

# テストハンマーによる構造物中のコンクリートの 圧縮強度検査法に関する研究

豊福俊泰<sup>1</sup>・添田政司<sup>2</sup>・岩原昭次<sup>3</sup>・堤 博文<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台 2-3-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 福岡大学助教授 工学部資源循環グループ (〒814-0133 福岡市城南区七隈 8-19-1)

<sup>3</sup>工博 崇城大学助教授 工学部建築学科 (〒860-0082 熊本市池田 4-22-1)

<sup>4</sup>正会員 麻生セメント株式会社荻田工場兼田川工場品質管理室 (〒800-0311 福岡県京都郡荻田町長浜町 10)

完成した構造物中のコンクリートの圧縮強度は、生コンクリートの品質変動のほか、構造物の形状・寸法、打込み・養生の方法、材齢、気象条件等によって大きく変動する。この検査には、コア抜きに困難さから、テストハンマーによる非破壊試験によることが多いが、推定誤差が大きいとされ、試験方法の確立には至っていないのが現状である。そこで、本研究は、テストハンマーによる非破壊試験に及ぼす各種要因を、普通コンクリートの供試体、高流動・高強度コンクリートの模型桁、長期経過した建築物で検討し、これらについて総合的に解析した結果から、テストハンマー試験によって構造物中のコンクリート(コア供試体)の圧縮強度を推定する方法を提案したものである。

*Key Words : test hammer, non-destructive test, compressive strength, concrete in structures*

## 1. はじめに

一般に、構造物中のコンクリートの圧縮強度(構造体コンクリートの強度)は、標準養生あるいは現場養生した円柱供試体の圧縮強度から推定されている。しかし、そのコンクリートは、現場内での運搬、打込み、締固め、養生の方法、天候など施工中の各種条件によって品質が変動するため、円柱供試体による圧縮強度とは必ずしも一致せず、ばらつきが生じる。更に、構造物中のコンクリートの圧縮強度は、その分布が均一とならず、抜き取ったコアによる圧縮強度から推定する場合、コアの採取位置の高低差や方向、柱、壁、床版といった部材の種類によっても異なることが多々ある<sup>1), 2)</sup>。

構造物中のコンクリートの圧縮強度を、施工段階および維持管理段階において、構造物の施工箇所から採取した供試体を用いて試験・検査する方法としては、次の4ケースが採用されている。

[ケース1] 生コンクリート工場における標準養生の円柱供試体の圧縮強度：土木工事における施工段階の一般的な試験・検査方法

[ケース2] 施工箇所における現場養生の円柱供試体の圧縮強度：建築工事における施工段階の一般的な試験・検査方法

[ケース3] 施工箇所における現場養生の角柱供試体から採取したコア供試体の圧縮強度：一部の土木工事における施工段階の試験・検査方法

[ケース4] 施工後のコンクリート構造物から採取したコア供試体の圧縮強度：土木・建築工事における維持管理段階の一般的な試験・検査方法

いずれのケースも、完成した構造物中のコンクリートの品質を確認する必要がある場合、コア供試体の圧縮強度から推定する方法が一般的な試験方法であるが、コア抜きに困難さから、テストハンマーによる非破壊試験を採用することが多い。ところが、テストハンマー試験は、試験方法が簡便で容易な反面、テストハンマー強度に及ぼす要因が多岐にわたるため、これまで多数の強度推定式が提案されているが推定誤差が大きいとされ、信頼できる試験方法の確立には至っていないのが現状である<sup>1)~5)</sup>。

そこで、本研究は、テストハンマーによる非破壊試験から、構造物中のコンクリートの圧縮強度検査法を検討することを、目的としたものである。まず、テストハンマー試験に及ぼす各種要因を普通コンクリートの供試体で求め、つぎに、高流動・高強度コンクリートを用いた模型桁で高強度域への適用、長期材齢を経た建築物で実構造物への適用を検討し、これらについて総合的に解析した結果から、テストハンマーによるコア供試体の圧縮

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	配合 (kg/m <sup>3</sup> )				注)
			C	W	S	G	
普通15	86	49.1	165	192	922	1024	0.480
普通30	52	45.2	163	314	806	1046	0.785
普通45	38	38.4	180	474	617	1063	1.185
普通60	30	35.9	170	567	558	1071	4.820
モルタル30	52	100	263	506	1298	-	1.265

注) 普通60: 高性A E減水剤, 他はA E減水剤

表-2 試験計画

コンクリートの種類	材齢 注)	供試体の種類	養生方法
普通15	1週	円柱供試体	水中養生
普通30		曲げ供試体	空气中養生
普通45	2週	柱部材	膜養生剤塗布養生 空气中養生
普通60	4週	床部材	
モルタル30	6週	大柱部材	
標準30	8週	小床部材	
		中床部材	

注) 普通15: 材齢7日, 16日, 28日, 40日, 57日  
 普通30: 材齢7日, 16日, 28日, 40日, 58日  
 普通45: 材齢7日, 16日, 28日, 40日, 55日  
 普通60: 材齢7日, 16日, 28日, 40日, 57日  
 モルタル30: 材齢7日, 15日, 28日, 41日  
 標準30: 材齢7日, 28日

強度の推定方法を検討することとした<sup>6)</sup>。

## 2. テストハンマー試験に及ぼす各種要因

### (1) 実験概要<sup>7), 8)</sup>

テストハンマー試験に及ぼす各種要因を求める実験は、コンクリートの種類を、表-1 および表-2 に示すように、呼び強度 15, 30, 45, 60 の4種類のレディーミキストコンクリート(スランプ8cm, 空気量4.5%)とモルタル(呼び強度30のコンクリートから粗骨材を除外した配合)とし、これらを購入して打ち込み、供試体を製作した。供試体は、図-1 に示すように、検査対象の構造物を円柱供試体(高さ20×φ10cm)、曲げ供試体(高さ15×15×53cm)、柱部材(高さ60×20×50cm)、床部材(高さ20×60×50cm)、大柱部材(高さ120×20×50cm)、小床部材(高さ15×15×60cm)および中床部材(高さ20×20×60cm)で代表させるものとした。

使用材料は、普通ポルトランドセメント、海砂(密度2.65g/cm<sup>3</sup>)、砕石(最大寸法20mm, 密度2.65g/cm<sup>3</sup>)である。養生条件は、空气中養生(1日後脱枠し、屋内で養生)を基本とし、膜養生剤塗布養生(油脂系。表面の水光りが消えた直後に原液質量130g/m<sup>2</sup>を塗布後、空气中養生)、標準養生(膜養生剤塗布して5日間湿布散水養生後、脱枠し空气中養生)の2水準と比較した。床部材は、上面半分に膜養生剤塗布養生または標準養生としたが、脱枠後に、上面以外の全ての部分に布テープを巻き養生した。

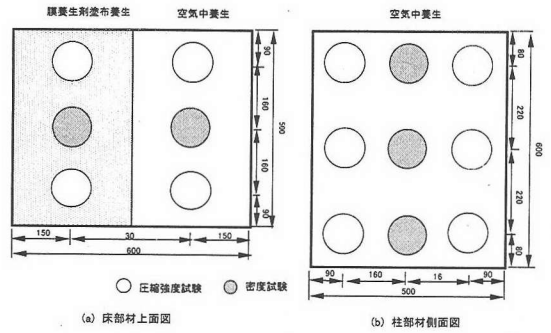


図-1 供試体

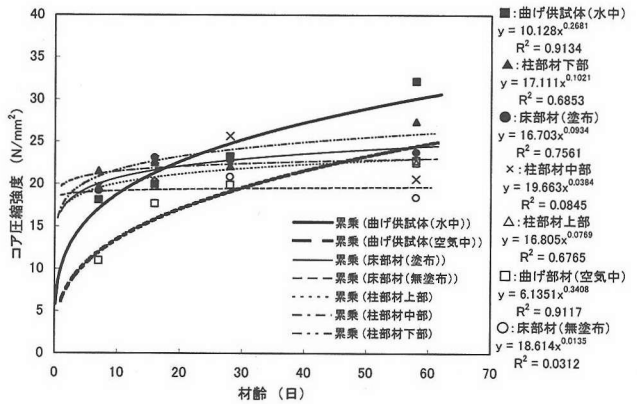


図-2 材齢と圧縮強度との関係(普通30)

