

報告 2年経過した実大規模の鉄筋コンクリート造壁試験体における強度に関する検討

菊地 俊文*1・阿部 寛之*2・片山 行雄*1・黒田 泰弘*3

要旨: 屋外環境下で2年経過した実大規模の鉄筋コンクリート壁試験体を対象とし、コア供試体を採取することで、RC壁試験体における強度について検討した。コア強度は、コア供試体を採取した鉛直位置が低いほど高い傾向にあった。また、設計基準強度に対するコア強度の95%信頼区間の下限値は約1.8倍の余裕を有していた。さらに、各非破壊試験による強度推定の適用性を検討した。反発度法による強度推定では、既存の強度推定式を採用することで強度を概ね安全側に推定でき、衝撃弾性波法による強度推定では、弾性波速度の分布が壁試験体における強度の分布と同様の傾向を示すことが明らかとなった。

キーワード: コア供試体, 圧縮強度, 確率分布, 非破壊試験, 反発度法, 衝撃弾性波法

1. はじめに

1997年のJASS5の改定以降、設計基準強度を下回らない調合設計がなされるようになり、筆者らが行った建築工用レディミクストコンクリートの実態調査においても、調合管理強度に対して、受入れ検査時に採取した供試体の圧縮強度は1.2~1.6倍であることが明らかとなった¹⁾。

一方、構造体コンクリートは材料的な要因や施工的な要因など、様々な要因によって品質にばらつきが生じることが知られている²⁾が、近年の調合設計に基づき計画

されたコンクリートを使用し、実大規模の鉄筋コンクリート造試験体や実際の鉄筋コンクリート造構造物を対象として、構造体コンクリート強度のばらつきを検討した事例はほとんどなく、その実態は十分に把握できているとは言い難い。

本報では、東京都の屋外環境下で2年経過した実大規模の鉄筋コンクリート壁試験体（以下、RC壁試験体と称す）を対象とし、コア供試体を採取することで、まず、RC壁試験体における強度の分布を明らかにすることとした。また、広範囲からコア供試体を採取することは、

