

報告 高強度コンクリートへのリバウンドハンマーの適用と強度推定式の提案

渡邊 聡^{*1}・中根 博^{*2}・川幡 栄治^{*3}・河上 浩司^{*4}

要旨：各種条件の下で、5つのグループに分かれてリバウンドハンマーによる反発度測定と円柱供試体圧縮強度測定を行った。その中で、普通セメント、封かん養生、化粧合板型枠および同一メーカーのリバウンドハンマーの使用という条件で得られた共通試験結果を基に強度推定式を提案した。強度推定式には分数型を採用することで、高強度コンクリートにおいても充分適用可能であることが確認された。また従来の推定式より精度の良い強度推定が可能になった。

キーワード：リバウンドハンマー、高強度コンクリート、反発度、強度推定式

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性に対する関心が高まり、既存構造物のみならず新設構造物においても適切な維持管理が求められている。

その中で、コンクリート強度の維持管理手法としては、リバウンドハンマーによる強度推定法が非常に簡便な非破壊検査手法として従来から広く利用されてきた。2001年には、国土交通省により重要新設コンクリート構造物に対してリバウンドハンマーを用いた品質管理を行うよう通達がなされ¹⁾、2003年には検査方法に対するJIS規格が制定された²⁾。しかしながら強度推定式に関しては、日本材料学会を始め、各研究機関からも種々の推定式が提案されているが、用いる推定式によって大きく推定強度が異なるなどの課題も残されている。一方、近年構造物の安全性、耐久性の観点より、建築・土木構造物に使用されるコンクリートは高強度化の傾向にあるが、従来の強度推定式は圧縮強度の範囲として40N/mm²程度以下のコンクリートを対象としたものが多く、高強度領域に関する検証が充分であるとは言えない。

本報告では、様々な条件でコンクリート供試体を作製し、リバウンドハンマーによる反発度と圧縮強度との関連を調べ、高強度領域へのリバウンドハンマーの適用性について検証した。また最も使用頻度の高い普通セメントに着目し、水セメント比W/C=30%~70%の試験結果を基に、基礎的な強度推定式を提案した。

2. 試験方法

2.1 供試体および反発度測定

反発度の測定に関しては、原則としてISO/DIS 1920-7³⁾に準拠した。主な内容を以下に示す。

(1) 供試体寸法

リバウンドハンマーによる反発度測定を行うコンクリート供試体は、200mm×200mm×200mmの立方体とし、圧縮強度の測定には、φ100mm×200mmの円柱供試体を作製した。

(2) 型枠の種類

最も使用頻度の高い化粧合板型枠とした。

(3) 養生条件

立方体供試体および円柱供試体いずれも脱型

*1 (株)松村組 建築本部技術研究所研究課 (正会員)

*2 大木建設(株) 技術研究所

*3 東亜建設工業(株) 建築本部建築部技術管理室

*4 三井住友建設(株) 技術研究所建築研究開発部 工修 (正会員)

は 24 時間以上 48 時間以内に行い、その後試験材齢まで 20℃封かん養生を標準とした。

(4) 試験材齢

若材齢から長期材齢までを取り扱うことを目的として、材齢 7 日、28 日、91 日、180 日および 365 日を試験材齢とした。

(5) 試験体の固定

圧縮強度試験機により面圧 2MPa で上下面を載荷して固定した。

(6) 反発度測定面および測定箇所

反発度測定面は供試体側面とし、水平方向のみとした。また出隅から 55mm 以上離れた箇所を測定し、測定間隔は 30mm 以上とした。

(7) 測定回数

1 回の試験で 9 点以上測定する。ただし、明らかに異常と認められる値、またはその偏差が測定値の中央値に対し、±20%以上になる値がある場合には、これに代わる反発度測定値を補うものとした。

(8) 使用リバウンドハンマー

5 つのグループに分かれて試験を行ったが、各グループとも同一メーカー（P 社製 N 型および NR 型）のリバウンドハンマーを用いて試験を行った。

(9) リバウンドハンマーの調整

信頼出来るテストアンビルによる反発係数が 80±2 に調整されたものを使用する。

2.2 圧縮強度

圧縮強度の確認は、立方体供試体と同一条件（20℃、封かん）で養生した円柱供試体（φ100×200mm）の圧縮強度とした。

3. 試験水準

3.1 検討配合

供試体作製および反発度測定を 5 つのグループに分かれて行った。各グループにおける検討配合を表-1 に示す。T グループ以外は、各グループとも 4~6 パターンの水セメント比を設定した。T グループについては、同一水セメント比で粗骨材量を変えたパターンを設定した。

