

論文 反発度法による高強度コンクリートの圧縮強度の推定に関する研究

渡邊 悟士^{*1}・陣内 浩^{*2}・黒岩 秀介^{*3}・並木 哲^{*4}

要旨：リバウンドハンマーを用いて測定した実大柱模擬部材およびφ100×200mmの円柱供試体の反発度による高強度コンクリートの圧縮強度の推定について検討を行った。高強度コンクリートの反発度と圧縮強度の関係は骨材などの使用材料による影響が大きいことが確認できた。また、構造体コンクリートと同じ材料を用いて作製したφ100×200mmの円柱供試体に圧縮強度の1/10以上の圧縮応力を与えながら測定した反発度と圧縮強度の関係をもとに、構造体コンクリートの圧縮強度を安全側に評価できるという結果が得られた。

キーワード：高強度コンクリート, 圧縮強度推定, 反発度, 非破壊, 構造体コンクリート

1. はじめに

最も信頼性の高い構造体コンクリートの圧縮強度試験方法として、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に基づいた直接的な強度試験がある。しかし、主に超高層建築物の柱などに用いられる高強度コンクリートの場合、配筋が密なため十分な寸法を有するコアの採取が困難である。また、仮に採取できたとしても構造体に与えるダメージが大きく、コア採取後の補修も困難である。

直接的な強度試験に対し、非破壊で構造体コンクリートの圧縮強度を推定する簡便な手法としてリバウンドハンマーを用いた反発度法がある。反発度からコンクリートの圧縮強度を推定するための推定式がいくつか提案されている^{1,2)}が、その多くは圧縮強度が60N/mm²以下のコンクリートを対象としたもので、高強度領域を対象とした研究³⁾は少ない。さらに、今日では圧縮強度が150N/mm²を超えるコンクリートも適用され始めているが、そのような超高強度領域を対象とする研究⁴⁾は極めて少ない。

本報では、圧縮強度60~200N/mm²程度、材齢7日~10年の高強度コンクリートを対象とし、リバウンドハンマーを用いて測定した実大柱模

擬部材の反発度と圧縮強度の関係について検討を行った。さらに、実大柱模擬部材と一緒に作製したφ100×200mmの円柱供試体を加圧固定した状態での反発度を測定し、この結果を同条件で作製した円柱供試体の圧縮強度と比較することで、高強度領域におけるリバウンドハンマーを用いた構造体コンクリートの圧縮強度の推定精度を高める手法について検討を行った。

2. 実大柱模擬部材の反発度と圧縮強度の関係

2.1 実験計画

(1) 実験の方針

本実験では、水結合材比(W/B)15~38%の高強度コンクリートを用いて実大柱模擬部材を作製し、型枠に接していた部材表面の反発度と部材より採取したコア供試体(φ100×200mm)の圧縮強度の関係について検討を行った。

(2) 使用材料および調合計画

使用材料およびコンクリートの調合条件をそれぞれ表-1および表-2に示す。調合記号のローマ字はコンクリートの製造施設の違いを表す。

全19調合中16調合では、早強ポルトランドセメント(HP)もしくは普通ポルトランドセメント(OP)に、スラグ石膏(SG)⁵⁾とシリカフ

*1 大成建設(株) 技術センター 研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 主任研究員 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター チームリーダー (正会員)

ューム (SF) を質量比 7 : 2 : 1 で混合した高強度用結合材を使用し、うち 2 調合では、圧縮強度に大きな影響を及ぼさない範囲でスラグ石膏の一部を膨張材に置換した。その他の 3 調合では、普通ポルトランドセメントと、シリカフュームを混合したスラグ石膏系の高強度用混和材 (SS)⁶⁾ を、質量比 8 : 2 で別計量して使用した。
細骨材には 4 種類の砕砂および 3 種類の天然

砂を単独または混合使用し、粗骨材には 4 種類の砕石 (最大寸法 20mm) を単独で使用した。

一部の調合では、本研究の対象とする強度領域のコンクリートを実施工する場合に使用が想定される、収縮低減機能を有する高性能減水剤もしくは収縮低減剤、および火災時の爆裂対策用繊維を、圧縮強度に大きな影響を及ぼさない範囲で使用した。