試験は、材齢15~58日において、土木学会規準(JSCE-G504-1999)<sup>9)</sup>に基づくテストハンマー試験(亀倉精機α-800RJ型)および水分量試験(高周波容量式水分計HI-500)を非破壊試験として行った後、コア供試体(高さ20×φ10cm)を採取し、円柱供試体とともに圧縮強度(JIS A 1108)を測定した<sup>9)~11)</sup>。テストハンマー試験における打撃方向の影響は、曲げ供試体を水平および鉛直に打撃することにより測定した。また、密度試験は、コアの上下面から1cm間隔にカッターで切断し、各部の表乾密度を測定した。

測定結果は、圧縮強度試験データとこれを推定する試験データとの関係を、重回帰分析(直線式、変数増減法、F<sub>IN</sub>=F<sub>OUT</sub>=2.0)で解析した。この場合、コアの圧縮強度F<sub>cc</sub>(N/mm<sup>2</sup>)を目的変数として、コンクリートの圧縮強度の推定方法に関する研究<sup>12)</sup>を参考に、次に示す10項目を説明変数として採用した。

テストハンマーの反発度: H, テストハンマーの打撃方向(1: 水平, 2: 鉛直): HOU, 水分量(%): SU1, 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>): C, 単位水量(kg/m<sup>3</sup>): W, 空気量(%): A, 養生条件(1: 空气中養生, 2: 膜養生剤塗布養生, 3: 水中養生): YO, 材齢(7, 14, 28, 56日): ZA, 供試体の種類(1: 曲げ供試体・床部材, 2: 柱部材・

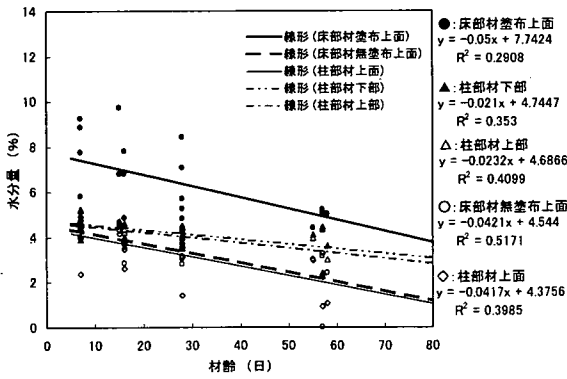


図-3 材齢とコンクリートの水分量

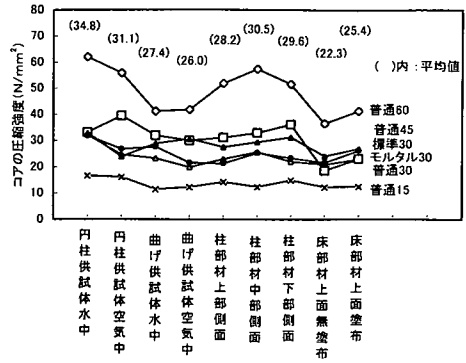


図-4 部材の種類と圧縮強度との関係 (材齢 28 日)

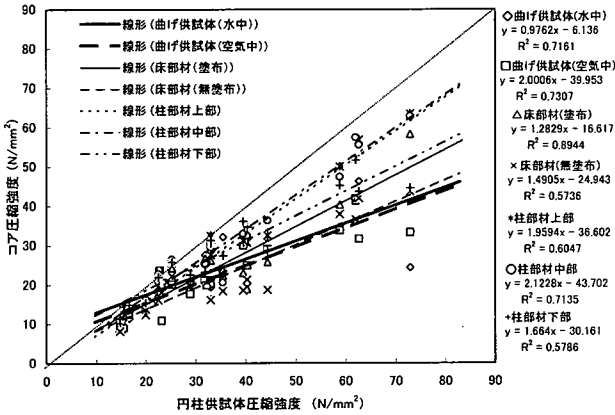


図-5 コア供試体と円柱供試体の圧縮強度

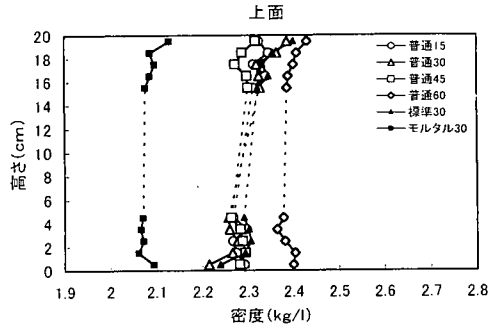


図-6 床部材 (膜養生剤無塗布) の密度

円柱供試体) : DAS, 測定場所 (1 : 上面, 2 : 側面上部, 3 : 側面中部, 4 : 側面下部, 5 : 下面) : SO

## (2) 実験結果および考察

### a) コア供試体の圧縮強度と円柱供試体の圧縮強度との関係

コンクリートの圧縮強度は、一般に材齢の経過とともに増加するが、養生条件の影響を受け変動が生じており、水分が蒸発し乾燥する空气中養生の場合には強度の発現が小さくなっている (図-2 参照)。コンクリート表面 (柱部材および床部材) の水分量は、図-3 に示すように、材齢の経過とともに減少しており、膜養生剤塗布面に比べ無塗布面は約 4% 水分量が少なくなっている。

部材の種類と圧縮強度との関係は、コンクリートの種類別に示すと、図-4 のとおりである。円柱供試体では、水中養生の圧縮強度の平均値 34.8N/mm<sup>2</sup> で、空气中養生の圧縮強度 31.1N/mm<sup>2</sup> より高くなっている。コンクリート 6 種類のコア強度の平均値は、曲げ供試体の場合、水中養生 27.4N/mm<sup>2</sup>、空气中養生 26.0N/mm<sup>2</sup> であり、円柱供試体と同様に前者の方が高くなっており、圧縮強度は、

コアの方が円柱供試体より低くなっている (図-5 参照)。柱部材側面の場合、上部 28.2N/mm<sup>2</sup>、中部 30.5 N/mm<sup>2</sup>、下部 29.6 N/mm<sup>2</sup> となっており、上部の方がやや強度が低くなっている。床部材の上面の場合、コアの平均値が膜養生剤塗布面では 25.4N/mm<sup>2</sup>、無塗布面では 22.3N/mm<sup>2</sup> であり、後者の方が約 12% 低く、しかも柱部材より約 25% 低くなっている。打ち込まれたコンクリートは、部材の上下部や壁面部で、ブリーディングや圧密により締固め程度の差が生じることが想定されたが、密度にはこの差は認められない (図-6 参照)。

以上のことから、コア圧縮強度  $F_{cc}$  に及ぼす各種の要因 (前述の 7 項目) を重回帰分析の結果、式 (1) および図-7 が得られた。ここで、下段の ( ) 内は  $t$  値、 $n$  : データ数、 $R$  : 重相関係数、 $e_s$  (N/mm<sup>2</sup>) : 残差の標準偏差。

$$F_{cc} = 0.3629 + 0.083577C - 2.3162A + 5.2136DAS + 0.09882ZA + 1.3119YO - 0.055399W \quad (1)$$

(0.09) (25.99) (-3.03) (5.67)  
(4.09) (1.90) (-1.74)

