

[35] 超音波法、シュミットハンマー法によるコンクリートの複合非破壊試験

正会員 ○ 野崎 喜嗣 (武蔵工業大学)

中山 千春 (前田建設工業)

1 緒言

コンクリート強度の非破壊的推定的手段として、複合法による高精度化が指摘されており、就中、手軽さを前提としたシュミットハンマー法と超音波法との複合法の有効性を立証しようとする研究報告も多く見られる様になってきた。然し、コンクリートの使用材料や調合、材令、或いは形状、寸法、含水状態等の諸条件により、それらの関係式はその傾向に無視できない差異が見られる事から、汎用的な関係式を求めようとするにはいささかの無理がある様である。但し上記の各要因に関する簡単な補正係数を示す事ができれば、実用的には十分な精度の推定式が得られるものと思われる。

本研究は、先に述べたコンクリートの複合非破壊試験に関して、各種の要因効果を求める為を実施した実験室実験及び柱型モデル実験の結果をとりまとめ、実用化の為のネックとなる問題点を抽出して分析を行ったもので、主にコンクリート強度の推定精度についての検討結果を報告する。

2 実験の条件及び方法

実験は、基礎的な問題と応用的な問題点の検討の為に、①コンクリートの各種要因がシュミット反発硬度、超音波伝播速度と強度との関連に及ぼす影響、②柱型モデル試験体による検討、の2シリーズを実施した。

2-1 使用材料

実験の第1及び第2シリーズに用いた材料は右の表-1の如くである。特に第2シリーズでは、普通骨材と高炉スラグ骨材の差異を見る事も目的の1つとして実施した。又第1シリーズでは骨材の石質による特性値への影響についても分析する。

2-2 調合及びその他の条件

調合は表-2、3に示した如くである。

その他の条件として材令は28日とし、養生法は第1シリーズでは水中、第2シリーズでは打設7日後鋼製型枠を外し、外気中に放置養生した。

尚、第2シリーズでは柱型モデル試験体でありブリージングの影響を見る目的で、JISによるブリージング試験に併行し、右の図-1に示す柱型の上部をアクリル板として単位時間毎のブリージング水深さを測定した。なお測定器として、N型シュミットハンマー(標準硬度

R-80)、K社製超音波探傷器ソナーを用いた。

2-3 硬化コンクリートの測定

第1シリーズではφ10cm×h20cmの試験体を各要因毎に1組3本、合

表-1 使用材料

	第1シリーズ	第2シリーズ
セメント	N社 普通ポルトランドセメント	S社 普通ポルトランドセメント
細骨材	相模川水系 川砂 2.5mm 比重 2.71 吸水量 0.28%	信濃川水系 川砂 5mm 比重 2.59 吸水量 1.90%
粗骨材 1	奥多摩産石灰石砕石 2005 比重 2.71 吸水量 0.28%	信濃川川砂利 2.5mm 比重 2.68 吸水量 0.86%
粗骨材 2	生産安山岩砕石 2005 比重 2.61 吸水量 3.47%	S社製高炉スラグ 2505 比重 2.45 吸水量 2.52%

表-2 調合 (第1シリーズ)

No.	W/C	細骨材率	単位水量
1	50%	4.6%	210 $\frac{Kg}{m^3}$
2	60%	4.4%	210 $\frac{Kg}{m^3}$
3	70%	4.7%	210 $\frac{Kg}{m^3}$

表-3 調合 (第2シリーズ)

No.	使用骨材	W/C	細骨材率	単位水量
PL	川砂利	60%	38.3%	160 $\frac{Kg}{m^3}$
SL	高炉スラグ	60%	44.1%	178 $\frac{Kg}{m^3}$

