

コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発

—スラグコンクリート杭の強度測定への適用—

Development of Nondestructive Inspection Method for Estimating Concrete Strength —The Application to Slag Concrete Piles—

立見 栄司 EIJI TATSUMI

本報告は、スラグコンクリートを使用した場所打ちコンクリート杭の杭頭強度測定に衝撃弾性波による圧縮強度推定方法を適用した結果をまとめたものである。推定精度は、コア強度との比較により実用的なものであることが明らかになった。これにより、使用したプラントごとのコンクリートから作成した圧縮強度推定式の妥当性が確認された。

キーワード：非破壊検査、衝撃弾性波、弾性波速度、圧縮強度、スラグコンクリート

This paper describes about an application of the nondestructive inspection method for an estimating concrete strength to the pile head concrete of cast-in-place piles using slag concrete. By comparing the estimation results and the strength of core-boring specimens, the practicality of the estimation accuracy and the propriety of the strength estimations using each concrete properties supplied from concrete plants were confirmed.

Key Words: Nondestructive Inspection, Impact-Elastic Wave, Elastic Wave Velocity, Compressive Strength, Slag Concrete

1. はじめに

筆者は、従来の反発度法や超音波法^{1),2)}とは異なる衝撃弾性波の伝播速度（弾性波速度）から圧縮強度を推定する方法、いわゆる「衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法」³⁾を開発した。本強度推定法は、表面2点法と呼ばれ、強度を測定する部位に振動検出器を当て、その近傍をハンマーで軽く叩くだけの極めて簡便な方法で圧縮強度が推定できることを特徴としている。

すでに現場展開を意図した試作機を作製し、場所打ちコンクリート杭の杭頭強度確認⁴⁾を中心に、施工中の構造体コンクリート（壁・スラブ・梁）の強度推定など、施工時の強度管理に適用した結果、高い実用性を確認した。

本強度推定法は、コンクリート表面で弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との関係を用いて強度を推定しているため、弾性波速度に影響を及ぼす要因が推定精度の低下や誤差を招く可能性がある。そこで、推定精

度の向上および適用範囲を把握する観点から、既往の研究^{5),6),7)}において、コンクリートの使用材料、調合および養生方法など、コンクリートの構成要素が弾性波速度と圧縮強度との相関関係に及ぼす影響について検討した。

また、コンクリートの含水率が超音波速度（音速）に影響を及ぼすことは多くの研究^{8),9)}から知られているが、衝撃弾性波に関する系統的な研究はあまり見られないため、平成16年度は含水率が弾性波速度に及ぼす影響¹⁰⁾について述べた。

さらに、本強度推定法を構造体コンクリートの強度推定に適用する場合、その内部と表面（表層）の弾性波速度が異なることを、また、コンクリート中の鉄筋が弾性波速度に影響を及ぼす特性を把握する必要があるため、平成17年度は、構造体コンクリートを模擬した試験体を用いた実験により、弾性波速度の内部特性および鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定された弾性波速度に及ぼす影響¹¹⁾について述べた。

一方、A共同住宅新築工事の場所打ちコンクリート杭には高炉スラグ骨材を用いたスラグコンクリートが使用された。一般に、場所打ちコンクリート杭の杭頭部では、スライム等の混入により強度発現不良が懸念されるため、余盛管理と称し、増し打ちしたコンクリートを根切り時に撤去する杭頭処理が行われている。これにより、杭頭の低品質なコンクリートを除去して健全なコンクリートを確保するとしているが、その信頼性は保証されている訳ではない。そこで、スラグコンクリートの使用実績は極めて少ないため、余盛管理の確認を目的として、本強度推定法による杭頭の強度測定を行うこととした。

本報告は、スラグコンクリートを使用した場所打ちコンクリート杭の杭頭強度測定に、本強度推定法を適用した結果をまとめたもので、推定精度を検証するため、同位置から採取したコア供試体の圧縮強度との比較検討を行ったものである。