( $n=202, R=0.889, e_s=5.43\text{N/mm}^2$ )

コア圧縮強度は、配合要因である単位セメント量との相関が最も強いが、次に供試体の種類、材齢、空気量、養生条件、単位水量との相関が認められ、測定場所は変

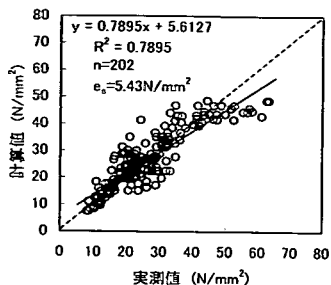


図-7 式(1)の重回帰分析の精度

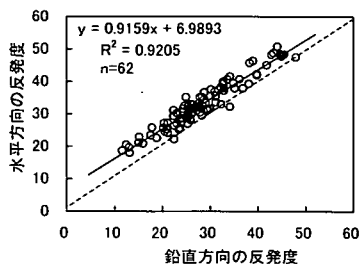


図-8 打撃方向による反発度の補正

数から除外されている。データ解析によるコンクリートの圧縮強度（標準養生の円柱供試体）の推定方法に関する研究においても、1変数の項目としては単位セメント量との相関がきわめて強いことが解明されている<sup>12)</sup>が、この傾向は、供試体の種類、材齢、養生条件、測定場所を変数に加えても、同様の傾向となっている。

#### b) テストハンマー試験に及ぼす要因

テストハンマー試験における打撃方向の影響は、曲げ供試体（材齢 7～58 日）により測定した結果、図-8 の関係が求められた。鉛直方向に打撃した反発度は、この関係から水平方向の反発度に補正した。

部材の種類別にコアの圧縮強度と反発度との関係を求めると、図-9 に示すように部材の種類、養生条件などによってばらつきが生じている。床部材の場合、前述のように柱部材に比べ圧縮強度が低くなるのに加え、関係式の勾配が柱部材より小さくなっており、反発度の増加に比べ、圧縮強度の増加が小さくなっている。この原因は、ブリーディングの影響であると考えられ、上面の反発度も下面に比べ小さく測定されることから、ここでは上面の反発度を採用した。養生条件は、膜養生剤塗布養生のほうが、無塗布養生に比べ良い相関性を示した。曲げ供試体の場合、空气中養生のほうが水中養生に比べ良い相関性を示した。

図-10 は、コア圧縮強度と反発度のコア圧縮強度に対する比（反発度コア圧縮強度比と呼ぶ）との関係を、全データで求めたものである。コア圧縮強度が 15 N/mm<sup>2</sup> 以内では、反発度コア圧縮強度比が急激に大きくなっており、低強度では反発度が高めとなっている。この結果

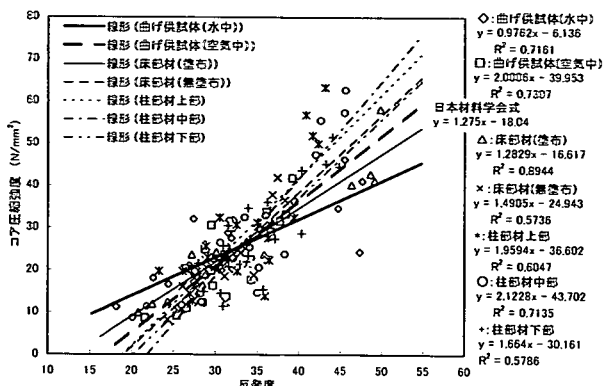


図-9 部材の種類別の圧縮強度と反発度

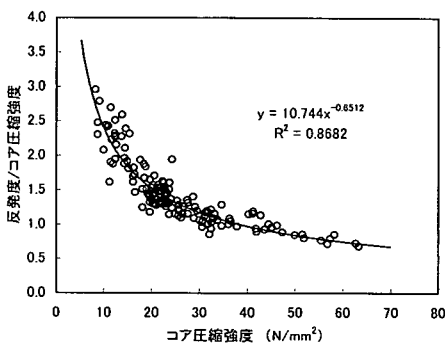


図-10 コア圧縮強度と（反発度/コア圧縮強度）

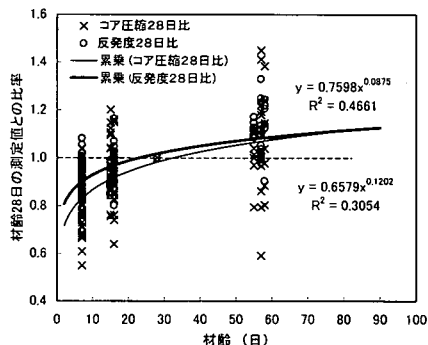


図-11 材齢と材齢 28 日の測定値との比率

は、これまで報告されているものと同じ傾向を示している<sup>13)</sup>。

反発度および圧縮強度と材齢との関係<sup>1)</sup>を、材齢 28 日を基準（補正值 1.00）として求めると、材齢初期には圧縮強度に比べ反発度が高めとなっている（図-11 参照）。シュミットハンマー取扱説明書の補正值では、逆に反発度を高く補正する<sup>1)</sup>（材齢 10 日で 1.55 倍）とされており、傾向が異なっている。

以上のコア圧縮強度  $F_{cc}$  に及ぼす諸要因について、重

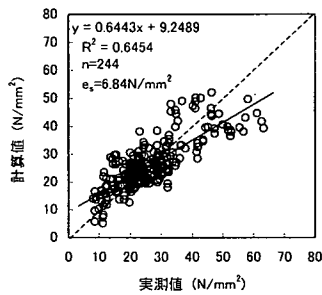


図-12 式(2)の重回帰分析の精度

表-3 使用材料

材 料	種 類	密 度 (g/cm³)	性 能	略号
結合材	早強ポルトランドセメント	3.14	比表面積: 4530cm²/g	C
	高炉スラグ微粉末	2.91	比表面積: 4250cm²/g 比表面積: 5920cm²/g	BS4 BS6
細骨材	砕砂 (甘木産)	2.91	実積率: 54.8%	S1
	砕砂 (石灰岩)	2.62	実積率: 56.9%	S2
粗骨材	砕石 (甘木産)	2.95	実積率: 60.2%	G
混和剤	高性能AE減水剤	—	ポリカルボン酸系	SP

表-4 コンクリートの配合

区分	コンクリートの種類	スラグの種類	置換率 BS/P (%)	G/Glim (m³/m³)	W/P (%)	s/a (%)	単位数 (kg/m³)					SP (C×%)	
							W	P		S1	S2		G
								C	BS				
実験1	高流動	—	—	0.47	35	56.6	175	500	—	521	501	818	1.00
						56.4	175	350	150	516	496	818	0.85
						56.3	175	250	250	512	492	818	0.80
						56.4	175	350	150	516	496	818	0.90
						56.3	175	250	250	512	492	818	0.90
実験2	高強度	—	—	0.58	40.5	48.2	170	420	—	456	456	1024	1.00
	高流動	BS4	30	0.53	35	49.5	175	350	150	437	439	938	0.95
	高強度	—	—	0.58	40.5	48.2	170	420	—	456	456	1024	1.00
	普通	—	—	0.61	68	48.5	170	250	—	487	487	1079	1.00

注) G/Glim: 単位粗骨材かさ容積, P: 粉体量, その他の略号は表-3参照

回帰分析の結果, 式(2)および図-12が得られた。

$$\begin{aligned}
 f_{cc} = & -17.9947 + 1.4524H + 1.3588YO - 0.0516ZA \\
 & (-5.54) \quad (20.04) \quad (2.28) \quad (-1.80) \\
 & -1.0847SO - 1.6412HOU \\
 & (-2.22) \quad (-1.63)
 \end{aligned} \quad (2)$$