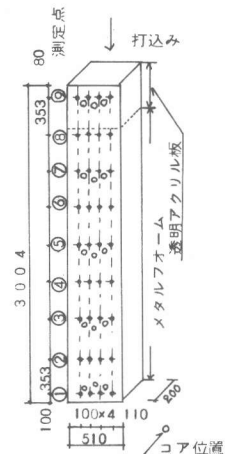


図-1 柱型モデル試験体

計72本作製し、材令1W、4Wで音波速度及び加圧状態(2.5t)でシュミットハンマー反発硬度を測定し、その後には圧縮強度、静弾性係数を求めた。第2シリーズでは標準供試体の圧縮試験を行い、柱型モデル試験体についてはシュミットハンマー、超音波測定後にコア供試体を抜取って強度試験を行った。測定位置及びコア供試体の抜取位置は図-1に示した。

3 実験結果及びその検討

3-1 各要因効果について

実施に先立って、シュミットハンマー反発強度の形状効果に関するチェックを行なった。即ち、φ10cmの曲面へ打設した場合と10cm、15cmの平面に打設した場合の測定値の比率は各々1.17、1.22となり、大よそ20%程度補正する必要がある事が判った。

(1) 単純相関に関する検討

a. 超音波伝播速度に関して各要因別に相関、回帰分析を行った結果を表-4に示す。特に密接な関係が見られた例として図-2の散布図で、水セメント比W/C、粗骨材石質別にまとめると、相関係数は大よそr=0.9程度となる事が判った。

b. シュミットハンマー反発硬度に関して超音波法と同様に分析を行った結果を図-3及び表-5に示した。図-3は特に密接な関係が見られた養生法の影響についてまとめたもので、相関係数はr=0.9を上廻っている。なお、図に示した材料学会による推定式と若干の差が見られる。

(2) 複合非破壊としての分析

次に音波と反発硬度を説明変数として重相関回帰分析を行った。方法は基本式として、 $F = \kappa_1 V_p + \kappa_2 R + C$ (V_p : 音速, R : 反発係数)を仮定し、更に変数として水セメント比W/C、材令(Ag)、養生法(cR)、石質(gR)を順次追加したものである。

その結果は表-6に示す如くであり、変数を追加する毎に逐次相関係数は増大し、最終的にはr=0.984となった。各変数については、特に養生法或いは石質の項を追加した場合に著しく向上し、両者の場合にほぼ相関係数r=0.9を上回り、実用的な見地からはこの程度で十分な推定精度と考えられる。