2. 測定概要

(1) 建物および場所打ちコンクリート杭の概要

本強度推定法をA共同住宅新築工事の2棟の場所打ちコンクリート杭に適用し、杭頭の強度測定を行った。建物は、地上32階（B棟）および7階（F棟）建ての鉄筋コンクリート造集合住宅である。それぞれの杭配置図を図-1および図-2に示す。なお、B棟の杭配置図は横長であり、見易さのために、Y8～Y14通りを省略した。B棟はX方向3スパン、Y方向15スパンの板状建物であり、F棟はX方向3スパン、Y方向4スパンの建物である。杭は拡底杭であり、杭頭部の杭径は、B棟ではY1通りのφ1,800以外はφ2,200であり、F棟ではφ1,600である。杭長は、B棟では27m、F棟では29mである。

測定の対象とした杭は、杭配置図上で灰色に色分けしたもので、B棟がNo.2, No.3, No.4, No.33, No.34, No.48,

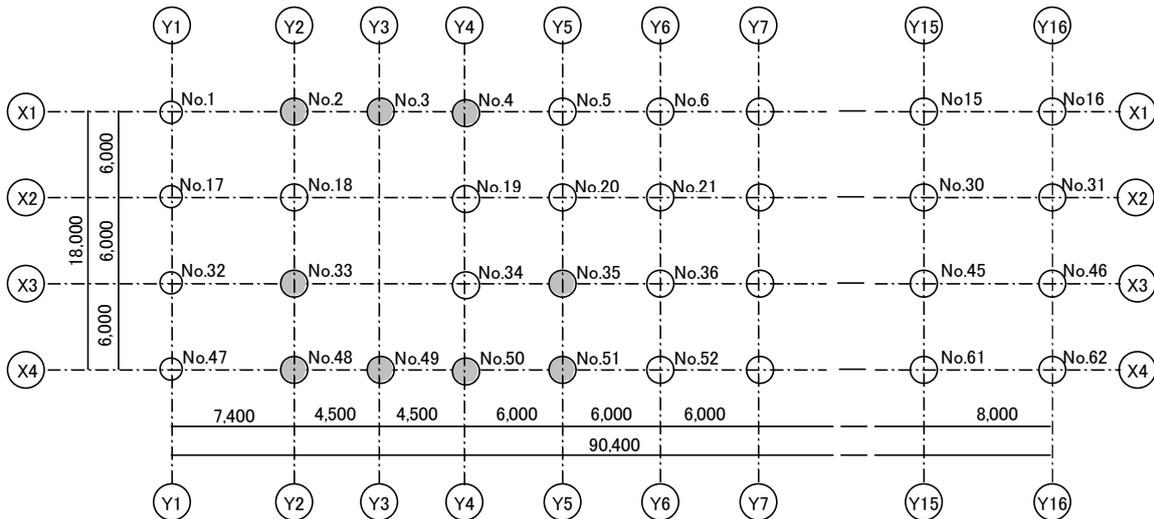


図-1 B棟の杭配置図

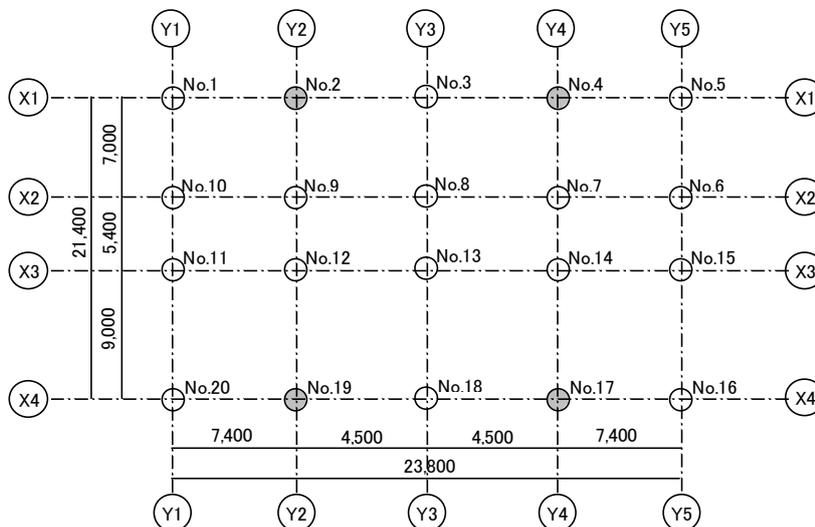


図-2 F棟の杭配置図

No.49, No.50 および No.51 の 9 本, F 棟が No.2, No.4, No.17 および No.19 の 4 本, 合わせて 13 本である。