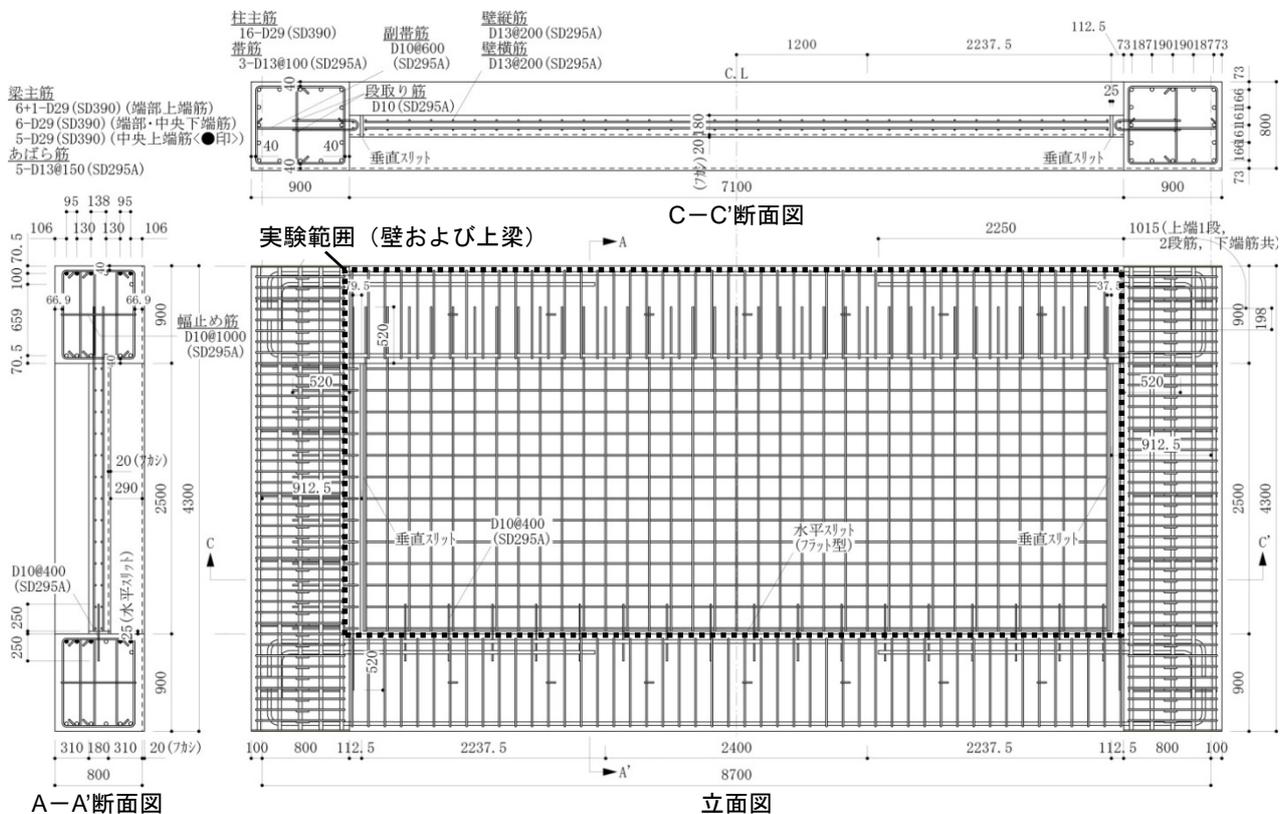


図-1 RC壁試験体の形状および寸法

*1 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター (正会員)
 *2 清水建設 (株) 技術研究所 社会システム技術センター
 *3 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 博士(工学) (正会員)

実際の構造物において、耐荷性能や耐久性能を低下させ、コストも増加する。そのため、破壊を伴わない非破壊試験を利用することが重要であり、反発度法および衝撃弾性波法をそれぞれ用いた強度推定の適用性についても併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 RC 壁試験体の作製

RC 壁試験体の形状および寸法を図-1に示す。RC 壁試験体は、鉄筋コンクリート造建物の1層1スパン部分を対象とし、壁・柱・上梁・下梁で構成される。壁部は誘発目地を設置せず、壁部の柱際に構造スリットを設置した。打込み方法は、下梁の鉄筋と型枠を組み、コンクリートを打ち込んだ後、壁・柱・上梁の鉄筋と型枠を組み、コンクリートを打ち込んだ。全体として、ほぼ層状に9ロットのコンクリートで打ち分けた。養生は、型枠存置期間を下梁で22日間、壁・柱・上梁で7日間とした。

2.2 コンクリートの仕様と諸元

RC 壁試験体に使用したコンクリートは、呼び方27-18-20Nの普通コンクリートで、その使用材料を表-1に、計画調合を表-2にそれぞれ示す。また、当該コンクリートの受入れ検査項目は、スランプ、空気量、コンクリート温度および圧縮強度とし、各検査方法はそれぞれJISに準じて行った。受入れ検査結果を表-3に示す。材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度（以下、28日標準養生強度と称す）は、平均値が33.3N/mm²、標準偏差が1.48N/mm²であり、調合管理強度に対する28日標準養生強度の比は、1.25であった。

レディーミクストコンクリート工場が出荷した同調合のコンクリートの受入れ検査時の28日標準養生強度の2012年の年間実績および実験で使用したコンクリートの28日標準養生強度の実績による確率分布を図-2に示す。なお、28日標準養生強度の分布が正規分布すると仮定して求めた。本報で使用したコンクリートは、同工場が出荷した同調合のコンクリートの実績と比較して、平均値が小さく、ばらつきも小さかった。95%信頼区間の下限値は調合管理強度を上回った。

また、打ち込んだコンクリートの5ロット目においては、現場封かん養生供試体および壁部の構造体コンクリートを想定した300×300×250mmのコア供試体採取用屋外暴露試験体（以下、ダミー試験体と称す）を併せて採取した。供試体およびダミー試験体によるコア供試体の圧縮強度およびヤング係数を表-4に、圧縮強度とヤング係数の関係を図-3にそれぞれ示す。28日標準養生強度に対する材齢91日ダミー試験体によるコア強度の比は1.11で、その強度差は3.7N/mm²であった。材齢800日程度までの間、材齢に応じて圧縮強度およびヤング係数はそれぞれ増進した。

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3310cm ² /g
水	W	工業用水
細骨材	S1	硬質砂岩砕砂 表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:1.10%, 粗粒率:3.08
	S2	山砂 表乾密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.37%, 粗粒率:2.18
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.62%, 粗粒率:6.59
混和剤	Ad	AE減水剤標準形

表-2 計画調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	Ad
55.9	47.8	183	328	335	501	925	3.28

表-3 受入れ検査結果

ロット No.	打込み部位	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
1	下梁	18.0	4.7	19.0	33.8
2		18.0	4.8	19.0	-
3		18.0	5.0	20.0	-
4	壁・柱	18.0	5.1	17.0	32.0
5		18.0	4.2	17.0	34.4
6	壁	18.5	4.1	17.0	33.4
7	上梁・柱	18.5	4.0	17.0	35.7
8		17.5	4.3	17.0	32.8
9		18.0	4.2	17.0	31.3