(n=244, R=0.803, e<sub>s</sub>=6.84N/mm<sup>2</sup>)

これから, 圧縮強度は, 反発度と最も相関が強く, 養生条件, 材齢, 測定場所, 打撃方向との相関性が認められた。

### 3. 高強度・高流動コンクリートを用いた模型桁へのテストハンマーの適用

#### (1) 実験概要

粉体量が多く骨材量が少ない高流動コンクリート (以下, 高流動コンクリート) や, 高強度コンクリートを用いた場合でも, テストハンマー法が適用できるのかを明らかにするため, 室内実験 (実験1) およびPC工場での施工実験 (実験2) を行った。

#### a) 使用材料および配合

使用材料を, 表-3 に示す。コンクリートの種類は, 高流動コンクリート, 高強度コンクリートおよび普通コンクリートの3種類とした。その配合を, 表-4 に示す。実験1では, 高炉スラグ微粉末の種類と置換率を変えた5種類の高流動コンクリートを用い, また, 普通コン

クリートとして, 材料の異なるレディーミクストコンクリート (呼び強度の値21N/mm<sup>2</sup>, スランプ8cm, W/C=59%, s/a=45%) を用いた。

#### b) 供試体寸法および養生方法

テストハンマー試験用供試体として, 実験1【夏季】では立方供試体, 実験2の【夏季】では模型ホロー桁 (高流動, 高強度コンクリート) と平板 (高強度, 普通コンクリート), 【秋季】では模型ホロー桁 (高流動, 高強度コンクリート) を用いた。供試体寸法と養生条件の詳細を, 表-5 および図-13 に示す。実験1, 2ともに圧縮強度試験用として, 円柱供試体 (φ10×20cm) を準備し, 養生条件はテストハンマー試験用供試体と同一条件とした。蒸気養生条件は, 前置時間を3時間, 最高温度は, 高流動コンクリートでは50℃とし, 高強度と普通コンクリートでは60℃とした。練上がり温度は, 夏季で30±2℃, 秋季で20±2℃であった。フレッシュ性状の評価には, 高流動コンクリートでスランプフロー試験 (目標値 65±5cm), V漏斗試験 (目標値 10±5秒), 空気量試験 (目標値 2.0±1.0%) を, 高強度, 普通コンクリートでスランプ試験 (目標値 12, 8±2.5cm), 空気量試験 (目標値 2.0, 4.0±1.0%) を行った。

#### c) 実験方法

テストハンマー試験は, シュミットハンマーN型を用い JSCCE-G504-1999 に基づき, 測定面 (12×12cm) の3cm間隔 25点を打撃した。実験1では応力2.45N/mm<sup>2</sup>のも

表-5 供試体の寸法および養生条件

区分	供試体の種類および寸法	養生条件
実験1	立方供試体 (20×20×20cm)	蒸気養生 恒温養生
		蒸気養生 湿布養生
		湿布養生
実験2	模型ホロー桁 (64×100×200cm)	現場養生
		現場養生
	模型ホロー桁 (90×100×15 60cm)	現場養生
実験2	模型ホロー桁 (64×100×200cm)	蒸気養生 現場養生
		蒸気養生 湿布養生
		現場養生

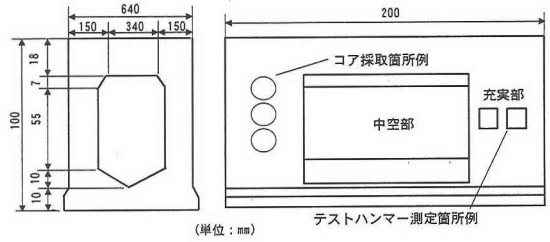


図-13 模型桁の寸法およびコア採取・非破壊試験箇所

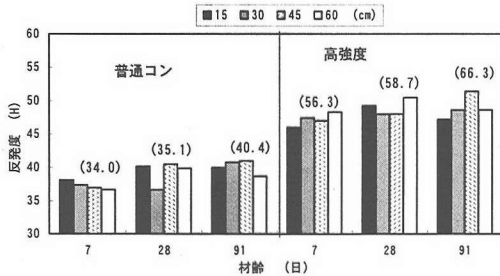


図-14 部材厚の異なる平板の反発度

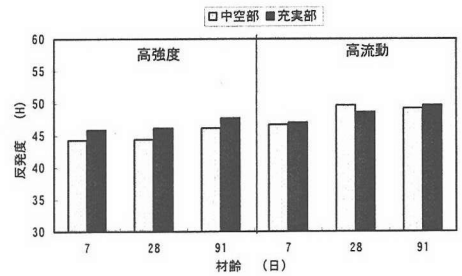


図-15 模型ホロー桁の充実部と中空部 (部材厚 12cm) の反発度

とに供試体を圧定したのち試験を行った。平均反発度 H は、その偏差が平均値の±20%を超える測定値を棄却した算術平均とした。テストハンマー試験および圧縮強度試験は、材齢 1, 7, 28 および 91 日に行った。実験 2 でのコア供試体 (φ10×20cm) の採取および圧縮強度試験は材齢 28 日および 91 日に行った。

## (2) 実験結果および考察

### a) 部材厚の影響

図-14 は、実験 2【夏季】における部材厚の異なる各平板の反発度を、材齢ごとに示したものである。なお、( ) は円柱供試体の圧縮強度を示したものである。反発度は、普通コンクリートおよび高流動コンクリートとともに材齢の経過とともに大きくなっている。普通コンクリート、高強度コンクリートいずれの部材厚においても、顕著な差は認められない。コンクリートの厚みが 30cm 以上で反発度は安定することが言われている<sup>3)</sup>が、本実験ではそのような傾向は見られない。

図-15 は、実験 2【夏季】における模型ホロー桁の充実部と中空部 (部材厚 12cm) の反発度を示したものである。高強度、高流動コンクリートともに、中空部に比べ若干充実部の反発度が高いものの、ほとんどその差は見られない。高強度でホロー部のような剛性の高い部位であれば、部材厚が 12cm 程度でも反発度にはほとんど差が生じていない。

### b) 養生条件の影響

図-16 は、実験 2 の模型ホロー桁における反発度と円

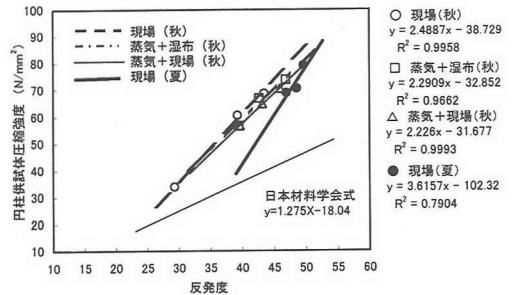


図-16 高流動コンクリートの反発度と圧縮強度 (実験 2)

柱供試体の圧縮強度の関係を、養生条件別に示したものである。蒸気養生の場合、どの養生条件においても圧縮強度の増進とともに反発度も伸びており、養生条件による反発度の影響はほとんどないが、現場養生 (夏) の場合、他に比べ圧縮強度が高くなっている。

### c) 反発度と圧縮強度の関係

図-17 は、全ての配合および養生条件での実験 1, 2 の反発度と円柱供試体圧縮強度との関係を示す。普通コンクリートの回帰式は、材料学会式の傾きとほぼ一致しているが、全体的に材料学会式よりも反発度に対する圧縮強度が高くなっている。材料学会式は、反発度 R=18~45 (標準供試体強度=5~45N/mm² 程度) の範囲で得られた関係であり、高強度領域にあるコンクリートにおいては考慮されていないためと判断され、実験結果の下限に位置しており、安全側にあると言える。粉体量が多く、