(2) コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの使用材料を表-1 に示す。杭に打設したコンクリートは、表に示すように、4 社の生コン工場から出荷されたもので、A, B, C および D プラントと呼称する。セメントの種類は高炉セメント B 種で、粗骨材は新日本製鐵(株)君津製鐵所産の高炉スラグ骨材である。

コンクリートの調査を表-2 に示す。コンクリートの設計基準強度は 27N/mm² である。調査はプラントにより若干異なるが、水セメント比は 52.5~56.3%, 粗骨材のかさ容積は 0.58~0.61m³/m³, スランプは 21cm である。

(3) 圧縮強度推定式の作成

各プラントから出荷されたコンクリートの現場実機試験の際に、7, 14, 28, 56 および 91 日の 5 材齢について、15 本ずつ円柱供試体を作製し、標準養生を施した後、弾性波速度測定と圧縮強度試験を行った。

円柱供試体の弾性波速度 V_p は、衝撃弾性波の多重反射波を測定し、スペクトル解析により反射波の 1 次振動数 f_1 を求め、供試体の長さ L から式(1)により算定した。この方法は、反射波法またはインパクトエコー法¹⁰⁾として一般的な測定方法であり、円柱供試体のように単純な形状の部材では、比較的安定した測定結果が得られる。

$$V_p = 2L \cdot f_1 \tag{1}$$

表-1 コンクリートの使用材料

生コン工場	主材料	種類・性質
Aプラント	セメント	高炉セメントB種(密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 4100cm ² /g) 住友大阪セメント(株)
	細骨材	千葉県富津市鶴岡産:山砂(表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.61%粗粒率2.62)
	粗骨材	新日本製鐵(株)君津製鐵所:高炉スラグ(表乾密度2.61g/cm ³ 、吸水率1.90%、粗粒率6.65、実績率57.4%)
	混和剤	AE減水剤 (シーカメントJ)
Bプラント	セメント	高炉セメントB種(密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3880cm ² /g) 宇部興産(株)
	細骨材	S1:千葉県富津市産:山砂(表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率1.76%粗粒率2.02) S2:青森県八戸市産:砕砂(表乾密度2.69g/cm ³ 、吸水率0.53%粗粒率3.61) 混合比率(S1:S2=6:4) 混合砂表乾密度2.62g/cm ³
	粗骨材	新日本製鐵(株)君津製鐵所:高炉スラグ(表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.98%、粗粒率6.65、実績率56.9%)
	混和剤	AE減水剤 (チューポールEX20)
Cプラント	セメント	高炉セメントB種(密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3880cm ² /g) 太平洋セメント(株)
	細骨材	千葉県万田野産:山砂(表乾密度2.57g/cm ³ 、吸水率2.10%粗粒率2.59)
	粗骨材	新日本製鐵(株)君津製鐵所:高炉スラグ(表乾密度2.63g/cm ³ 、吸水率1.84%、粗粒率5.66、実績率57.4%)
	混和剤	AE減水剤 (ポゾリスNo.70)
Dプラント	セメント	高炉セメントB種(密度 3.04g/cm ³ 、比表面積 3,880cm ² /g) 太平洋セメント(株)
	細骨材	千葉県富津市横山産:洗砂(表乾密度2.57g/cm ³ 、吸水率2.10%粗粒率2.59)
	細骨材	新日本製鐵(株)君津製鐵所:高炉スラグ(表乾密度2.61g/cm ³ 、吸水率1.90%、粗粒率6.61、実績率57.4%)
	混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体(ポゾリス15S)

表-2 コンクリートの調査

生コン工場	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				絶対容積(l/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
				W	C	S	G	W	C	S	G	
Aプラント	0.60	52.5	48.1	185	353	827	894	185	116	318	343	3.53 25%希釈
Bプラント	0.58	53.9	49.2	192	357	841	868	192	117	321	331	3.30 20%希釈
Cプラント	0.58	56.3	49.5	186	330	847	876	192	109	327	333	0.825 原液
Dプラント	0.61	52.5	47.2	185	353	802	913	185	116	312	348	3.53 25%希釈
設計基準強度		スランプ		粗骨材の最大寸法				空気量				
27N/mm ²		21cm		20mm				4.5%				