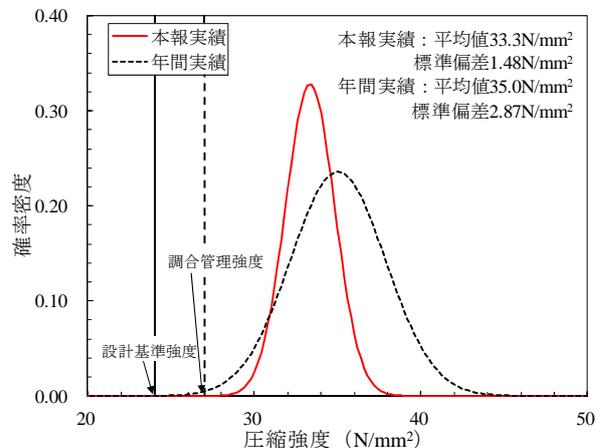


図-2 本報の受入れ検査の実績

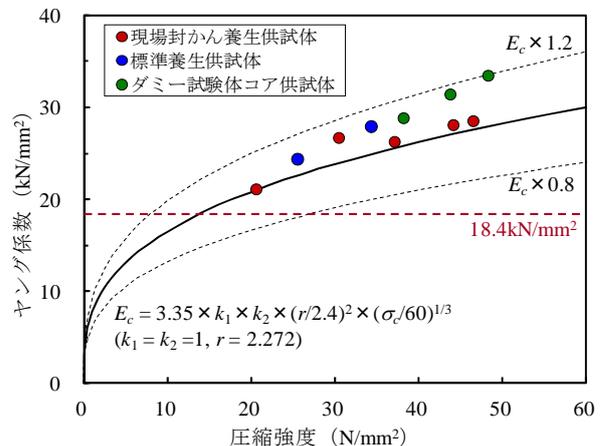


図-3 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係は、図-3 に示される JASS5 の関係式に対して 1.0~1.2 倍であり、調合管理強度 27N/mm² に対して、設計段階で要求されるヤング係数である 18.4kN/mm² を上回った。

2.3 暴露環境

RC 壁試験体は、東京都江東区内の屋外で 2012 年 12 月から 776 日間（約 25 ヶ月間）暴露し、その間の気象条件は暴露場所から 5km 圏内の気象データ（江戸川区臨海町）によると、日平均気温の平均値が 15.6℃、最高気温が 31.5℃、最低気温が 0℃であった。降雨等は、221 日で発生しており、平均して 3.5 日に 1 日の割合で発生した。中性化のみが劣化原因となるような比較的緩い暴露環境であった。

2.4 コア供試体および破壊試験

(1) コア採取および成形

コアの採取位置を図-4 に示す。コア採取は湿式で行い、コア採取後、コア両端を切断および研磨することでコア供試体とした。成形後のコア供試体は、破壊試験までの間、屋内で保管した。

(2) 圧縮強度およびヤング係数の測定

コア供試体に対する破壊試験の測定項目は、圧縮強度およびヤング係数とした。コア径は RC 壁試験体に配した鉄筋と干渉しないように 83mm、68mm、および 58mm とした。このうち、コア径 58mm のコア供試体のみ、JIS A 1107 に規定される「粗骨材の最大寸法の 3 倍以上」を満足しない。3 種類のコア径によるコア供試体の圧縮強度（以下、コア強度と称す）は、JIS A 1107 に準じて測定した。また、コア供試体のヤング係数（以下、コアヤング係数と称す）は、コンクリート用ひずみゲージを用いて、JIS A 1149 に準じて測定した。

2.5 非破壊試験および圧縮強度の推定

(1) 試験位置

各非破壊試験の試験位置を図-5 に示す。各試験位置における高周波容量式による含水率は、平均値が 4.6%、標準偏差が 0.40% であり、十分な乾燥状態にあったと考えられる。

(2) 反発度の測定および圧縮強度の推定

反発度法は、リバウンドハンマーを用いて、JIS A 1155 に準じて測定を行い、反発度を算出した。反発度から圧縮強度を推定する式は数多く提案されているが、本報では、代表的な強度推定式である建築学会式³⁾および材料学会式⁴⁾を用いた。建築学会式を式(1)に、材料学会式を式(2)にそれぞれ示す。

$$F = (7.3 \times R + 100) \times 0.098 \quad (1)$$

$$F = (13 \times R - 184) \times 0.098 \quad (2)$$

ここに、 F ：推定圧縮強度 (N/mm²)