表-1 使用材料

結合材	HSS : 早強型高強度用結合材 (密度 2.98g/cm ²) [質量比 HP : SG : SF=7 : 2 : 1] OSS : 高強度用結合材 (密度 2.99g/cm ²) [質量比 OP : SG : SF=7 : 2 : 1] OSSE : 膨張材混合型高強度用結合材 (密度 2.99g/cm ²) OP+SS (別計量し、練混ぜ時に同時投入) [質量比 OP : SS=8 : 2] ただし、OP : 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ²) SS : 高強度用混和材 (密度 2.64g/cm ²)
細骨材	Qs : 段戸産石英片岩砕砂 (表乾密度 2.62g/cm ² , 吸水率 0.94%, 粗粒率 2.21) Ss : 青梅産硬質砂岩砕砂 (表乾密度 2.57g/cm ² , 吸水率 3.06%, 粗粒率 2.87) As : 大月産安山岩砕砂 (表乾密度 2.61g/cm ² , 吸水率 2.52%, 粗粒率 2.68) Ls : 峨朗産石灰岩砕砂 (表乾密度 2.67g/cm ² , 吸水率 1.27%, 粗粒率 3.56) Ns1 : 鹿島産天然砂 (表乾密度 2.58g/cm ² , 吸水率 1.02%, 粗粒率 2.90) Ns2 : 君津産天然砂 (表乾密度 2.62g/cm ² , 吸水率 1.54%, 粗粒率 2.76) Ns3 : 吉野産天然砂 (表乾密度 2.58g/cm ² , 吸水率 2.22%, 粗粒率 2.37)
粗骨材	Qg : 段戸産石英片岩砕石 (表乾密度 2.62g/cm ² , 吸水率 0.62%, 粗粒率 6.66) Sg : 青梅産硬質砂岩砕石 (表乾密度 2.64g/cm ² , 吸水率 0.65%, 粗粒率 6.89) Ag : 大月産安山岩砕石 (表乾密度 2.62g/cm ² , 吸水率 2.37%, 粗粒率 6.68) Lg : 峨朗産石灰岩砕石 (表乾密度 2.69g/cm ² , 吸水率 1.04%, 粗粒率 6.54)
混和剤	SP1 : アミノスルホン酸系高性能 AE 減水剤 (密度 1.13g/cm ²) SP2 : ポリカルボン酸系高性能減水剤 (密度 1.07g/cm ²) SP3 : 収縮低減型ポリカルボン酸系高性能減水剤 (密度 1.06g/cm ²) SR : 収縮低減剤 (低級アルコールアルキレンオキシド付加物) (密度 0.99g/cm ²)
繊維	EV : エチレンビニルアルコール共重合体繊維 (密度 1.14g/cm ² , 長さ 10mm) PP : ポリプロピレン繊維 (密度 0.91g/cm ² , 長さ 20mm)

表-2 コンクリートの調合条件

調合記号	使用材料 (表-1 参照)	W/B (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	結合材	細骨材	粗骨材		
TA-1	HSS, Qs, Qg, SP1	20	60 ± 15	2.0 ± 1.0	150	750	591	911		
TA-2	OSS, Ss+Ns1, Sg, SP1	22				681	337+343	899		
TA-3		27				556	392+400			
DM-1	OSS, Ns2, Ag, SP2, PP	21	60 ± 10	2.0 ± 1.0	155	738	603	912		
DM-2	OSS, As, Ag, SP2, EV	18	70 ± 10	1.5 ± 1.0	150	834	639	817		
DM-3		16				938	548			
DM-4						OSSE, As, Ag, SP2, EV	15		1000	494
DM-5										
DM-6	OSS, As, Ag, SP3, EV	18	70 ± 10	1.5 ± 1.0	150	834	637	818		
DC-1	OSS, As, Ag, SP2, EV									
DC-2	OSS, As, Ag, SP2+SR, EV	15	70 ± 10	1.5 ± 1.0	150	1000	494			
DC-3										
DC-4	OSSE, As, Ag, SP2, EV	21	60 ± 10	2.0 ± 1.0	155	738	307+297	937		
DC-5	OSS, Ls+Ns3, Lg, SP2, PP					574	381+368			
DC-6						27	408		456+440	
DC-7	OSS, Ls+Ns3, Lg, SP2	38	45 ± 7.5	2.0 ± 1.0	155	590+148	313+302	937		
DC-8	OP+SS, Ls+Ns3, Lg, SP2, PP	21	60 ± 10			459+115	385+372			
DC-9						27	326+82		458+443	
DC-10	OP+SS, Ls+Ns3, Lg, SP2	38	45 ± 7.5	2.0 ± 1.0	155	590+148	313+302	937		
DC-8	OP+SS, Ls+Ns3, Lg, SP2, PP	21	60 ± 10			459+115	385+372			
DC-9						27	326+82		458+443	