実機試験時に採取した供試体による各社コンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を図-3に示す。4社のコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係は比較的類似していたが、Aプラントのコンクリートが、弾性波速度および圧縮強度ともに、他社に比べて若干大きい傾向が見られた。

表-3 圧縮強度推定式の係数の値

式の係数	ρ (g/cm ³)	a	b (N/mm ²)	c
Aプラント	2.3	1/420	-49.0	0.825
Bプラント		1/420	-48.0	
Cプラント		1/480	-39.3	
Dプラント		1/460	-41.5	

各社のコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係に圧縮強度推定式を回帰させて求めた圧縮強度推定式の係数の値を表-3に示し、この係数に従って作成した圧縮強度推定式を図の上で比較した各プラントのコンクリートの圧縮強度推定式を図-4に示す。なお、圧縮強度推定式を既報⁶⁾より参照し、式(2)に示す。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \tag{2}$$

圧縮強度推定式は、4プラントとも大きな違いはなく、特に、AおよびBプラントのものは非常によく類似していた。同図に既報⁶⁾で提案した圧縮強度推定式を圧縮強度推定式①として示す。圧縮強度推定式①は4プラントのものに比べて極めて急勾配である。これは、セメントの種類が普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の違い⁶⁾によると考えられる。

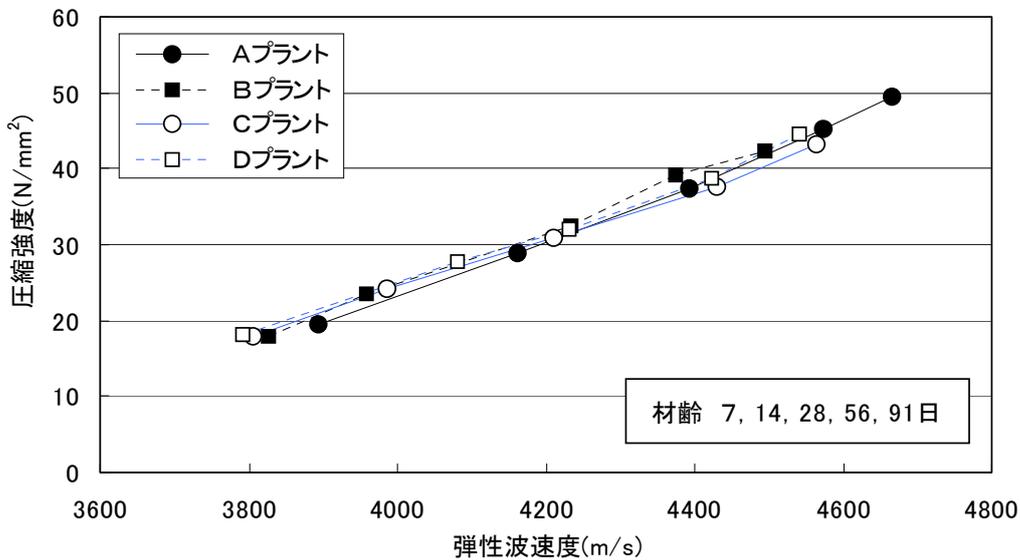


図-3 各社コンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

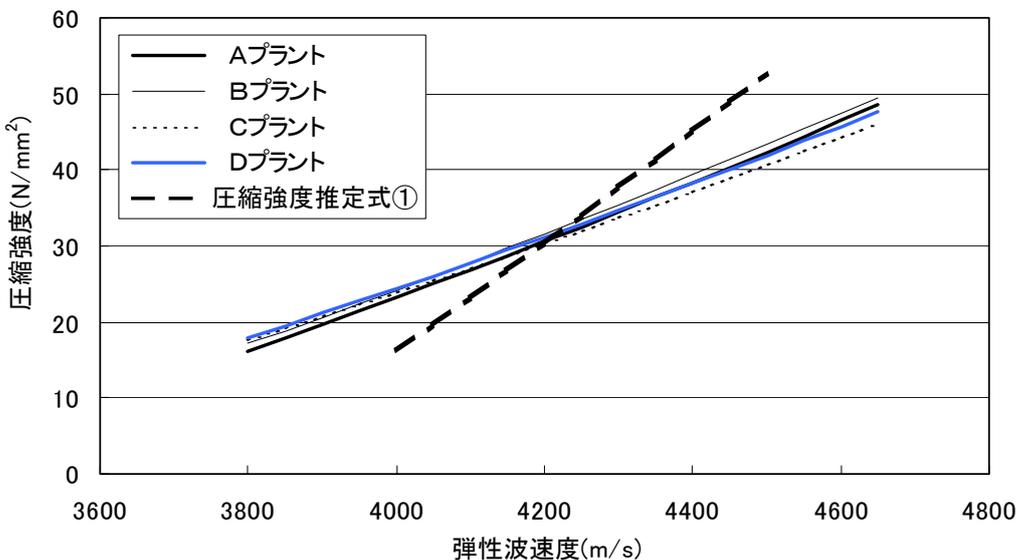


図-4 各プラントのコンクリートの圧縮強度推定式

(4) 杭頭の強度測定方法