R ：反発度

(3) 衝撃弾性波の測定および圧縮強度の推定

衝撃弾性波法は、弾性波レーダーシステムを用いて、NDIS 2426-2 に準じて多重反射法によって弾性波速度を算出した。多重反射法は、RC 壁試験体の打撃面と相対する端面（背面）で反射する弾性波の測定波形から周波数解析を行い、弾性波速度を算出する。弾性波速度から圧縮強度を推定する式は、岩野らの提案式⁵⁾（以下、岩野式と称す）を用いた。岩野式を式(3)に示す。

$$f = 1.224 \times 10^{-17} \times V^{5.129} \quad (3)$$

ここに、 f ：推定圧縮強度 (N/mm²)

V ：弾性波速度 (m/s)

岩野式では、コア強度が既知の場合、コア強度を式(3)で算出した推定圧縮強度で除した定数を補正比率として式(3)に乗じることで推定精度が上昇する。このため、補正比率を用いて補正を行う場合も検討した。なお、補正を行う場合、各コア採取位置で算出した補正比率の平均値を用い、併せて補正比率の取り得る範囲を明らかにした。

表-4 供試体による圧縮強度とヤング係数

	圧縮強度 (N/mm ²)				
	7日	28日	91日	362日	804日
標準養生供試体	25.6	34.4	-	-	-
現場封かん養生供試体	20.5	30.4	37.1	44.1	46.5
ダミー試験体によるコア供試体	-	-	38.1	43.7	48.2

	ヤング係数 (kN/mm ²)				
	7日	28日	91日	362日	804日
標準養生供試体	24.4	27.9	-	-	-
現場封かん養生供試体	21.1	26.7	26.3	28.1	28.6
ダミー試験体によるコア供試体	-	-	28.9	31.4	33.5

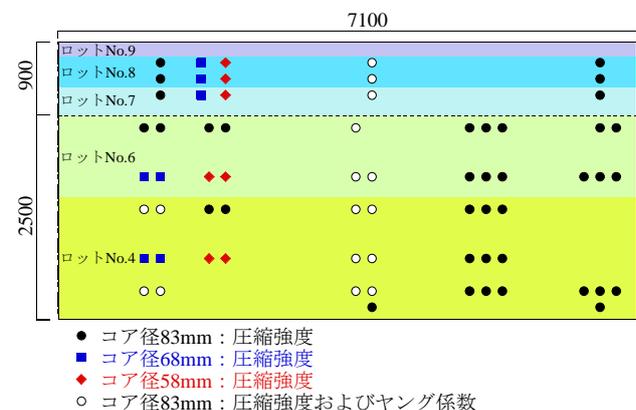


図-4 コアの採取位置（壁および上梁）

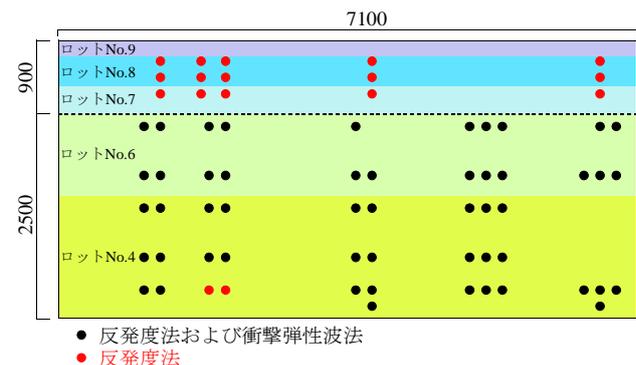


図-5 各非破壊試験の試験位置（壁および上梁）

3. 実験結果および考察

3.1 コア強度

(1) コア径の影響

異なるコア径によるコア強度の比較を図-6に示す。コア径68mmと58mmのコア強度の平均値は、同一採取高さにおいてほぼ同等であった。

(2) コア強度の分布

コア強度およびコアヤング係数の測定結果を表-5に示す。コア強度は、平均値が50.2N/mm²、標準偏差が3.66N/mm²であり、28日標準養生強度に対するコア強度の比は1.46であった。嵩ら⁶⁾は屋外暴露環境下の実大規模の壁試験体を対象とし、28日標準養生強度に対する材齢4.5年以上経過したコア強度の比が概ね1.23~1.40となることを報告しており、本報と同程度であった。また、鈴木ら⁷⁾はコア強度の平均値からの偏差が正規分布すると報告している。そこで、コア強度の分布を正規分布と仮定して求めたコア強度の確率分布を図-7に示す。なお、使用したコンクリートの28日標準養生強度の確率分布も併せて示す。設計基準強度に対する材齢が2年経過したコア強度の95%信頼区間の下限値の比は1.79、つまり、約1.8倍の余裕を有していた。また、この下限値と設計基準強度の差は19.0N/mm²であった。