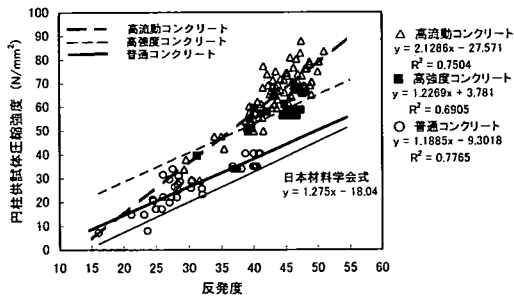


図-17 コンクリートの種類別の反発度と圧縮強度

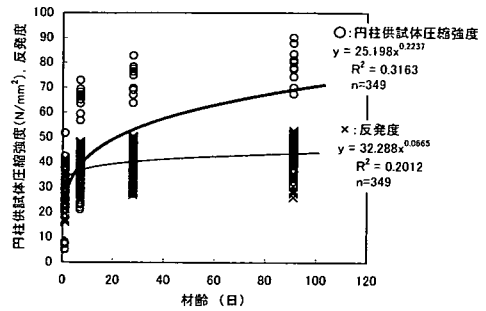


図-18 材齢と円柱供試体圧縮強度・反発度

骨材量が少ない高流動コンクリートではそれよりもさらに任意の反発度に対する強度が高くなっている<sup>14)</sup>。

#### d) 材齢の影響

図-18は、材齢と円柱供試体圧縮強度、反発度との関係であり、強度の変動に比べ反発度の変動が小さく、材齢28日を基準とすると、材齢初期には、反発度が圧縮強度より高めになっている。

#### e) コア供試体圧縮強度と円柱供試体圧縮強度

図-19は、円柱供試体の圧縮強度と実験2で採取したコア圧縮強度との関係を示したものである。コア圧縮強度は、円柱供試体の圧縮強度とほぼ一致しており、図-5で示したコア供試体の強度低下は、高強度域で認められるが全体的に少なくなっている。これは、一般に、コア圧縮強度は、円柱供試体の圧縮強度と比べて、高強度になるほど低下する傾向が強くなるためと考えられる。

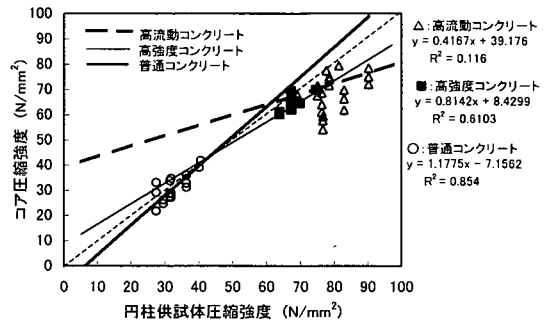


図-19 円柱供試体圧縮強度とコア圧縮強度

### 4. 長期材齢を経た既存建築物へのテストハンマーの適用

#### (1) 調査概要

建築物における既存建築物調査とコンクリート圧縮強度と中性化などの測定には、既存鉄筋コンクリート造「学校建物の耐力測定方法」<sup>13)</sup>が利用される。長期材齢を経た既存RC建物のコンクリート強度に関する調査や研究はこれまでに多くの報告がある<sup>例えば15)~17)</sup>。しかし、これらの報告の多くはコア圧縮強度に関するものであり、一方テストハンマーによる圧縮強度については少ない。特に、コア圧縮強度とテストハンマーに関する圧縮強度の相関については野崎、十代田らの研究があるにすぎないようである<sup>18)~20)</sup>。

そこで、熊本県と福岡県において既存RC建築物の調査を行った結果から、建物別あるいは階別を含めて構造体コンクリートの圧縮強度について、コア抜き取りによる圧縮強度とテストハンマーによる圧縮強度との相関について考察した。

#### a) 熊本県分の調査概要

対象建物は、RC造の建物89棟で、1937年(昭和12年)から1981年(昭和56年)の間に竣工し、一般環境下にあったものである。調査は、1996年から2000年にかけて実施したもので、対象建物の経過年数は17~60年の範囲にある。

建物1棟当たりの調査箇所数は3~30箇所で平均16箇所であり、得られた調査箇所数は全体で1410箇所である。調査箇所数を表-6に、仕上げの有無と室内外の区分によるデータ数を図-20に示す。また、表-7に圧縮強度のデータ数を示す。なお、ここでのロットとは、建物の各階における同一部材のデータを1グループとした。

#### b) 福岡県分の調査概要

対象建物は、1980年(昭和55年)以前に建造されたRC造の建物137棟で、調査は1997年から2000年にかけて実施したものである。調査は、柱部に対しては室外でシュミットハンマー法により、壁部に対しては室内でコア圧縮法により測定を行った。今回の調査では、柱および壁とも全てにモルタルによる仕上げが施されていた。データ数などを、表-8に示す。

#### c) コンクリートの圧縮強度測定方法

圧縮強度の測定は、柱・梁に対してテストハンマー試験を行い、壁・床からコア供試体採取する方法で行った。このため、両者の対象部位と測定位置が異なってお

表-6 熊本県分の調査箇所数

区分	1階総数	2階総数	3階総数	4階総数	合計
柱	242	210	171	33	656
壁	266	239	197	35	737
床	2	3	3	0	8
梁	5	2	2	0	9

表-7 熊本県分の圧縮強度のデータ数

試験方法	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	棟数	ロット数	データ数
コア圧縮強度	17.6	25	65	200
コア圧縮強度	20.6	39	117	354
コア圧縮強度	34.3	2	5	15
コア圧縮強度	不明	14	39	144
テストハンマー	17.6	25	43	157
テストハンマー	20.6	38	105	322
テストハンマー	34.3	2	5	15
テストハンマー	不明	23	41	149

(注)：ここでのロットとは、建物の各階における同一部材のデータを1グループとしたものである

表-8 福岡県分の調査箇所数

試験方法	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	棟数	ロット数	データ数
コア圧縮強度	不明	137	227	638
テストハンマー	不明	137	227	454

(注) ここでのロットとは、建物の各階における同一部材

り、テストハンマー強度とコア圧縮強度との比較は、同一建物における同一階の圧縮強度の平均値で行った。各試験は、目視でひび割れなどが発生していない箇所において行った。

テストハンマー試験は、シュミットハンマーNR型またはN型を用い、表面のモルタル部分を除去した後、既存鉄筋コンクリート造「学校建物の耐力度測定方法」<sup>12)</sup>に準じて行った。また、コア供試体は、採取後、仕上げがある場合にはこの部分を除去して整形後、圧縮強度試験を行った。

## (2) 調査結果および考察

### a) コア圧縮強度の調査結果

本調査における建物の竣工年は、昭和35～56年が大部分であり、この間においては建築工事標準仕様書(JASS 5)のコンクリート圧縮強度関係の規定に大きな変化はない。本文にデータとして載せていないが、熊本県分の調査結果でみると、コア圧縮強度と設計基準強度との差である設計強度差は、竣工年に関係なく大きな変化がみられず、その平均値はコア圧縮強度で4.0N/mm<sup>2</sup>であり、設計強度差が0より小さい値を示す建物は全体で約22%であった。