構造体コンクリートの弾性波速度測定方法を図-5に示す。この方法は、表面2点法と称し、二つの振動センサーを30cm間隔で固定した振動検出器をコンクリート表面に接触させ、その延長線上を打撃して発生させた衝撃弾性波の位相速度を測定するものである。したがって、弾性波速度は測定距離を両センサー間の波動伝播時間差で除すことにより算定され、圧縮強度は測定された弾性波速度を圧縮強度推定式に代入することにより求められる。

場所打ちコンクリート杭の杭頭強度測定は、根切りおよび杭頭処理が終了した直後に行った。杭頭は杭頭処理により凸凹状態なので、測線上の振動検出器の接触位置および打撃点を電動カッターにより研磨して高低差を調整した。測線は各杭とも3箇所とした。杭頭の測定下準備状況を写真-1に示す。また、杭頭の強度測定状況を写真-2に示す。

3. 強度測定結果および考察

(1) 測定結果

杭頭の強度測定結果一覧表を表-4に示す。強度測定は同日であるが、コンクリートの打設日は異なるため、それぞれの材齢を記入した。B棟の材齢は64日～99日、F棟の材齢は40日～65日であり、B棟の方が少し高材齢であった。しかしながら、いずれの材齢も40日以上なので、

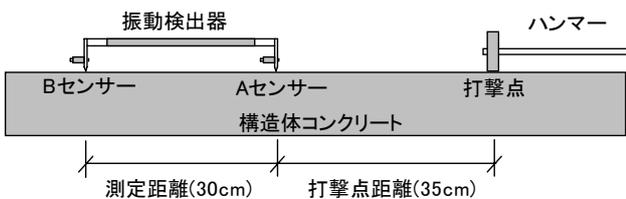


図-5 構造体コンクリートの弾性波速度測定方法



写真-1 杭頭の測定下準備状況

推定強度に大きな差は見られない。杭天端は杭頭処理により構造体コンクリートの内部が露出しているため、低品質なコンクリートが除去されたとすれば、天端面で測定された弾性波速度はコンクリート内部の弾性波速度と同等であると考えられるので、弾性波速度の表面と内部差の補正は行わなかった。杭頭の推定強度は、3測線から求めた弾性波速度の平均値を用い、プラントごとに作成した圧縮強度推定式により算定された。コンクリートの設計基準強度は27N/mm²であるので、F棟の杭番号No.19の推定強度のみがわずかに設計基準強度を下回るが、その他の杭はすべて設計基準強度を満足していることを構造体コンクリートにおいて直接的に確認できた。

(2) 推定強度とコア強度との比較

杭頭部のコア採取状況を写真-3に示す。コアボーリングは、直径がφ100で長さが1mとし、強度測定の測線から1箇所を選び、その直下で行った。コア供試体は、杭天端面より100mmの位置から下に向かい、高さ200mmのものを3体作製した。コア強度はこれら3体の圧縮強