(3) 製造ロットの影響

コア強度の鉛直方向の分布を図-8に示す。コア強度は、壁におけるコア採取位置が低いほど高い傾向にあり、壁部の各高さの平均値における強度差は最大12.5N/mm²であった。これは圧密が要因の一つとして考えられる。また、上梁と壁の境界部の上下および打重ね部の上下、すなわち、コンクリートの製造ロットが異なる境界部の上下において圧密の影響が一様ではなかった。湯浅ら⁸⁾は実構造物で採取したコアの強度分布から、コールドジョイント部の上下で圧密の影響が一様でないことを報告しており、本報はこれを包含する結果となった。

3.2 コアヤング係数

コアヤング係数は、平均値が25.5kN/mm²、標準偏差が1.47kN/mm²であり、材齢28日標準養生供試体のヤング係数(以下、28日標準養生ヤング係数と称す)に対するコアヤング係数の比は0.91であった。この比は既往の研究⁶⁾と同様の傾向であった。また、コア強度とコアヤング係数の関係を図-9に示す。なお、図-3も併せて示す。コア強度とコアヤング係数の関係は、JASS5の関係式に対して0.8~1.0倍であった。

表-5 コア強度およびコアヤング係数の測定結果

	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)		
	供試体数	平均値	標準偏差	供試体数	平均値	標準偏差
壁	54	50.3	4.06	13	25.4	1.57
上梁	15	50.0	1.60	3	25.9	1.00
全体	69	50.2	3.66	16	25.5	1.47