表-1 各グループの検討配合

グループ	水セメント比 W/C (%)								
	70	65	60	55	50	45	40	35	30
S	—	○	—	—	○	—	○	—	○
MA	—	—	○	○	—	○	—	○	—
T	—	—	—	—	—	—	○	—	○
A	—	○	—	—	○	○	○	○	○
OM	○	○	—	○	○	—	○	—	○

表-2 各グループが使用した細骨材

グループ	種類	産地	粗粒率	表乾密度
			FM	(g/cm ³)
S	川砂	栃木県鬼怒川	2.75	2.58
MA	山砂	京都府城陽	2.81	2.56
T	山砂	千葉県君津	2.61	2.60
A	砂	千葉県佐原	1.88	2.59
	砕砂	埼玉県影森	3.10	2.63
	砕砂	埼玉県皆野	3.06	2.63
OM	川砂	茨城県結城	2.45	2.57

表-3 各グループが使用した粗骨材

グループ	種類	産地	実積率	表乾密度
			(%)	(g/cm ³)
S	硬質砂岩碎石	栃木県葛生	60.1	2.67
MA	硬質砂岩碎石	大阪府高槻	58.0	2.68
T	石灰岩質碎石	北海道上磯	60.1	2.70
A	石灰碎石	埼玉県横瀬	59.0	2.69
	石灰碎石	埼玉県皆野	59.0	2.67
OM	硬質砂岩碎石	埼玉県秩父	58.6	2.71

3.2 使用材料

使用セメント種類は全て普通セメントとした。各グループにおける使用細骨材および使用粗骨材を表-2、表-3 に示す。粗骨材の最大寸法については全て 20mm とした。

3.3 コンクリート配合

試験に用いたコンクリートの配合を表－４に示す。表中の配合記号における頭文字は各グループのグループ名を表しており、続いて水セメント比，スランプまたはスランプフロー，セメント種類を表している。また g/glim は粗骨材かさ容積を，s/a は細骨材率を表している。

4. 試験結果

4.1 フレッシュ性状試験結果

各グループで練り混ぜたコンクリートのフレッシュ性状は，スランプまたはスランプフローおよび空気量とも若干のばらつきはあるが，表－４に示した目標値の範囲内であった。

表－４ コンクリート配合

配合記号	セメント種類	スランプまたはスランプフロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	g/glim (m ³ /m ³)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
							W	C	S	G
S-65-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	65	0.610	46.8	179	275	827	979
S-50-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	50	0.620	43.3	182	364	732	995
S-40-21-N	N	21±1.5	4.5±1.5	40	0.600	44.5	170	425	744	963
S-30-60-N	N	60±5.0	3.0±1.5	30	0.550	46.7	170	567	744	883
MA-60-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	60	0.610	47.4	185	308	816	948
MA-55-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	55	0.610	47.3	180	327	813	948
MA-45-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	45	0.615	45.7	175	389	769	956
MA-35-21-N	N	21±1.5	4.5±1.5	35	0.565	47.3	175	500	753	878
MA-35-60-N	N	60±5.0	3.0±1.5	35	0.540	50.8	175	500	828	839
T-30-50-N	N	50±5.0	3.0±1.5	30	0.600	41.9	170	567	676	974
T-30-55-N	N	55±5.0	3.0±1.5	30	0.550	46.7	170	567	754	892
T-30-60-N	N	60±5.0	3.0±1.5	30	0.500	51.6	170	567	832	811
T-40-8-N	N	8±2.5	4.5±1.5	40	0.700	35.0	172	430	588	1136
T-40-15-N	N	15±2.5	4.5±1.5	40	0.650	38.4	179	448	634	1055
T-40-21-N	N	21±1.5	4.5±1.5	40	0.600	42.2	185	463	684	974
A-65-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	60	0.601	48.5	179	276	876	951
A-50-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	55	0.611	44.8	185	370	767	967
A-45-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	45	0.600	46.8	170	378	816	949
A-40-21-N	N	21±1.5	4.5±1.5	40	0.580	46.6	175	438	784	917
A-35-55-N	N	55±5.0	3.0±1.5	35	0.550	49.8	170	486	844	870
A-30-60-N	N	60±5.0	3.0±1.5	30	0.550	47.7	170	567	776	870
OM-70-12-N	N	12±2.5	4.5±1.5	70	0.605	49.0	179	256	875	961
OM-65-12-N	N	12±2.5	4.5±1.5	65	0.614	48.0	177	272	853	975
OM-55-12-N	N	12±2.5	4.5±1.5	55	0.617	47.0	173	315	824	980
OM-50-12-N	N	12±2.5	4.5±1.5	50	0.624	46.0	170	340	801	991
OM-40-18-N	N	18±2.5	4.5±1.5	40	0.622	44.0	170	425	736	987
OM-30-55-N	N	55±5.0	4.5±1.5	30	0.527	49.0	170	567	763	837

