った鋼材貫入試験によって十分推定できると考える。

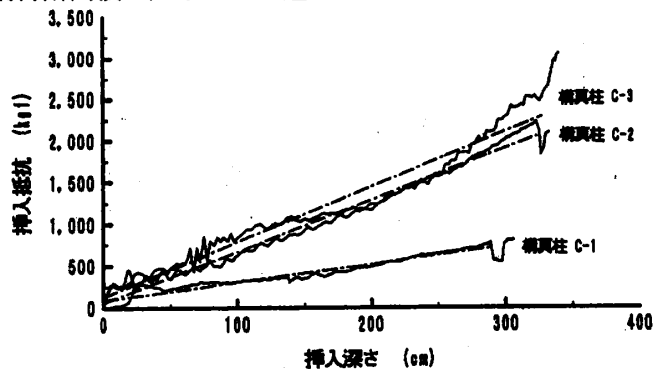


図-9 実施工時の測定結果

表-6 実施工時の測定結果

構真柱 記号	構真柱の形状		フレッシュコンクリート			施工条件		実施工測定結果		実験室実験補正		実験結果の比較	
	断面積 cm ²	周長 cm	スラフ cm	空気量 %	温度 ℃	挿入深 さ cm	経過時 間 h	p_s	τ_s	p'	τ'	$\frac{p_s}{p'}$	$\frac{\tau_s}{\tau'}$
								kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²		
C-1	444.2	320	20.5	3.8	19.5	290	1.58	0.208	0.0033	0.138	0.0042	1.507	0.786
C-2	574.1	400	21.5	3.5	13.0	300	1.92	0.106	0.0119	0.138	0.0096	0.768	1.240
C-3	554.6	416.8	20.0	3.3	16.0	290	2.08	0.233	0.0126	0.138	0.0135	1.688	0.933

6. 結論

今回実施した一連の実験検討結果から以下の結論を得た。

- 挿入抵抗は、鋼材先端に働く抵抗と側面に働く抵抗とに分解して考えることで、実験室レベルの実験により構真柱の挿入抵抗の値を推定することが可能である。
- 挿入抵抗の値は、コンクリート温度が低く、コンクリート中の粗骨材量が小さい場合ほど、また高性能AE減水剤の添加量が多い場合ほど、小さくなる傾向を示す。
- 初期の強度発現は、高性能AE減水剤を用いた場合も積算温度と良い相関を示し、高性能AE減水剤の添加量が少ない場合ほど早くなる傾向にある。

参考文献

- 笠井芳夫：コンクリートの初期強度に関する研究、セメント技術年報、Vol.15, 1961