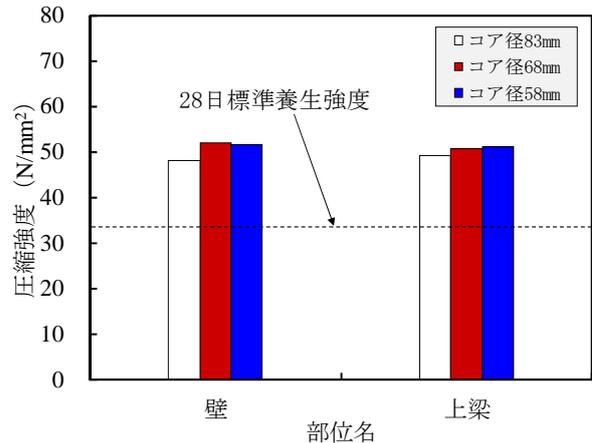


図-6 異なるコア径のコア強度の比較

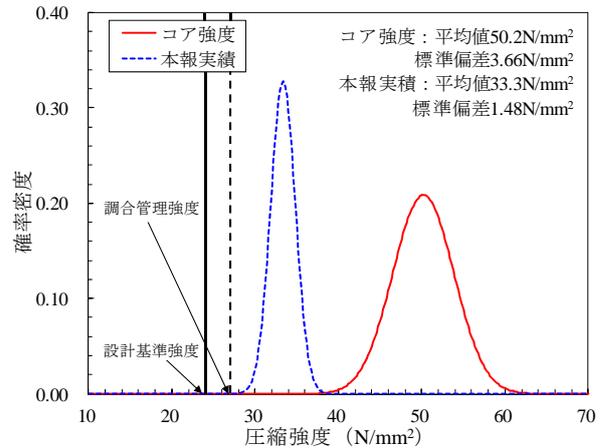


図-7 コア強度と本報実績の比較

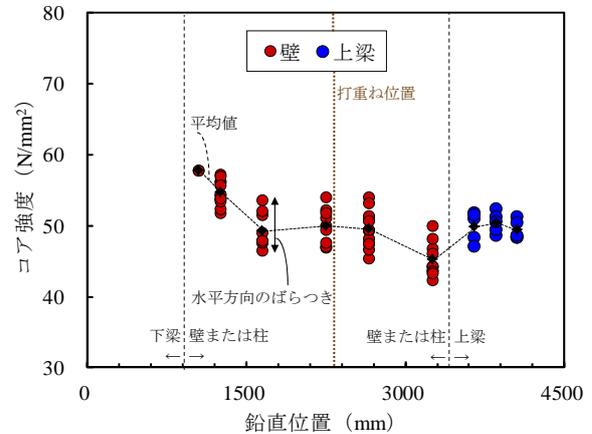


図-8 コア強度の鉛直方向の分布

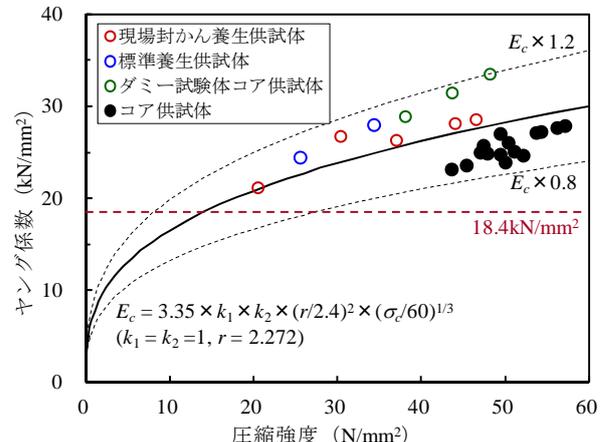


図-9 コア強度とコアヤング係数

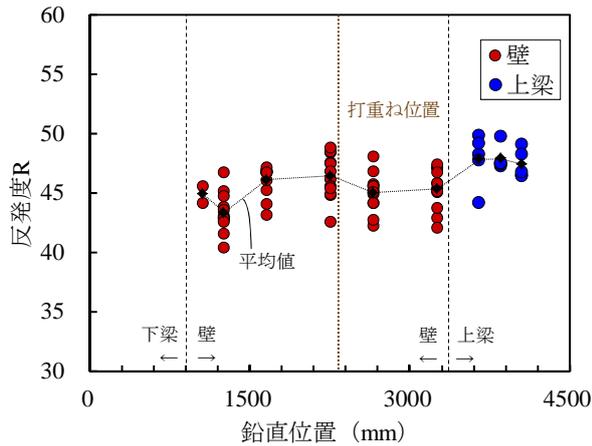


図-10 反発度の鉛直方向の分布

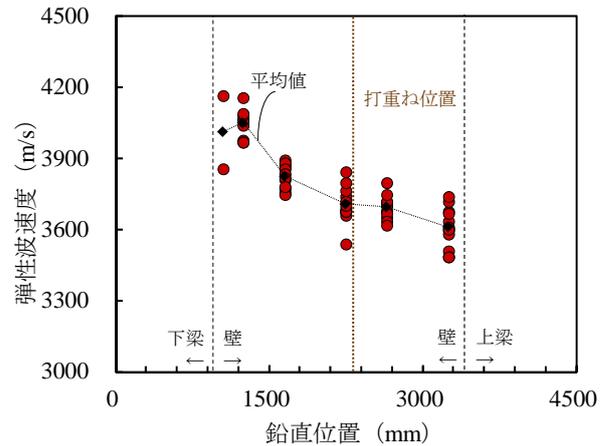


図-13 弾性波速度の鉛直方向の分布

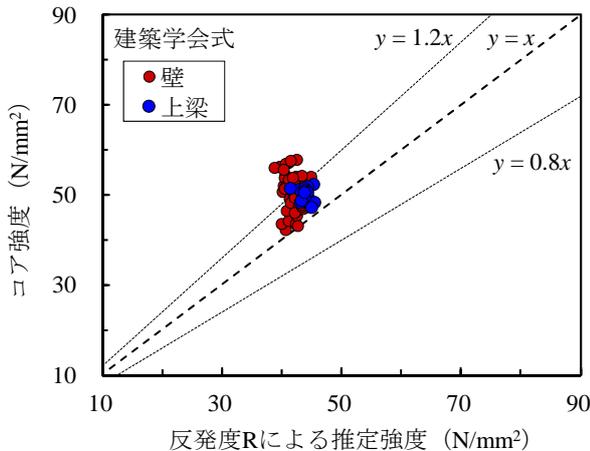


図-11 推定強度とコア強度（建築学会式）

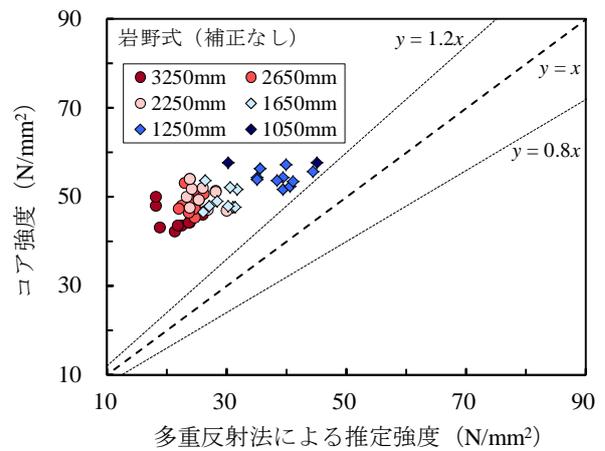


図-14 推定強度とコア強度（岩野式補正なし）

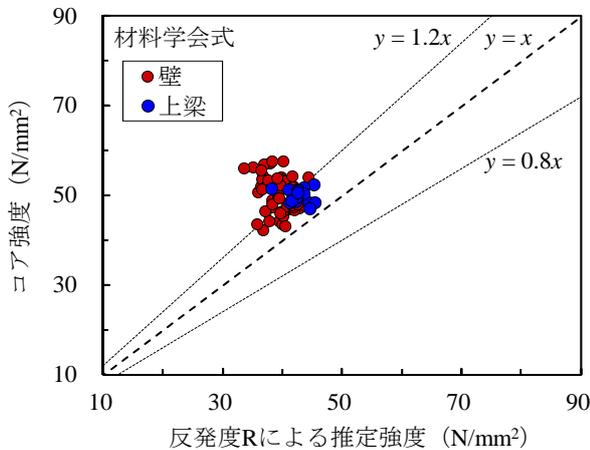


図-12 推定強度とコア強度（材料学会式）

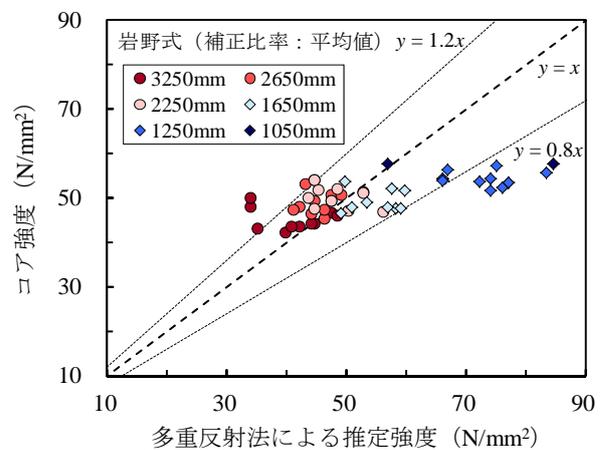