これらの変数追加による推定精度の向上を図示すると図-4の如くである。

即ちシュミット法による推定の誤差(2σで定義する)E=25%、超音波法による推定誤差E=28%、複合法による推定誤差E=20%となった事が解った。

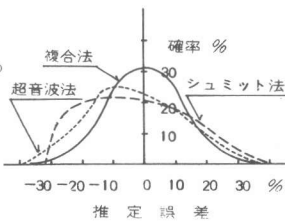


図-4 強度推定の誤差

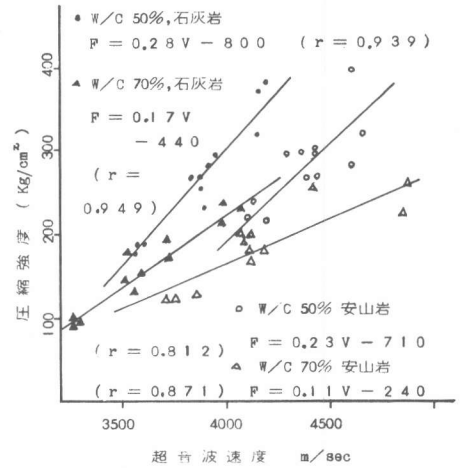


図-2 音速-強度相関分析

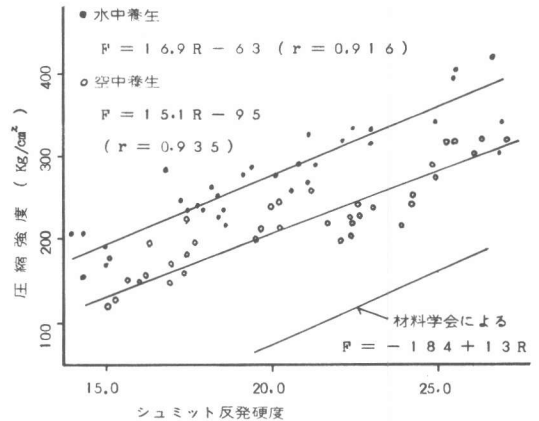


図-3 反発硬度-強度相関分析

表-4 超音波法による相関回帰分析

要因	回帰式	相関係数	
全体	$F = 0.13V - 270$	0.705	
水セメント比 (%)	50	$F = 0.16V - 350$	0.696
	60	$F = 0.18V - 470$	0.841
	70	$F = 0.10V - 190$	0.830
養生法	空中	$F = 0.10V - 150$	0.519
	水中	$F = 0.13V - 270$	0.753
石質	安山岩	$F = 0.17V - 480$	0.783
	石灰岩	$F = 0.26V - 730$	0.915

表-5 シュミット法による相関回帰分析

要因	回帰式	相関係数	
全体	$F = 1.35R - 28$	0.777	
水セメント比 (%)	50	$F = 1.44R - 35$	0.768
	60	$F = 1.38R - 36$	0.695
	70	$F = 7.2R + 71$	0.441
石質	安山岩	$F = 1.6R + 16$	0.749
	石灰岩	$F = 1.67R - 96$	0.820

3-2 柱型モデル試験体に関する実験結果

(1) フレッシュ時の測定結果

練り上ったコンクリートの特性は表-7に示した。又柱型モデル試験体の型枠上部を透明アクリル板として浮水量を単位時間毎に記録した結果が図-5である。同図から見られる様にスラグ骨材コンクリートは普通骨材コンクリートに比して相当長時間に亘ってブリージングが行なわれている事が判った。

(2) 標準供試体に関する試験結果の考察

圧縮強度はスラグコンクリート、普通コンクリート共に、材令1Wで200~250kg/cm²、4Wで280~370kg/cm²で比較的バラツキが少なかった。

尚、表乾比重はスラグコンクリート2.34、普通コンクリート2.36であった。然し、図-6に示す様に静弾性係数については値そのものは特に問題ないと思われるが、相当にバラツキが大きい。これは、コンクリートの性質自体よりも、測定上の困難さが大きく関係している様である。

(3) 試験体コンクリート強度に関する分析、検討

超音波伝播速度、シュミット反発硬度及びコア供試体の圧縮試験結果を図-7及び図-8に示した。

尚、コア供試体は図-1の測定点⑨、⑦、⑤、③、①の位置からφ10cm×h20cmを各3本各試験体につき各々合計15本採取したが、その強度は普通コン

クリートで220~360kg/cm²、スラグコンクリートで280~360kg/cm²で後者の方が若干大きい。これは単位セメント量の違いも原因の1つであろう。打ち込みの上下の方向差については後に述べるが、全体的に上部が低強度になっている。

図-7は超音波伝播速度とコア供試体の圧縮強度との相関、図-8はシュミット反発硬度とコア供試体との相関を見る目的で散布図を描いたもので、図に示した様に若干バラツキが大きい。これはシュミット反発硬度及び超音波速度の測定をモデル試験体に対して行った為にコア供試体との対応が必ずしも正確でなかった為であると思われる。但しスラグコンクリートではN型ハンマーを用いたが、骨材自体の強度が普通骨材よりも若干小さい為にこれを軽量骨材と見做した場合補正值として(+2)を加えて換算し