写真-2 杭頭の強度測定状況

表-4 杭頭の強度測定結果一覧表

建物	測定場所	測定部位		弾性波速度 (m/s)	推定強度 (N/mm ²)	材齢 (日)
		杭番号	プラント名			
B棟	X1-Y2	2	Aプラント	4232.6	31.9	66
	X1-Y3	3	Aプラント	4159.0	29.1	86
	X1-Y4	4	Aプラント	4173.4	29.7	82
	X3-Y2	33	Bプラント	4230.9	32.9	87
	X3-Y5	35	Bプラント	4210.3	32.1	84
	X4-Y2	48	Aプラント	4242.2	32.3	70
	X4-Y3	49	Aプラント	4231.2	31.8	64
	X4-Y4	50	Aプラント	4270.4	33.3	99
F棟	X4-Y5	51	Bプラント	4233.6	33.0	92
	X1-Y2	2	Bプラント	4203.5	31.8	41
	X1-Y4	4	Cプラント	4147.0	28.7	55
	X4-Y2	19	Dプラント	4072.1	26.9	40
	X4-Y4	17	Cプラント	4239.0	31.7	65

度試験結果の平均値である。

推定強度とコア強度との比較を表-5に、推定強度とコア強度との関係を図-6に示す。推定強度が設計基準強度にわずかに及ばなかったF棟のNo.19は、コア強度では十分に設計基準強度を満足していた。本強度推定法による推定強度は、B棟のNo.50およびF棟のNo.19以外はコア強度との差が±10%以内であり、高い精度であることが検証された。

ここで、B棟のNo.50およびF棟のNo.19の推定強度とコア強度との差が大きい理由について考察する。まず、B棟のNo.50の推定強度は、33.4N/mm²であり、コア強度よりも17.3%大きいことになったが、他の杭の推定強度は29.1~33.0N/mm²、また、コア強度は30.0~34.3N/mm²であり、特別に大きいとは言えず、逆に、No.50のコア強度は28.5N/mm²であり、むしろ他より小さい値である。このことから、B棟のNo.50の推定強度は、コア供試体との対応性がずれたため、コア強度よりも17.3%大きく



写真-3 杭頭の測定下準備状況

表-5 推定強度とコア強度の比較

建物	杭番号	プラント名	推定強度 (N/mm ²)	コア強度 (N/mm ²)	差のコア強度比 (%)
B棟	2	Aプラント	31.9	32.7	-2.3
	3	Aプラント	29.1	31.3	-6.8
	4	Aプラント	29.7	32.4	-8.4
	33	Bプラント	32.9	32.4	1.5
	35	Bプラント	32.1	31.0	3.5
	48	Aプラント	32.3	32.2	0.2
	49	Aプラント	31.9	34.3	-7.1
	50	Aプラント	33.4	28.5	17.3
F棟	51	Bプラント	33.0	30.0	9.9
	2	Bプラント	31.8	30.0	5.8
	4	Cプラント	28.7	27.8	3.1
	19	Dプラント	26.9	31.9	-15.6
	17	Cプラント	31.7	30.2	5.1
平均値			31.2	31.1	0.5

評価されたと推測できる。

一方、F棟のNo.19の推定強度は、測定値の中で最も小さく、3測線の平均値で26.9N/mm²であり、わずか0.1N/mm²ではあるが、設計基準強度を下回っていた。3測線の推定強度は26.7、27.6および26.3N/mm²であり、バラツキは少なく、設計基準強度の上下に分布していた。強度測定位置とコア採取位置とは上下の関係になるが、コア強度は設計基準強度を十分に満足していた。このことから、F棟のNo.19の杭天端面は、余盛りコンクリートに余裕がなかったため、推定強度がコア強度を下回ったものと推測される。しかしながら、材齢は未だ40日であり、管理材齢まで16日間あるので、高炉セメントB種の特性を考慮すれば、少なくとも0.1N/mm²の強度発現の可能性は十分にあると考えられる。

(3) 杭頭推定強度と強度管理用供試体強度との比較

杭頭推定強度の管理強度に対する割合を表-6に示す。管理強度には強度管理用円柱供試体の材齢56日の圧縮強度(56日強度)を用いた。杭頭推定強度の管理強度に対する割合は75~90%であり、その平均値は84%であった。この強度差は、強度管理用円柱供試体に比較して、主に養生および現場打設コンクリートなどの条件が異なることによるものと考えられる。なお、F棟のNo.4は、材齢が55日なので、管理材齢に達したと見なしたが、No.2およびNo.19は、管理材齢に達していなかったため計算から除外した。

また、杭頭推定強度の強度管理用円柱供試体強度に対する比較を図-7に棒グラフで示す。杭頭推定強度は円柱供試体の28日強度と比較的よく対応しており、表-6において両者の平均値がほぼ一致していた。