(3) 練混ぜおよび実大柱模擬部材の作製

練混ぜおよび実大柱模擬部材の作製の条件を表-3に示す。練混ぜにはいずれも水平二軸式強制練りミキサを用い、モルタルを練った後に粗骨材を投入してコンクリートを製造した。

実大柱模擬部材は、冬期、標準期、夏期の計3体作製することを基本としたが、TA-1~3およびDM-5では夏期もしくは冬期のみの1体を、DM-6では標準期、夏期の計2体を作製した。実大柱模擬部材の断面寸法は800×800mmもしくは1,000×1,000mmとした。型枠にはスチールフォームもしくは化粧合板型枠を用いた。水和熱による部材の上下方向の温度条件をできる限り近いものとするために、部材の上下面には100mm厚のポリスチレン板を配した。型枠は材齢6日で脱型し、脱型後部材は屋外に暴露した。

(4) 試験方法

実大柱模擬部材の反発度の測定はJIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」に従って、表-4に示す材齢で行った。測定には公称反発度80のテストアンビルにより性能を確認したリバウンドハンマー(N型)を使用した。互いに30mm程度の間隔をもった9点について測定を行い、測定結果の平均を実大柱模擬部材の反発度とした。測定箇所は部材の縁部から50mm以上離れた平滑な平面部とした。測定時には測定面が湿

っていないことを確認し、測定面に対して垂直に、水平方向に打撃を行った。

実大柱模擬部材からのコア供試体の採取およびその圧縮強度試験はJIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に従って行った。コアの採取は、硬化初期の発熱量の最も大きい中心部分や最も小さい表層部分を避け、部材の平均的な物性が得られるような位置で行った。コアボーリングは鉛直方向に行った。採取したコア1本から、4個もしくは5個のφ100×200mmの円柱供試体を作製して、表-4に示す材齢で圧縮強度試験を行い、試験結果の平均を実大柱模擬部材の圧縮強度とした。

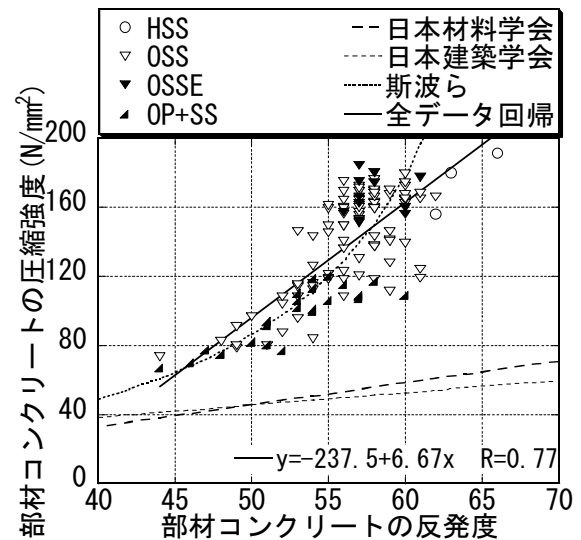


図-1 反発度と圧縮強度の関係 (結合材ごと)

表-3 練混ぜおよび部材作製の条件

調査記号	時期	ミキサ容量(m³)	練混ぜ量(m³)	部材寸法(mm)
TA-1~3	9月	1.0	0.8	800×800×900
DM-1~5	2月	3.0	1.5	1,000×1,000×1,100
DM-1~4,6	4月			
	7月			
	7月			
DC-1~10	2月	3.25	1.5	
	4月		1.6	
	7月			

表-4 実大柱模擬部材を用いた試験時の材齢

調査記号	時期	7日	28日	56日	91日	180日	7.5年	10年
TA-1~3	9月		○				○	○
DM-1~5	2月	○	○	○	○			
DM-1~4,6	4月		○	○				
	7月			○		○		
DC-1~10	2月		○	○	○			
	4月		○	○	○			
	7月		○		○			