表-6 重相関分析の結果

超音波速度	反発硬度	水セメント比	材令	養生方法	石 質	定数項	重相関係数
k 1	k 2	k 3	k 4	k 5	k 6	C	r
129.5	—	—	—	—	—	-274	0.705
—	13.5	—	—	—	—	-28	0.777
79.2	9.9	—	—	—	—	-273	0.863
80.2	7.2	-2.2	—	—	—	-90	0.892
78.3	9.8	—	0.6	—	—	-269	0.864
22.1	13.6	—	—	-60.5	—	-28	0.936
146.0	7.3	—	—	—	57.3	-575	0.911
68.7	0.7	-3.9	17.2	—	—	147	0.908
23.2	5.9	-3.2	13.6	-52.3	—	270	0.969
99.4	3.9	-2.7	8.6	-24.9	33.6	-105	0.984

※1: 水中養生1, 空中養生2 ※2: 安山岩1, 石灰岩2

超音波速度 Km/sec

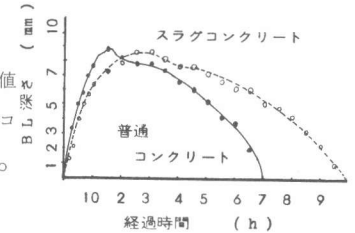


図-5 柱型モデル試験体におけるブリージング(B.L.)状況

表-7 フレッシュコンクリートの特性 (第2シリーズ)

調合	スランブ	空気量	温度	フロー値	単位容重	最終 B.L. 量	B.L. 率
S.L.	19.0 cm	4.3 %	25.8 C	31 × 33 cm	2.32 T/m ³	0.22 cm ³ /cm ²	7.35 %
P.L.	18.0 cm	4.4 %	24.5 C*	27 × 28 cm	2.34 T/m ³	0.17 cm ³ /cm ²	5.93 %

※: B.L.: ブリージング

図-7は超音波伝播速度とコア供試体の圧縮強度との相関、図-8はシュミット反発硬度とコア供試体との相関を見る目的で散布図を描いたもので、図に示した様に若干バラツキが大きい。これはシュミット反発硬度及び超音波速度の測定をモデル試験体に対して行った為にコア供試体との対応が必ずしも正確でなかった為であると思われる。但しスラグコンクリートではN型ハンマーを用いたが、骨材自体の強度が普通骨材よりも若干小さい為にこれを軽量骨材と見做した場合補正值として(+2)を加えて換算し

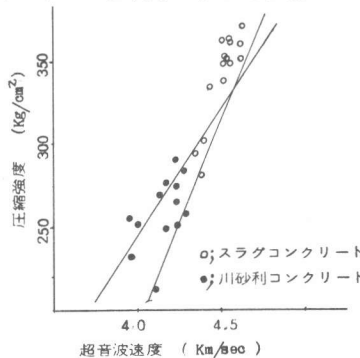


図-7 音速と圧縮強度

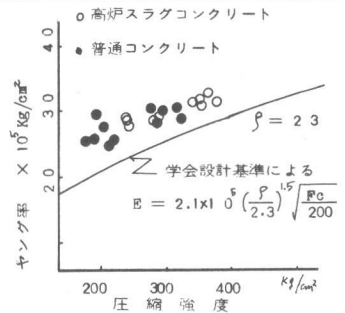


図-6 圧縮強度とヤング率の関係

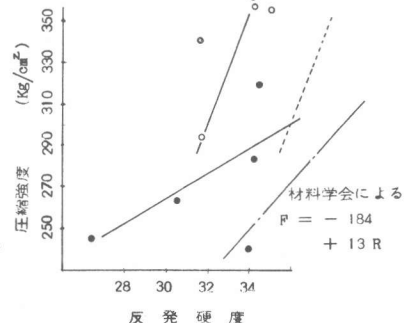


図-8 コア供試体の圧縮強度と反発硬度の関係

た結果は図中の点線に示す通りである。図中の直線は材料学会によるシュミット反発硬度による推定式であるが、スラグ、普通骨材コンクリート共に実情にそぐわない事が判った。