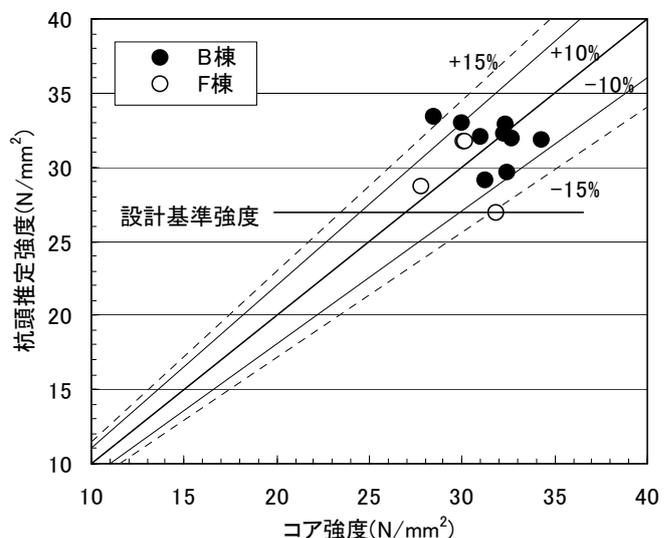


図-6 推定強度とコア強度との関係

(4) まとめ

本報告では、本強度推定法を場所打ちコンクリート杭の杭頭強度確認に適用し、その適用性について検証した。また、強度測定と同一部位から採取したコア供試体の圧縮強度との比較を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 本強度推定法により、杭天端面の推定強度は設計基準強度をほぼ満足していることを直接確認できた。これにより、本強度推定法の効果および有用性が検証された。
- (2) コア強度に対する推定強度の差の割合は、13本の杭のうち、2本は±15%を若干超えていたが、11本は±10%以内であった。これにより、推定精度は全般的には実用

的なものであることが明らかになった。

- (3) 本強度推定法により場所打ちコンクリート杭の杭頭強度を実用的な精度で推定できたことから、実機試験に基づきプラントごとに作成した圧縮強度推定式は妥当なものであることが明らかになった。また、本強度推定法の適用において、スラグコンクリートとしての特異性は見られなかった。
- (4) 材齢56日以上の杭頭推定強度は、円柱供試体による管理強度(56日強度)に対して75~90%の割合であり、その平均値は84%であった。これは、主に養生条件、打設条件が異なるためであると思われる。

表-6 杭頭推定強度の管理強度に対する割合

建物	杭番号	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm ²)				杭頭推定強度の56日強度に対する割合(%)
			強度管理用円柱供試体		コア強度	杭頭推定強度	
			28日強度	56日強度			
B棟	2	66	32.8	40.6	32.7	31.9	78.7
	3	86	32.5	38.8	31.3	29.1	75.1
	4	82	30.2	37.7	32.4	29.7	78.7
	33	87	33.1	38.2	32.4	32.9	86.0
	35	84	31.1	36.2	31.0	32.1	88.6
	48	70	33.4	42.5	32.2	32.3	76.0
	49	64	30.5	35.5	34.3	31.9	89.8
	50	99	32.3	36.9	(28.5)	33.4	90.5
	51	92	31.4	37.1	30.0	33.0	88.9
F棟	2	41	34.0	37.1	(30.0)	(31.8)	-
	4	55	27.6	34.6	27.8	28.7	82.9
	19	40	32.8	39.0	(31.9)	(26.9)	-
	17	65	30.0	36.1	30.2	31.7	87.8
平均値			31.7	37.7	31.4	31.5	83.9