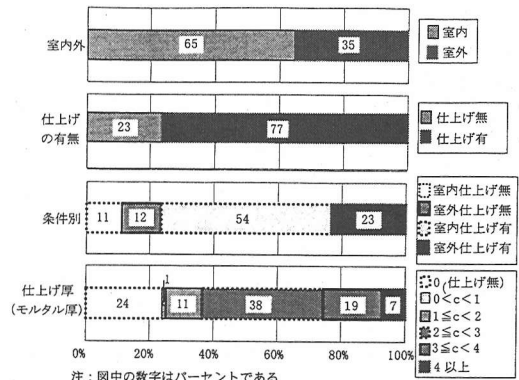


図-20 熊本県分における室内外の区分と仕上げの有無に対するデータ割合

また、竣工年と建物1棟毎のコア圧縮強度の標準偏差との関係も、竣工年に大きな相関はみられず、その標準偏差の単純平均は5.1N/mm<sup>2</sup>であり、設計強度差の平均値に対して1.3倍であった。さらに、建物の階層別におけるコア圧縮強度の平均値は、 $F_c + \sigma$  [ここで、 $F_c$ は設計基準強度、 $\sigma$ は標準偏差(2.5N/mm<sup>2</sup>)]に対する比率が1階:1.10, 2階:1.06, 3階:1.00, 4階:1.05であり、これらの比率と竣工年との関係を求めたが、階数別によるコンクリートの圧縮強度との相関には、大きな違いは見られなかった。

### b) 反発度とコア圧縮強度との関係

テストハンマー試験とコア圧縮強度の相関については、熊本県で調査が行われた89棟の圧縮強度のデータと福岡県で調査が行われた137棟におけるデータを用いて、分析・考察を行った。

熊本県分の調査結果を図-21に、福岡県分の調査結果を図-22に、それぞれ示す。反発度とコア圧縮強度との関係は、両試験方法の対象部位と測定位置が異なっているため、適合範囲の誤差が含まれており判断は難しいが、熊本県および福岡県の両結果とも、圧縮強度が約10～40N/mm<sup>2</sup>の範囲において、ばらつきがあるが直線関係が認められる。また、その直線の傾きは互いに近似しているが、日本材料学会式とは適合していない。

### c) 仕上げ厚さ別の反発度とコア圧縮強度

図-23は、仕上げ厚さ別に反発度とコア圧縮強度との関係を求めたものであり、ばらつきが大きい。全体的には仕上げ厚さが厚いほど反発度との相関性があり、コア圧縮強度が小さくなる傾向が認められる。仕上げ厚さが、養生条件の差として現れているものと推測されるが、圧縮強度の初期値が不明なため、反発度の補正の必要性は判断できない。

### d) 材齢とコア圧縮強度・反発度との関係

両県分の全データの材齢とコア圧縮強度、反発度との



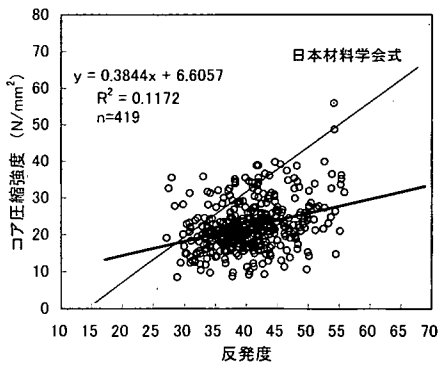


図-21 反発度とコア圧縮強度 (熊本県)

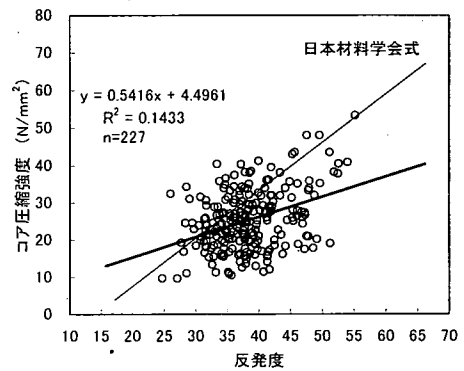


図-22 反発度とコア圧縮強度 (福岡県)

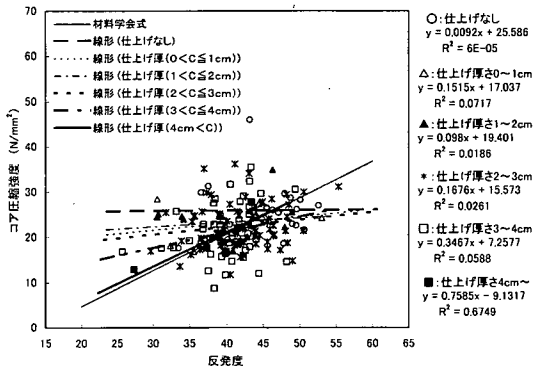


図-23 仕上げ厚さ別の反発度とコア圧縮強度

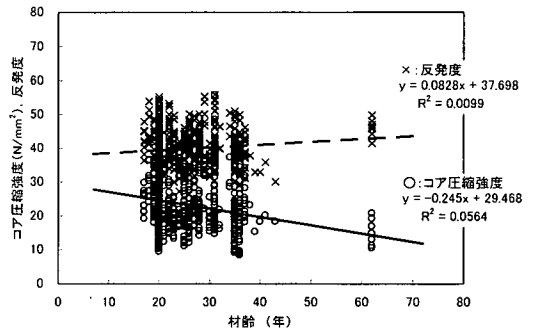


図-24 材齢とコア圧縮強度・反発度

関係を求め、図-24に示す。本調査では、経時的なコンクリートの強度変化は測定していないが、全体的に材齢の経過と共に強度低下が認められるのに対し、反発度はむしろ増加している。このことは、図-11および図-18から、材齢28日より初期であるほど、反発度がコア圧縮強度に比べ高くなっていることと、逆の傾向となっている。

## 5. テストハンマーによるコンクリートの圧縮強度の試験・検査方法の総合的な解析

### (1) コア供試体と円柱供試体の圧縮強度との関係

以上のことから、テストハンマーによるコンクリートの圧縮強度の試験・検査方法を検討するため、まず、前述の2章および3章のデータに加え文献(14)、(21)、(22)、(23)のJCI九州支部内の6機関における試験データをまとめ、コア供試体と標準養生の円柱供試体の圧縮強度との関係を求めると、図-25のとおりである。全データ(データ数 n=452)は、各種の養生条件(水中養生、空中養生、蒸気養生、現場養生など)下の部材から採取されており、圧縮強度が約10~90N/mm<sup>2</sup>でほぼ一般的なコン

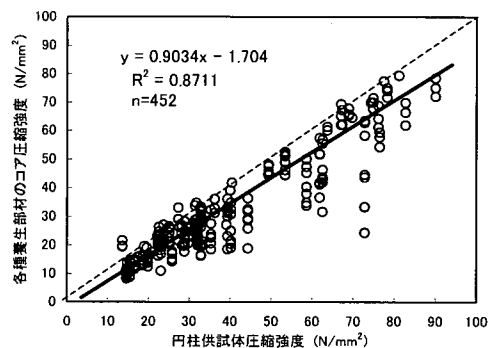


図-25 コア供試体と円柱供試体の圧縮強度との関係

クリートの分布範囲で、両強度は高度の直線関係(相関係数 R=0.933)となっている。コア供試体の圧縮強度 F<sub>cc</sub> と円柱供試体の圧縮強度 F<sub>c</sub> とは、F<sub>cc</sub> / F<sub>c</sub> の平均値 = 0.855 = 85.5% であり、つぎの関係式が求められる。

$$F_{cc} = -1.704 + 0.9034F_c \quad (3)$$

(n=452, R=0.993)

また、F<sub>cc</sub> / F<sub>c</sub> の平均値は、多数の現場測定データをまとめた愛媛県の場合(24)、(25)の平均値 85.3%、83.6% (データ範囲約 15~30N/mm<sup>2</sup>) と比べると、ほぼ合っており、普遍性があるものとみなされる。