図-15 推定強度とコア強度（岩野式補正あり）

3.3 反発度法による強度推定

反発度の鉛直方向の分布を図-10に示す。試験位置が低くなるに従い、反発度が大きくなることはなく、コア強度の分布とは異なった。建築学会式による推定強度とコア強度の関係を図-11に、材料学会式による推定強度とコア強度の関係を図-12にそれぞれ示す。推定強度は、建築学会式の場合でコア強度の100%~70%程度で、材料学会式の場合で100%~60%程度であった。建築学会式および材料学会式を用いた反発度法による圧縮強度の推定精度は、ほぼ同程度であり、RC壁試験体の平均的なコア強度を概ね安全側に推定できた。

3.4 衝撃弾性波法による強度推定

弾性波速度の鉛直方向の分布を図-13に示す。試験位置が低くなるに従い、弾性波速度は大きくなり、かつ、打重ね部の上下では、弾性波速度はほとんど変化しないことから、コア強度の分布と同様の傾向を示した。弾性波速度を用いた推定強度とコア強度の関係のうち、補正を行わない場合を図-14に、補正を行う場合を図-15にそれぞれ示す。衝撃弾性波（多重反射法）による推定強度は、補正を行わない場合、コア強度の80%~40%程度で、補正を行う場合、コア強度の150%~70%程度であった。強度推定式は異なるものの、推定強度はコア強度