※スランプまたはスランプフロー・空気量は目標値を示す。

4.2 圧縮強度試験結果

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートについて、材齢 28 日および 365 日における円柱封かん養生供試体の圧縮強度を図-1 に示す。図中に示した回帰式は、全グループの試験値を回帰した結果である。強度発現にはグループごとにある程度のばらつきが見られた。MA グループにおいて、 $C/W=2.86$ ($W/C=35\%$) のコンクリートでは、スランプ管理とスランプフロー管理のコンクリートを練り混ぜたが、スランプフロー管理のコンクリートの方が得られる強度は高くなった。

4.3 リバウンドハンマーの共通試験

各グループで使用するリバウンドハンマーのばらつきを調べるため、全使用ハンマーを集めてテストアンビルと大型試験体に対し共通試験を行った。その結果を図-2 および図-3 に示す。テストアンビルでの共通試験では、各グループが所有する 2 つのテストアンビルと検定で使用するマスターアンビルおよび低反発度（基準値 38）のマスターアンビルを用いた。大型試験体による共通試験では、 $W/C=30, 40, 65\%$ のコンクリートブロック（一辺 1000mm の立方体）と、実大柱および実大壁を用いた。共通試験の結果、検定を受け、整備されているリバウンドハンマーで反発度を測定した場合でも、得られる反発度には 5 程度の差が生じることが確認された。

4.4 反発度と圧縮強度

一辺 200mm の立方体供試体における化粧合板型枠側面でのリバウンドハンマーによる反発度と円柱封かん養生供試体の圧縮強度との関係を図-4 に示す。図中には、従来から一般的に使用されている強度推定式も併せて示した。材料学会は日本材料学会式⁴⁾および土木学会基準⁵⁾を、建築学会は日本建築学会式⁶⁾を、東京都は東京都建築材料検査所式を表す。材料学会式と東京都式による推定強度は、本試験結果よりも低く、かなり安全側の評価となっている。また最も強度が高く推定される建築学会式においても、