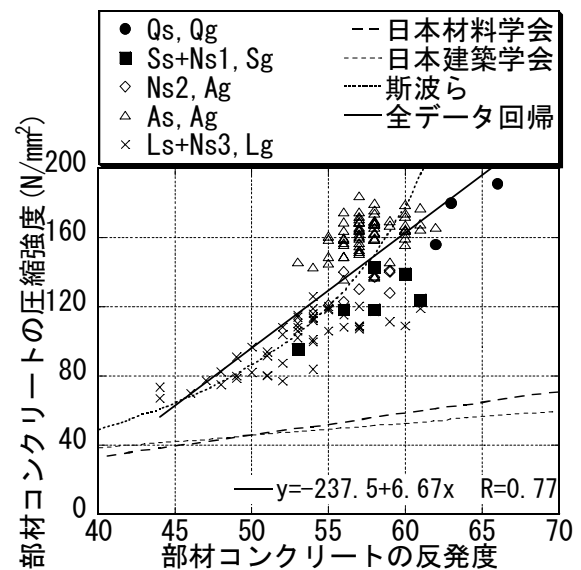


図-2 反発度と圧縮強度の関係 (骨材ごと)

2.2 実験結果および考察

使用結合材および使用骨材ごとに分類した、実大柱模擬部材の反発度と圧縮強度の関係を図-1 および図-2（凡例の記号については表-1 参照）に示す。図中には、本実験の結果を直線回帰したものとともに、日本材料学会¹⁾、日本建築学会²⁾、斯波ら³⁾が提案する推定式による推定値を本来の適用範囲外まで拡張して示している。

本実験の範囲でも、反発度と圧縮強度の間にはある程度の正の相関が確認できた。ただし、一般の強度領域を対象とする日本材料学会¹⁾および日本建築学会²⁾の提案する推定式では、本実験の結果を表現することはできなかった。一方、圧縮強度 130N/mm² 程度以下を対象とする斯波ら³⁾の提案式は、本実験の結果を比較的良く表現していたが、反発度が 60 以上の範囲では圧縮強度をかなり高く評価することとなった。そこで、本報では対象とする反発度を本実験の範囲（44～66）に限定することで直線回帰を採用した。

図-1 に示すように、比較的類似した結合材を用いた本実験では、使用結合材の違いがコンクリートの反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響を明らかにすることはできなかった。

図-2 の△で示す安山岩砕砂および碎石を用いた調合では、反発度が同程度でも他の調合と比べて圧縮強度がかなり高い傾向にあった。これは、用いる骨材の物性が高強度コンクリートの圧縮強度⁷⁾や反発度に及ぼす影響などに起因するものと考えられる。また、×で示す石灰岩碎石を用いた調合では、反発度が同程度でも外気温が高い時期に打設したものほど圧縮強度が低い傾向にあった。石灰岩碎石を用いたコンクリートは硬化初期に高温条件下にあると圧縮強度が低下する⁸⁾ため、部材内部が高温になる場合には、圧縮強度試験用コアの採取位置と表層部分のそれぞれにおけるコンクリートの圧縮強度の関係が、他の骨材を用いた場合の両者の関係と異なるものと考えられる。以上の結果から、使用骨材の違いが高強度コンクリートの反発度と圧縮強度の関係に影響を及ぼすと考えられる。

3. 構造体コンクリートの反発度と圧縮強度の関係を求めるための簡易的な試験方法

3.1 実験計画

(1) 実験の方針

本報で検討した調合はシリカフェームの使用などの共通条件も多かったため、使用骨材以外の条件がコンクリートの反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響については確認できなかった。しかし、本来、使用材料などの様々な条件がコンクリートの反発度と圧縮強度の関係に影響を及ぼす³⁾ことが報告されており、そのような影響を圧縮強度の推定に反映させる必要がある。ただし、調査の度に実大柱模擬部材を作製して構造体コンクリートの反発度と圧縮強度の関係を求めるのは現実的ではなく、強度管理用供試体などを用いて簡便に把握できれば合理的である。

JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」では、反発度測定面が曲面の場合と平面の場合での測定結果の差異について必ずしも明確でないことを理由に測定面を平面部に限定しているが、直径 150mm の円柱供試体の側面で測定した反発度は平面で測定したものと差異がないとの報告もある¹⁾ため、加圧した状態でφ100×200mm の円柱供試体の側面で反発度を測定し、簡易的に構造体コンクリートの反発度と圧縮強度の関係を求める手法について検討を行った。

(2) 円柱供試体の作製の条件

前節で述べた DM-1～4 および DM-6 の 5 調合のコンクリートを対象とし、7月に打設した実大柱模擬部材と一緒にφ100×200mm の円柱供試体を作製した。円柱供試体は JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に従って作製した。採取後約 24 時間温度 20℃の室内で封かん養生し、脱型した後に材齢 55 日まで標準養生を行った。両端面を研磨し、約 24 時間気中乾燥を行ったものを試験に使用した。

表-5 コンクリートの圧縮強度（単位：N/mm²）

調合	DM-1	DM-2	DM-3	DM-4	DM-6
円柱供試体	124	153	149	140	145
実大柱模擬部材	137	169	166	160	159

(3) 試験方法

反発度測定用供試体と同時に採取し同条件で養生および成形を行った供試体の圧縮強度を JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って測定し（表-5 参照），それをもとに反発度を測定する時の固定条件（与える圧縮応力）を圧縮強度の 1/100, 1/50, 1/20, 1/10, 1/3 の 5 水準に設定した。円柱供試体の圧縮強度試験および反発度の測定はいずれも材齢 56 日で行った。

円柱供試体の反発度の測定およびリバウンドハンマーの点検には実大柱模擬部材の場合と同じリバウンドハンマーおよびテストアンビルを使用した。各調合各加圧条件につき 3 個の円柱供試体を用いて，それぞれの高さ方向の中心付近で 1 点について反発度の測定を行い，3 個の試験結果の平均を円柱供試体の反発度とした。測定面は型枠に接していた供試体側面（曲面）とした。測定面に対して垂直（法線方向）に，水平方向に打撃を行った。（写真-1 参照）

3.2 実験結果および考察

円柱供試体に与えた圧縮応力を円柱供試体の圧縮強度で除した値と円柱供試体の反発度の関係を図-3 に示す。なお，同条件で測定した円柱供試体 3 個の反発度のばらつき（最大値と最小値の差）はいずれも 4 以下と比較的小さかった。

本実験の範囲では，円柱供試体の反発度は，与える圧縮応力が小さい場合に低く，圧縮応力が大きくなるに従って高くなり，さらに圧縮応力を圧縮強度の 1/10 以上とした場合には圧縮応力に関わらずほぼ一定となる傾向が見られた。一般の強度領域を対象とした既往の研究でも同様な傾向が確認されており，一般の強度領域では 2.5N/mm^2 以上の十分な圧縮応力を与えながら測定した試験体の反発度を 1.05 で除すことで実構造部材の反発度と同等に評価できる¹⁾ことが示されている。よって，圧縮強度の 1/10 以上の圧縮応力を与えながら測定した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体の反発度も同様に，高強度コンクリートの圧縮強度を評価するための有効な指標になりうると考えられる。