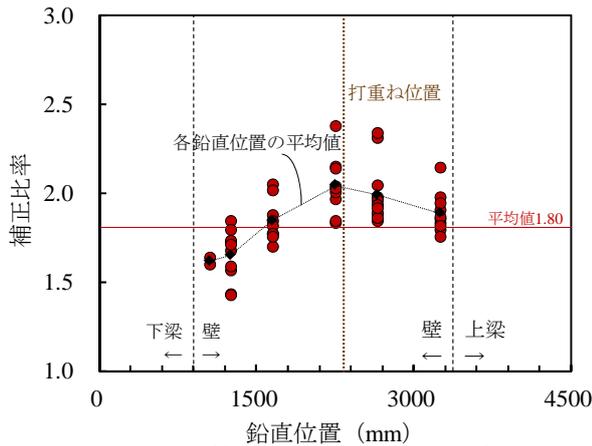


図-16 補正比率の鉛直方向の分布

から乖離する傾向にあった。補正比率の鉛直方向の分布を図-16に示す。試験位置が低くなるに従い、補正比率は小さくなる傾向にあった。このため、特に試験位置の低い推定強度がコア強度から乖離する要因と考えられる。よって、推定精度の向上には、補正比率を適切に選定する必要があると考えられる。弾性波速度とコア強度の関係を図-17に示す。一般的に伝搬速度から強度を推定する際に用いる累乗関数の回帰式に基づけば、弾性波速度とコア強度の間に相関が見られる。この回帰式の係数を用いれば、新たな強度推定式の可能性が示唆される。ただし、汎用性および推定精度に課題は残る。岩野式は部材が厚いような土木構造物を対象にして構築されており、部材が薄いような本報のRC壁試験体では適用できなかった可能性がある。薄い部材にも適用できる新たな強度推定式の提案は、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

屋外環境下で2年経過したRC壁試験体を対象とし、破壊試験および非破壊試験によりRC壁試験体における強度のばらつきを検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 使用したコンクリートの28日標準養生強度は、平均値が 33.3N/mm^2 、標準偏差が 1.48N/mm^2 であり、調合管理強度に対する28日標準養生強度の比は、1.25であった。一般的なコンクリートの調合管理範囲の下限値近傍かつ、ばらつきは小さかった。
- (2) コア強度は、平均値が 50.2N/mm^2 、標準偏差が 3.66N/mm^2 であり、コア強度、すなわち構造体コンクリート強度の95%信頼区間の下限値と設計基準強度の差は 19.0N/mm^2 で、設計基準強度に対するこの下限値は約1.8倍の余裕を有していた。
- (3) コア強度とコアヤング係数の関係は、JASS5に示される圧縮強度とヤング係数の関係式に対して0.8~1.0倍であった。
- (4) コア強度およびコアヤング係数ともに、鉛直方向の分布から圧密の影響が確認されたが、コンクリート

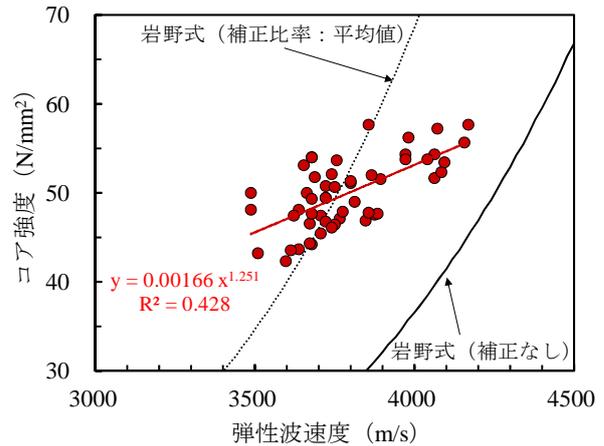


図-17 弾性波速度とコア強度

の製造ロットが異なる境界部で、その影響は一様ではなかった。

- (5) 反発度法による推定強度では、RC壁試験体の平均的なコア強度を概ね安全側に推定できた。
- (6) 衝撃弾性波法(多重反射法)による強度推定では、弾性波速度がコア強度の分布と同様の傾向を示した。

謝辞

実験にご協力頂いた東陽コンサルタント(株)の宮島真氏、リック(株)の岩野聡史氏に、深謝いたします。

参考文献

- 1) 黒田泰弘, 片山行雄, 藤丸啓一, 菅野光寿: レディーミクストコンクリートの実態調査, コンクリート工学, Vol.51, No.10, pp.792-800, 2013.10
- 2) 日本建築学会: 構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点, 2008.2
- 3) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983
- 4) 日本材料学会実施コンクリート強度判定委員会: シュミットハンマーによる圧縮強度推定式, 1958
- 5) 岩野聡史, 森濱和正, 渡部正: 衝撃弾性波法と微破壊試験の併用による構造体コンクリートの圧縮強度推定方法の提案, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.138-153, 2013
- 6) 嵩英雄ほか: 25年経過した実大鉄筋コンクリート壁体における普通および流動化コンクリートの構造体強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp.9-15, 2007.2
- 7) 鈴木澄江, 榊田佳寛, 佐藤幸恵: 構造体コンクリートから採取したコア供試体の圧縮強度レベルと確率分布形状, 日本建築学会構造系論文集, 第592号, pp.13-18, 2005.6
- 8) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 西田健治: 構造体コンクリートの強度のばらつき(昭和46年竣工RC造の場合), 第61回セメント技術大会講演要旨 2007, pp.321-322, 2007.