

テストハンマーによるコンクリートの硬度測定 および強度推定の誤差要因に関する検討

谷口秀明¹・渡辺博志²・河野広隆²・藤田 学³

¹正会員 工修 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会
(〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4-6)

E-mail: hitaniguchi@smcon.co.jp

²正会員 工修 (独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 博(工) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会
(〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4-6)

本研究は、テストハンマーの反発度からコンクリートの圧縮強度を推定する際の問題点を明らかにするため、テストハンマーの動作機構や反発度の物理的な意味合いを踏まえた検討を行ったものである。ブランジャーを用いた静的圧入試験によりコンクリートのブリネル硬度を測定した結果、反発度と硬度の試験値の関係は理論式とほぼ一致し、反発度が硬度を表現していることが確認された。ただし、理論式からのばらつきの発生は避けられず、ハンマー打撃時に生じるエネルギー損失量の変動が、主な原因であることを示した。また、コンクリートの圧縮強度と硬度の間は概ね比例関係にあり、硬度は圧縮強度を推定する指標であるが、詳細に見れば、低強度域では比例係数は変化することが判明した。

Key Words: rebound number, compressive strength, Brinell hardness, energy loss

1. はじめに

テストハンマーによるコンクリートの強度推定は、1948年にスイスの E.Schmidt がシュミットハンマーを考案して以来、簡便な非破壊検査手法として世界的に広く利用されてきた。日本においても、1955年頃から研究^{例えれば 1), 2)}が行われ始め、1958年には日本材料試験協会（現在、日本材料学会）で試験案が取り纏められている³⁾。その後の研究や実績を踏まえ、土木学会規準⁴⁾や日本建築学会マニュアル⁵⁾が作成されてきたが、2003年5月、初めて日本工業規格（JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」）が制定された。従来の規準類は試験方法のみを定めたものであったが、JIS には試験装置自体の構造的な仕様の範囲が示された。

しかし、反発度による圧縮強度の推定には、ある程度の誤差が避けられず、例えば、前述の土木学会規準によれば、テストハンマー強度は円柱供試体の圧縮強度とは±50%、場合によってはそれ以上も異なることを考慮しなければならないとしている。JIS の解説も同様の問題を取り上げ、圧縮強度の推定方法を定めていない。ASTM C 805 では、コンクリートの均一性の評価や脱型時期の判定に適用するものであって圧縮強度の決定に代

わるものではない⁶⁾としているが、これに代わる簡易な非破壊試験手法がなく、今後も圧縮強度の推定にはテストハンマーが使用されていくものと考えられる。

テストハンマーは、一定のエネルギーでコンクリート表面を打撃したときに、ハンマーの跳ね返り距離（反発度）とコンクリートの強度に相関があることを応用したものである。反発度は、打撃によって発生するくぼみ（塑性変形）の程度と関連しており、そのくぼみが大きいほど、反発度が小さな値になることが明らかになっている⁶⁾。テストハンマーが日本に導入され始めた 1955 年頃から 1975 年頃までには、そのような打撃によるくぼみや衝撃弾性波などのテストハンマーの原理に対する検討が行われていた^{6), 9)}。

しかし、テストハンマーの普及に伴い、最近では実用上の問題、すなわち、強度推定の精度を問題とするものが多い^{例えれば 10)}。また、超高層ビルや橋りょうなどの工事で高強度コンクリートを使用する機会が増加したことや、市販のテストハンマーが 60~70N/mm² の高強度域までを適用範囲としていることなどから、低強度域の場合と同様の方法で高強度域にも強度推定が行われている^{例えれば 11)}。筆者らも、PC 部材に使用する高強度コンクリートを想定し、プレキャスト PC 枠などの工場製品に

に対する調査とテストハンマーの反発度の影響要因に対する要素試験の結果を報告してきた¹²⁾。その中では、低強度から高強度までの広い範囲に対し、圧縮強度と反発度の試験値から直線回帰を行う従来の方法には限界があると判断された。