写真-1 円柱供試体の反発度測定状況

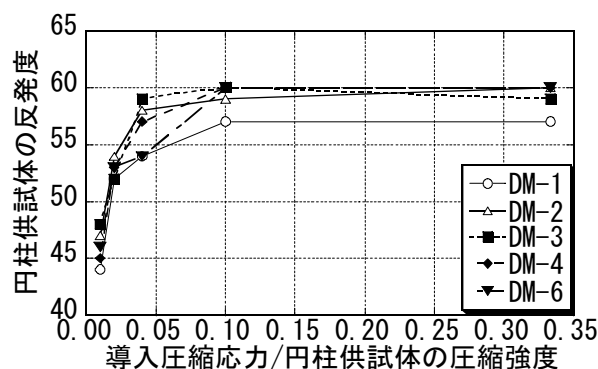


図-3 与える圧縮応力と反発度の関係

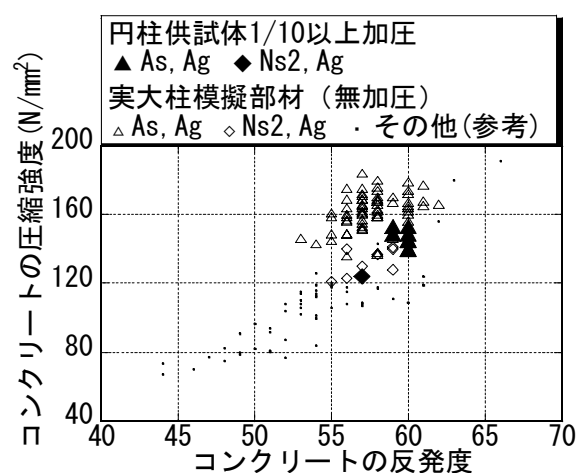


図-4 円柱供試体と実大柱模擬部材の比較

圧縮強度の 1/10 以上（1/10 および 1/3）の圧縮応力を与えながら測定した円柱供試体と前節の実大柱模擬部材について，反発度と圧縮強度の関係を使用骨材ごとに分類して図-4 に示す。

使用骨材ごとに比較すると，本実験の範囲では，得られた反発度が同程度であれば，円柱供試体（▲や◆）は実大柱模擬部材（△や◇）よりも圧縮強度が低い傾向にあった。前述のとおり，一般の強度領域では十分な圧縮応力を与えながら測定した試験体（図-4 の▲や◆に相当）の反発度は実構造部材（図-4 の△や◇に相当）の反発度よりも高い値となる¹⁾。これは，十分な圧縮応力を与えながら反発度を測定した試験体

の圧縮強度は、それと同程度の反発度が得られた実構造部材の圧縮強度よりも低いと換言でき、本実験においても同様の傾向が現れたものと考えられる。以上の結果から、実際の調査において、本節で提案する簡易的な試験方法によって得られた円柱供試体の反発度と圧縮強度の関係をもとに、実構造部材の反発度からその圧縮強度を安全側に（実際よりも低い値として）評価できるものと考えられる。なお、今後さらなる検討を行うことで、実務に適用可能な圧縮強度評価手法として確立できるものと考えている。

4. まとめ

圧縮強度 60~200N/mm² 程度のコンクリートについて、実大柱模擬部材の反発度と圧縮強度の関係、およびその関係を簡易的に求める手法について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 本実験の範囲でも、コンクリートの反発度と圧縮強度の間にはある程度の正の相関が確認できた。
- (2) コンクリートの反発度と圧縮強度の関係は使用材料によって異なると考えられたため、構造体コンクリートの圧縮強度の推定は、使用材料の影響を把握した上で行うことが理想的であると考えられた。
- (3) 圧縮強度の 1/10 以上の圧縮応力を与えながら測定したφ100×200mm の円柱供試体の反発度が、構造体コンクリートの圧縮強度を簡易的に評価するための有効な指標になりうる可能性を示した。
- (4) 本報の範囲では、(3)に示すφ100×200mm の円柱供試体を用いた試験の結果をもとに、構造体コンクリートの反発度からその圧縮強度を推定することで、構造体コンクリートの圧縮強度を安全側に評価できるという結果が得られた。

なお、本報で提案するφ100×200mm の円柱供試体を用いて高強度コンクリートの反発度と圧縮強度の関係を簡易的に求める手法に関しては、加圧による影響を考慮した補正方法の確立や、

強度領域が本報の検討範囲と異なる場合の適用性の有無の確認などを検討課題として、今後、さらに研究を進めていく予定である。

最後に、本実験を行うにあたって、第一コンクリート、デイ・シイ、横浜デイ・エム生コンの皆様には多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本材料試験協会 実施コンクリート強度判定法委員会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針（案），材料試験，Vol.7，No.59，pp.426-430，1958.8
- 2) 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，日本建築学会，pp.10-28，1989.4
- 3) 斯波明宏 他：リバウンドハンマーによる強度推定式の提案とその評価，コンクリート工学，Vol.43，No.2，pp.35-40，2005.2
- 4) Jinnai, H. et al.: Development and Construction Record on High-Strength Concrete with the Compressive Strength Exceeding 150MPa, 7th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Vol.2, pp.1045-1062, June.2005
- 5) 陣内浩 他：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.255-260，1994.6
- 6) 久保田賢 他：高強度混和材を用いた高強度コンクリートの特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.375-376，2005.9
- 7) 渡邊悟士 他：高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.588，pp.21-27，2005.2
- 8) 三井健郎 他：初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1025-1030，1995.6