次に図-9は打ち込みの深さ方向に対する特性値の変化状態を示したものである。特に上部で明らかにブリージング、或いは圧密の影響と思われる著しい傾向が見られた。特に最上部では圧縮強度、超音波伝播速度、シュミット反発硬度とも中央より下部の測定値に比して、大よそ20%程度小さくなっている。又その傾向はスラグ骨材コンクリートよりも普通骨材コンクリートで著しい事が判ったが、これは先の図

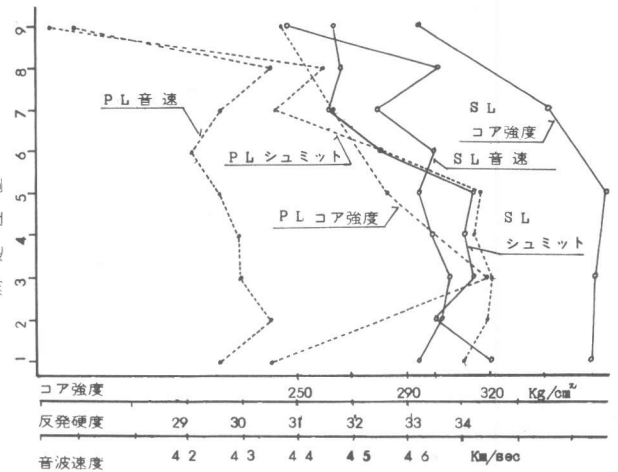


図-9 打ち込みの深さ方向による特性値の変化

5, 表-7に示した様にスラグコンクリートではブリージングが充分に行なわれた事も原因の1つと考えられる。但しその傾向は測定点No⑤, 即ち上部より約1500mm程度までで、更に深くなると特性値は大よそ一定となる様である。特性値別では、音波速度は測定点⑧でほぼ一定となり、高さ方向の変化に対し鈍感であるのに対し、反発硬度、コア供試体強度が逆に敏感の様である。又最下部で特性値が若干小さくなっているのは、アーチ効果等により締め固めが充分に出来なかった事等が原因であろう。

4 まとめ

(1)超音波法によるコンクリート強度推定に当って、音速の他に主に石質、水セメント比を変数として追加した場合に推定強度が著しく向上する。 その場合の回帰式は傾きが異なる傾向が見られた。

(2)シュミットハンマー法によるコンクリート強度推定に当っては、養生法(或いは含水率の違い)が著しい影響を及ぼす。 その場合の影響は傾きは殆んど同様であるが、y軸切片が異なる傾向にある。 又材料学会による強度推定式と比較すると、本実験による推定式は傾きはほぼ同じで、切片が約100 Kg/cm² 大きくなった。

(3)音速及び反発係数とを組み合わせた複合法による場合は、前記2者に比して推定精度の向上が見られる。然しこの場合でも使用骨材の石質、養生法の効果が著しく推定精度に影響を及ぼす。 対象にした実験条件では推定誤差の標準偏差は大よそ10%程度と考えられる。

(4)柱型モデル供試体に関する実験結果からスラグ骨材自体の吸水量は比較的少ないが、ブリージングが普通コンクリートに対して長時間に及ぶ傾向がある事が解った。スラグコンクリートの場合、打ち込みの上下方向の差によるコア供試体強度、音速、反発硬度への影響が比較的小さかった。 その原因の1つとして、ブリージング状態の違いが考えられる。 その他の物理的、力学的性状についてはスラグ骨材コンクリートは普通骨材コンクリートと殆んど同様である事が判った。

(5)まとめとして、複合非破壊試験によってコンクリート強度の推定誤差は減少するが、実用面でのより高精度化を計る上で、粗骨材石質、養生法等によるグルーピングを行う事が有効と考えられる。 その為にはもう少し広い範囲からの実験を行う必要があろう。

〔謝辞〕 特に第1シリーズの実験に関しては(当時武工大生)小田芳久君、田谷清一君の尽力による所が大である。 記して感謝の意を表する。

文献 *1 谷川他, 第1回コンクリート工学年次講演会論文集