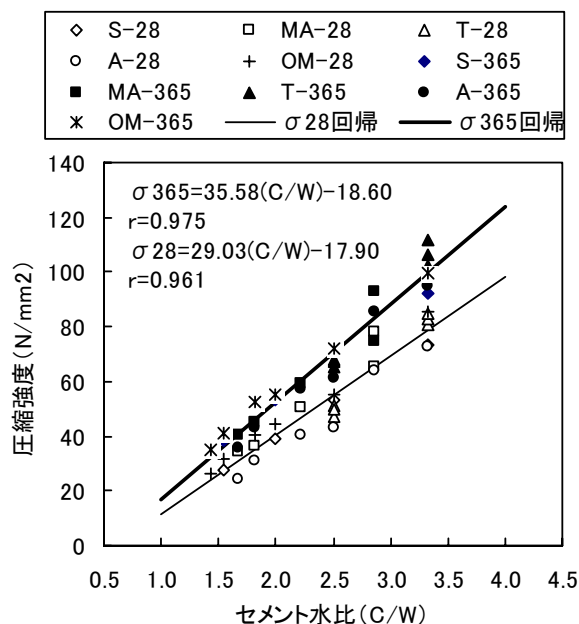


図-1 圧縮強度試験結果

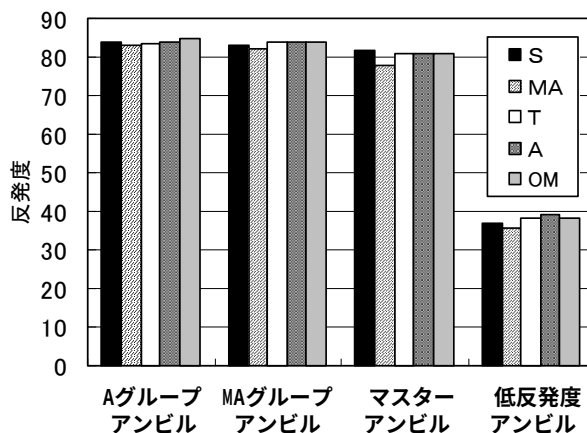


図-2 テストアンビルによる共通試験結果

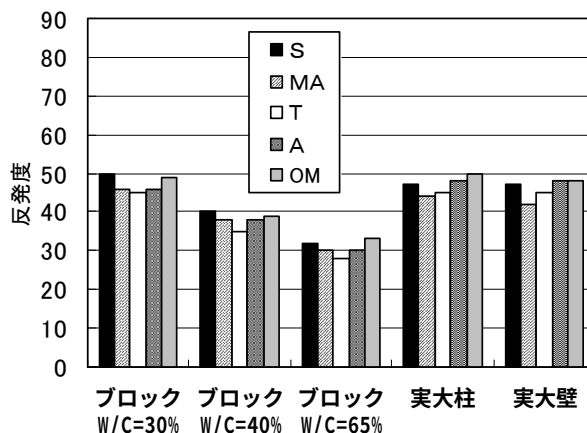


図-3 大型試験体による共通試験結果

反発度が40を超えると本試験結果に対しかなり安全側の評価となっている。いずれの推定式においても高反発度（高強度）領域になるにしたがって、本試験結果と推定強度との乖離は大きくなる傾向となった。

5. 強度推定式の検討

従来の強度推定式では、高反発度、高強度領域での推定精度が大幅に低下することが明らかとなった。そこで本試験結果をもとに、新たな強度推定式の検討・提案を行うこととした。強度推定式を検討するにあたって、実際には様々な条件（結合材種別、型枠、材齢、養生方法など）の違いによる要因を考慮する必要があると考えられるが、本報告では、それらを取り込むための基準となる推定式を検討することに主眼を置くこととした。

5.1 対象試験値

推定式の算出にあたり用いたデータは、各グループの普通セメント、化粧合板型枠、封かん養生の条件で作製された試験体の測定結果である。ただし、試験後にリバウンドハンマーの不調が確認された場合や圧縮強度試験機の不具合により試験結果に対する信頼性が乏しいデータについては、これらを検討対象から除外した。

5.2 強度推定式

推定式として直線を用いることは従来式と同様であり、本試験結果に合致するのは困難であると考えられる。そこで指数式、累乗式、分数式などの検討を行った。その中で、本試験結果から得られたデータは、図-5に示す圧縮強度の逆数と反発度の逆数の関係に表したところ、ほぼ直線近似できることが明らかとなった。回帰直線は式(1)で表される。