()は平均値から除外

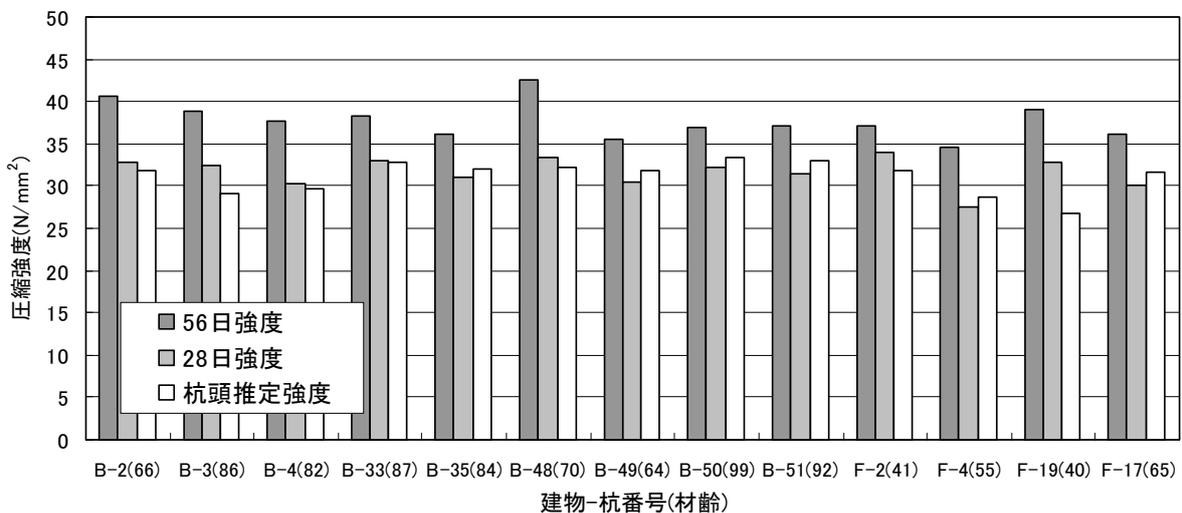


図-7 強度管理用円柱供試体強度に対する杭頭推定強度の比較

4. おわりに

本報告では、使用実績が少ないスラグコンクリートを使用した場所打ちコンクリート杭の余盛管理の健全性を確認することを目的として、杭頭強度測定に本強度推定法を適用し、また、その推定精度を検証するため、同位置から採取したコア供試体の圧縮強度との比較検討を行った。

その結果、場所打ちコンクリート杭の杭頭推定強度が設計基準強度を満足していることを直接的に数値で確認し、また、スラグコンクリートへの適用において特異性は見られなかったことを確認した。これにより、本強度推定法の効果および有用性が検証された。

一方、コア強度に対する推定精度は、13本の杭について測定した結果、2本のみが±15%を若干超えていたが、ほとんどは±10%以内であった。したがって、推定精度は全般的には実用的なものであることが明らかになり、実機試験に基づきプラントごとに作成した圧縮強度推定式の妥当性が確認された。また、強度測定には、コンクリートごとの圧縮強度推定式を用いることが推定精度向上に寄与することを確認したが、今後とも推定精度に関する検証を行う必要があると考える。

謝辞：本研究において、ものづくり大学建設技能工芸学科 中田善久助教授および河谷史郎教授のご指導を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 十代田知三, 野崎喜嗣, 小林幸一: 実大モデルによる超音波法, 反発度法および複合法の検討—非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.428, pp.1-9, 1991.10
- 2) 森濱和正, 吉荒俊克, 太田資郎: 非破壊試験による圧縮強度の推定, 非破壊検査, 50(7), pp.440-445, 2001.7
- 3) 立見栄司, 辻定和, 蓮尾孝一: 衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.985-986, 2002.8
- 4) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 試作機による杭頭強度確認への適用, 三井建設技術研究所報告, Vol.27, 2002
- 5) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 コンクリートの構成材料が弾性波速度に及ぼす影響, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.1, 2003
- 6) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎: 衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究—コンクリ

ートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, No.587, pp.15-21, 2005.1

- 7) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎: 衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究—骨材の種類, 養生方法および含水率の違いが弾性波速度に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, No.598, pp.13-20, 2005.12
- 8) ヴォラプッタポーシ コンキット, 十代田知三: 条件の異なるコンクリートの音速と動弾性係数との関係—非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その2)—, 日本建築学会構造系論文集, No.527, pp.15-19, 2000.1
- 9) 森濱和正: コンクリートの音速に及ぼす含水率の影響, 第58回セメント技術大会講演要旨, pp.100-101, 2004
- 10) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 コンクリートの含水率が弾性波速度に及ぼす影響, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.2, 2004
- 11) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 構造体コンクリートへの適用に関する検討, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.3, 2005
- 12) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino: Impact-Echo Method, Concrete International, Vol.10, No.4, pp.38-46, 1988.4