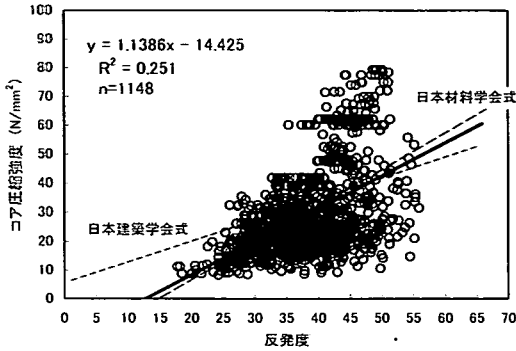


図-26 反発度とコア圧縮強度との関係

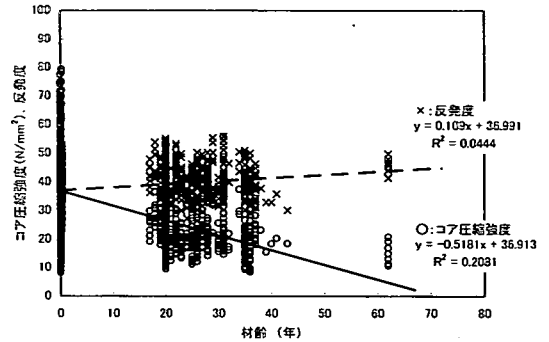


図-27 材齢とコア圧縮強度との関係

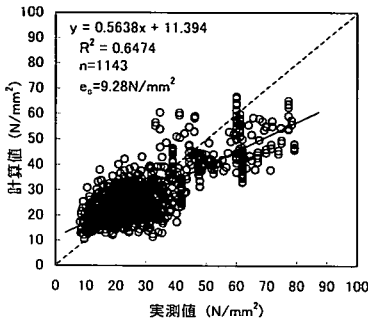


図-28 式(5)の重回帰分析の精度

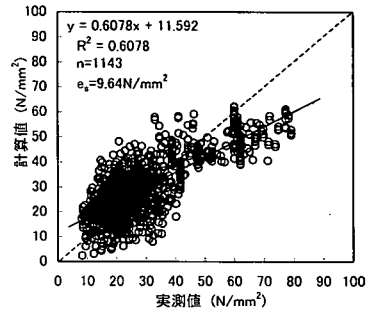


図-29 式(6)の重回帰分析の精度

## (2) コア供試体の圧縮強度とテストハンマー強度との関係

つぎに、前述の2章、3章および4章のデータに加え文献(14)、(21)、(22)、(23)のJCI九州支部内の8機関における試験データをまとめ、コア供試体の圧縮強度( $F_{cc}$ ,  $N/mm^2$ )とテストハンマーの反発度(H)との関係を求めると、図-26に示すように、つぎの関係式が求められる。

$$F_{cc} = -14.425 + 1.1386H \quad (4)$$

(n=1148, R=0.501)

両者には直線関係があるが、反発度45でコア圧縮強度10~80 $N/mm^2$ 程度となっており、推定式としては分布範囲が広く精度は十分ではない。既往の推定式としては、日本材料学会式との適合性が認められる。ここでは、反発度の補正は、打撃方向の補正(鉛直は水平に補正)のみとしたが、2章(2)で述べたように、コア圧縮強度は他に養生条件、材齢、測定場所との相関性がある。特に、材齢の補正は、年数を経過し乾燥状態に保たれたコンクリートの硬度が大きくなっているため、推定強度を割引く必要があるとし、材齢3000日(8.2年、補正值0.63)までの補正值が、既往の研究で示されている<sup>(1)、(3)、(4)</sup>。そこで、材齢と反発度・コア圧縮強度との関係を求めると、図-27に示すとおりである。全データの材齢は7日~62年(長期材齢は建築物のみ)であり、若材齢のデータは

ど広範囲の強度となっているが、材齢が増加するほどコア圧縮強度が減少するのに対して、反発度の値が大きく測定される関係が認められ、同様に材齢の補正も必要であることが示されている。また、養生条件や含水率の影響は、これまでの研究から、表面の乾湿状態で補正<sup>(1)、(2)</sup>されている。

以上のことから、コア圧縮強度 $F_{cc}$ を反発度Hから推定する場合、他の影響要因として、材齢(週)ZA、表面の乾湿状態[1:乾燥, 2:やや湿潤(湿布養生後), 3:湿潤(水中養生後)]DWを加えた3項目を説明変数として、重回帰分析によって相関性を求めると、式(5)および図-28に示すとおりである(直線式、変数増減法、 $F_{IN}=F_{OUT}=2.0$ 、下段の( )内は、t値)<sup>(2)</sup>。

$$F_{cc} = -20.75595 + 1.3818H - 0.0113236ZA + 4.4248DW$$

(-11.8) (32.0) (-25.2) (8.6) \quad (5)

$$(n=1143, R=0.780, e_s=9.64N/mm^2)$$

図-28から、実測値と計算値との関係がやや凸となっていることから、さらに、累乗式を求めると、式(6)および図-29に示すとおりである。

$$F_{cc} = 10^{1.072135} H^{1.66893} ZA^{-0.07696} DW^{0.20926}$$

(-12.9) (31.0) (-20.4) (6.7) \quad (6)

(n=1143, R=0.805, e\_s=9.28N/mm^2)

これらの式から、コア圧縮強度は、反発度との相関性が最も高いが、材齢との相関性も高く、つぎに表面の乾

湿となっており、式(4)に比べ式(5)は精度が向上( $R=0.780$ )している。また、累乗式の式(6)はさらに精度がよい( $R=0.805$ )が、いずれも最大  $30\text{N/mm}^2$  程度の残差があり推定式としては十分とは言えない。しかし、普通・高強度・高流動コンクリート、長期材齢を経た建築物など、広範囲で多数のコンクリート(データ数 1143, コア圧縮強度  $8.4\sim 79.3\text{N/mm}^2$ , 材齢  $1\sim 3233$  週)を、各種のテストハンマーで測定した結果について、総合的に解析して重回帰式を求めた研究は例を見ず、これを考慮すれば実用式として適用できるものと考えられる。

### (3) テストハンマーによるコア供試体の圧縮強度の推定方法に関する検討

反発度からコンクリートの圧縮強度を求める換算式は、これまで多くの研究者により換算式が提案されているが、テストハンマーには製品の変動があるため、使用するテストハンマーごとに試験によって換算式を求める必要があることを、豊福らはすでに報告している<sup>10)</sup>。しかし、テストハンマーに及ぼす要因は多岐にわたり、換算式を試験によって毎回求めるのは、困難な場合が多い。

上述のように、精度が良い普遍的な換算式を求めることは困難であり、これらの研究から、テストハンマーによるコア供試体の圧縮強度の推定方法として、つぎに示す方法が提案される。

- ① テストハンマーによるコア供試体の圧縮強度推定のための試験方法としては、JSCE-G504-1999 硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法<sup>9)</sup>によるものとし、「テストハンマー強度」を「コア供試体の圧縮強度」とする。
- ② コア供試体の圧縮強度は、JSCE-G 504-1999 の「6.3 テストハンマー強度」の規準を、次のように変更して算出する<sup>11)</sup>。

**6.3 テストハンマー強度 基準反発度からコア供試体の圧縮強度(F)への換算は、既存のコンクリート構造物、あるいはこれと養生条件が近似した立方供試体・曲げ強度試験供試体(注)の反発度~これから切り取ったコアの圧縮強度との換算式、または換算図を用いて行うものとする。**

(注) コアの寸法は $\Phi 10\times 20\text{cm}$ を標準とするものとし、曲げ強度試験供試体( $15\times 15\times 53\text{cm}$ )の場合、まず、長手方向を上下として載荷( $4\text{N/mm}^2$ 程度)して固定し、各側面を測定箇所として反発度を測定する。ここで、載荷できない場合には、背後から強固に支持して反発度を測定する。つぎに、コアは、長手方向の両端から長さ  $20\text{cm}$  の供試体となるように中央部分を切斷して除去し、この供試体( $15\times 15\times 20\text{cm}$ )からコア供試体を切り取り、圧縮強度試験を行う。立方供試体やはり供試体( $20\times 20$ の断面等)の場合は、この方法に準じるものとする。