$$y = 0.561x + 0.0135 \quad (1)$$

式(1)の x は圧縮強度の逆数、 y は反発度の逆数を表すため、これを反発度と圧縮強度の関係に書き直すと、式(2)のようになる。

$$F = \frac{0.561R}{1 - 0.0135R} \quad (2)$$

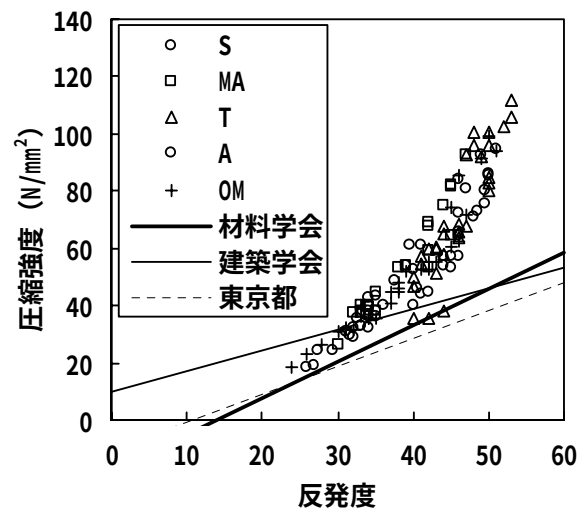


図-4 反発度と圧縮強度

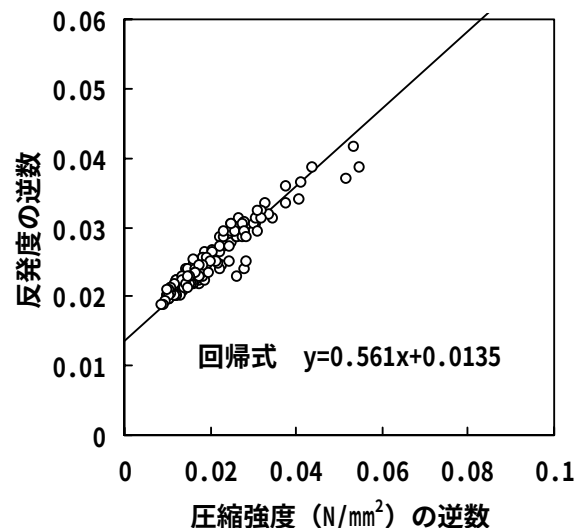


図-5 圧縮強度の逆数と反発度の逆数

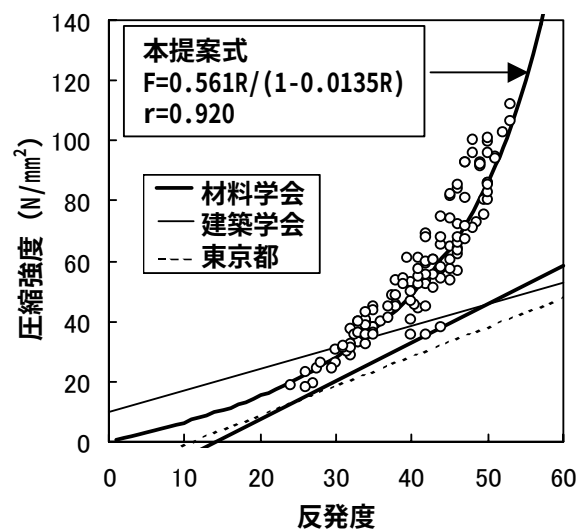


図-6 強度推定式

ここで、F は推定強度、R は反発度を表している。式(2)は分数型の強度推定式であり、反発度約 74 で強度が無限大になる傾向を示す。数式上では、反発度 74 以上は推定不可能であるが、現実的にコンクリートの反発度として 74 を超えることはないと考えられる。図-6 に本試験結果から得られた反発度と圧縮強度の関係、強度推定式(2)および既往の推定式を示す。図-7 には圧縮強度と式(2)による推定強度の相関を示す。一部のデータが若干外れているが、強度推定式(2)は本試験結果に対し十分な精度を有していると考えられる。既往の推定式と比較すると、低強度領域では材料学会式と建築学会式の間中間的な存在となっている。

6. まとめ

リバウンドハンマーによるコンクリートの圧縮強度推定に関する検討として、普通セメント、化粧合板型枠、封かん養生の条件で作製された供試体を用いて得られた反発度と圧縮強度の関係より、新たな強度推定式を提案した。本報告で明らかとなった事項を以下に示す。

- 1) 既往の代表的な推定式は、本結果に対し概ね安全側の評価を示す。
- 2) 既往の推定式は、従来から言われているように高強度（高反発度）領域において誤差が大きい。また低強度領域においても、必ずしも本結果と合致しない。
- 3) 提案した強度推定式は、高強度領域においても精度の良い強度推定が可能であり、新設構造物の品質管理などに充分適用可能と考えられる。
- 4) リバウンドハンマー個々のばらつきは避け難い事実であるという認識が必要である。

本報告で設定した供試体作製条件は、実際のコンクリート打設における最も一般的な条件であり、コンクリートを評価する上での基幹をなすものとする。今後は実大試験体および実構造物での試験を行い、本提案式の適用性を評価することが重要と考えられる。

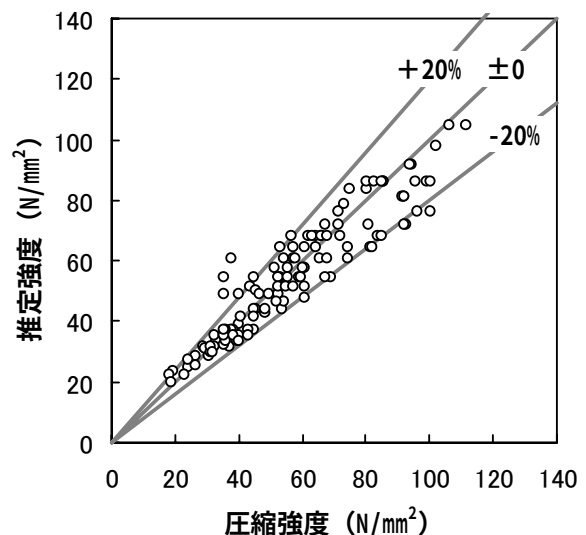


図-7 圧縮強度と推定強度の相関

最後に、共同研究として御参加いただいた浅沼組、安藤建設、大木建設、東亜建設工業、不動建設、松村組、三井住友建設の皆様には多大な協力を賜りました。また、群馬大学辻幸和教授には、本研究を進めるにあたり、貴重なご助言、ご指導を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古賀裕久，河野広隆：テストハンマーによるコンクリート強度の推定調査について，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.3-7，2002.2
- 2) JIS A 1155 コンクリートの反発度の測定方法，2003
- 3) ISO/DIS 1920-7 Testing concrete-Part7: Non-destructive tests of hardened concrete 4.1 Determination of rebound number，1999
- 4) 日本材料試験協会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，第7巻，第59号，pp.40～44，1958.8
- 5) 土木学会：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（JSCE-G 504-1999）
- 6) 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