- ③ 換算式は、使用するテストハンマーごとに試験によって求める必要があるが、コア供試体と円柱供試体の圧

縮強度の関係式として式(3)、テストハンマーの反発度からコア供試体の圧縮強度を求める推定式として式(4)、式(5)および式(6)が、参考とされる。

- ④ テストハンマーの反発度は、この値から圧縮強度が推定できる他に、コンクリート品質のばらつきの程度が判定できる。

## 6. 結論

本研究は、テストハンマーによる構造物中のコンクリートの圧縮強度(コア供試体の圧縮強度)検査法を確立するために行ったものであり、 $10\sim 80\text{N/mm}^2$ 程度の各種のコンクリートについてコア供試体圧縮強度と円柱供試体圧縮強度、反発度等の諸要因との関係を総合的に解析した結果から、以下の結論が得られた。

- (1) コア供試体圧縮強度は、円柱供試体圧縮強度に比べ低下傾向にあり、部材の種類、養生条件の影響が大きい。
- (2) コア供試体の圧縮強度をテストハンマーにより求める場合、打撃方向のほか、材齢、養生条件(表面の湿潤状態、水分量)、部材の種類の影響が大きい。これらの条件を一定とした場合には、圧縮強度の推定精度が良い。
- (3)  $10\sim 80\text{N/mm}^2$ 程度の各種のコンクリートに対し、テストハンマーによりコア供試体圧縮強度を求める推定式として、式(4)、式(5)および式(6)が求められた。しかし、精度が良い普遍的な推定式を求めることは、影響要因が多いため困難であり、5章(3)で示した「テストハンマーによるコア供試体の圧縮強度の推定方法」の活用が考えられる。

今後、さらなるデータを蓄積し、総合的な解析を行うと共に、新しい機器の開発が必要と考えられる。

謝辞: 本研究は、日本コンクリート工学協会九州支部「コンクリートの品質保証に関する研究委員会」(活動期間: 平成11年6月~平成13年11月)における委員会活動の内容<sup>9)</sup>の一部から、さらに研究を進めたものである。関係各位に、厚くお礼申し上げる次第である。

## 参考文献

- 1) 土木学会: コンクリートの品質管理試験方法、コンクリート・ライブラリー第38号, pp.75-83, 1974.9.
- 2) 日本建築学会: 構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点, pp.133-153, 1989.9.
- 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 1983.2.
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの非破壊試験法 研究委員会報告書, 1992.3.
- 5) JSCE-G504-1999: 硬化コンクリートのテストハンマー強度

- の試験方法。〔2002年制定〕コンクリート標準示方書〔規  
準編〕, 2002.3.
- 6) 日本コンクリート工学協会九州支部コンクリートの品質保  
証に関する研究委員会：コンクリートの品質保証に関する  
研究委員会報告書, 2001.11.
  - 7) 久野宏明, 豊福俊泰, 佐藤武夫：エコーチップ硬さ試験に  
よる構造物中のコンクリートの品質検査法に関する研究,  
平成 12 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集,  
pp.A-576-A-577, 2001.3.
  - 8) 杉功太郎, 豊福俊泰, 佐藤武夫：透気性試験による構造物  
中のコンクリートの耐久性検査法に関する研究, 平成 12  
年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集,  
pp.A-578-A-579, 2001.3.
  - 9) 豊福俊泰, 宮川邦彦, 佐藤武夫：非破壊試験によるコンク  
リートの品質検査法に関する研究, 土木学会第 52 回年次学  
術講演会講演概要集第 6 部, pp.514-515, 1997.9.
  - 10) 豊福俊泰, 亀倉邦男：コンクリートのテストハンマー強度  
の試験方法に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会  
講演概要集第 5 部, pp.1172-1173, 1996.9.
  - 11) 阿部久雄, 豊福俊泰, 前田敏也：テストハンマーによるコ  
ンクリート強度推定法の研究, 土木学会第 51 回年次学術講  
演会講演概要集第 5 部, pp.1170-1171, 1996.9.
  - 12) 豊福俊泰：データ解析によるコンクリートの圧縮強度の推  
定方法に関する研究, 土木学会論文集, No.420/V-13,  
pp.125-134, 1990.8.
  - 13) 文部省管理局教育施設部内既存鉄筋コンクリート造・鉄骨  
造学校建築物の耐力度測定法編集委員会編：既存鉄筋コン  
クリート造「学校建築物の耐力度測定法」, 1990.10.
  - 14) 松下博通：高強度用シュミットハンマー試験報告書, 1978.  
12.
  - 15) 周建東, 広次雅也, 清水泰：既存 RC 造建築物のコンク  
リート強度に関する調査研究, セメント・コンクリート論文  
集, No.52, pp.1018-1023, 1998.12.
  - 16) 樹田佳寛, 友沢史記, 矢島義磨：実際の RC 造建築物にお  
けるコンクリート品質—その 1 主として建物別圧縮強度  
について—, 日本建築学会論文報告集, 第 311 号, PP.153-  
162, 1982.1.
  - 17) 樹田佳寛, 友沢史記, 矢島義磨：実際の RC 造建築物にお  
けるコンクリート品質—その 2 主として部位別・階別の圧  
縮強度について—, 日本建築学会論文報告集, 第 317 号,  
PP.155-163, 1982.7.
  - 18) 十代田知三, 野崎喜詞, 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, 第 428 号, PP.25-33, 1991.10.
  - 19) 十代田知三, 野崎喜詞, 小林幸一：超音波法, 反発度法お  
よび複合法の既存建物への適用—非破壊試験による構造体  
コンクリートの強度推定法その 2, 日本建築学会構造系論  
文報告集, No.444, PP.1-6, 1993.2.
  - 20) 十代田知三, 野崎喜詞, 小林幸一：超音波法, 反発度法お  
よび複合法による強度推定式の提案とその有効性の検証—  
非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法 (その  
3) —, 日本建築学会構造系論文報告集, No.458, PP.1-9,  
1994.4.
  - 21) プレストレストコンクリート工業協会九州支部生産技術部  
会：シュミットハンマー試験報告書, 1968.11.
  - 22) 社団法人福岡県建設業協会コンクリート・コア強度試験技  
術研究会：コンクリート・コア強度試験の研究, 1978.3.
  - 23) 魚住忠可：打設時期が異なる場合のテストハンマーによる  
強度判定方法, 文献 6), pp.145-149
  - 24) 田中敏仁, 矢野和之, 岡崎計孝：コンクリート構造体より  
抜取ったコア一供試体の強度について・同(2), 月刊建設,  
pp.25-32・pp.26-33, 1974 年 11 月・1974.12.
  - 25) 田中敏仁, 矢野和之, 岡崎計孝：コンクリート構造体より  
抜取ったコア一供試体強度と標準養生テストピース強度の  
相関について(3), 月刊建設, pp.30-38, 1975.5.
  - 26) 国土交通省大臣官房：土木コンクリート構造物の品質確保  
についての運用について (補足), 2001.10.17.

(2002. 3. 27 受付)

## STUDIES ON INSPECTION METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE IN STRUCTURES USING TEST HAMMER

Toshiyasu TOYOFUKU, Masashi SOEDA, Syouji IWAHARA  
and Hirofumi TSUTSUMI

Because the core sampling from the structure is difficult, test hammer is commonly used as non-destructive inspection (test) method for determining the compressive strength. But presumption error is said to be large, and it is the present state of affairs that this test method is not yet completely established. Therefore, in this study the various influence factors to non-destructive testing using test hammer are examined through model test specimens, model concrete girders and old constructed buildings. These data are then analyzed collectively. Based on the analyzed data an inspection method using test hammer is proposed for the compressive strength of concrete in structures.