本論文では、まず、できる限りばらつき要因を排除するために限定した試験条件で、従来の直線回帰によって反発度と圧縮強度の関係を調べ、広い強度範囲を一つの直線式で関連付けることの問題点を明らかにした。次いで、テストハンマーの動作機構に基づき、コンクリート供試体およびプランジャーの弾塑性変形と衝突前後のエネルギー吸支に着目することにより、反発度とブリネル硬度の理論式並びに圧縮強度の推定式を導き出した。最後に、テストハンマーのプランジャーを用いた静的圧入試験を行い、計算された反発度およびブリネル硬度と、コンクリートの圧縮強度およびテストハンマー試験による実測の反発度を比較し、提案した理論式および推定式が高強度域まで適用できることを検証した。

2. 反発度と圧縮強度の試験値に対し、直線回帰を行う従来手法による検討

(1) コンクリートの条件

実験に使用したコンクリートの配合を、表-1に示す。単位水量を 170kg/m^3 、単位粗骨材量の絶対容積を $0.375\text{m}^3/\text{m}^3$ に固定し、水セメント比を $30\sim70\%$ の範囲で 5% ごとに変化させた。セメントには早強ポルトランドセメント（密度 3.14g/cm^3 、比表面積 $4480\text{cm}^2/\text{g}$ ）を、骨材には川砂（鬼怒川産、表乾密度 2.58g/cm^3 、FM2.75）と砕砂（硬質砂岩、表乾密度 2.64g/cm^3 、FM2.99）を容積比で同量を混合したものと、砕石2005A（硬質砂岩、表乾密度 2.65g/cm^3 、FM6.65）を使用した。高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体）とAE剤（変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤）の使用量により、練り上がりのスランプと空気量を調整した。スランプは、材料分離、供試体表面の平滑な仕上がり、初期強度の遅延などを総合的に考慮し、 $8\sim21\text{cm}$ の範囲で水セメント比が小さいものほど大きくなれた。空気量は $4.5\pm0.5\%$ の範囲とした。

(2) 供試体の条件

圧縮強度試験には $\phi 100\times200\text{mm}$ の円柱供試体を、テストハンマー試験には日本材料学会の試験³⁾と同様に一辺が 200mm の立方体を供試体として使用した。供試体を作製するための型枠は、すべて鋼製のものである。供試体の養生方法は、早強ポルトランドセメントを使用し

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				絶対容積(m^3/m^3)		
		W	C	S	G	Vp	Vm	Vg
70.0	47.0	170	243	868		0.247		
65.0	46.6		262	853		0.253		
60.0	46.0		283	835		0.260		
55.0	45.4		309	813		0.268		
50.0	44.6		340	787	994	0.278	0.580	0.375
45.0	43.6		378	756		0.290		
40.0	42.3		425	717		0.305		
35.0	40.5		486	666		0.325		
30.0	38.0		567	599		0.350		

W/C:水セメント比、s/a:細骨材率、W,C,S,G:水、セメント、細骨材、粗骨材の単位量、Vp,Vm,Vg:ペースト、モルタル、粗骨材の単位量の絶対容積

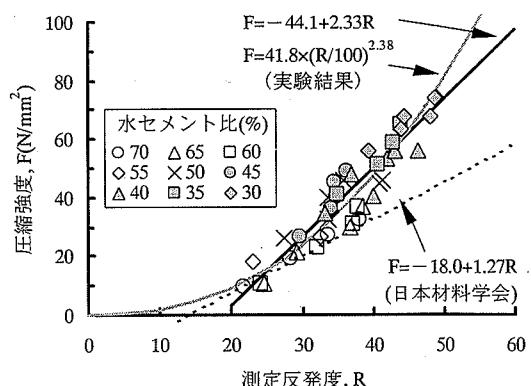


図-1 測定反発度と圧縮強度の関係

たコンクリートの強度発現性への影響が小さいこと¹³⁾等を考慮し、湿潤養生を3日間行った後、気中養生を開始した。試験時のコンクリートの材齢は、1, 3, 7, 28, 91, 182日であるが、全配合に対し、すべての材齢で試験を実施してはいない。

(3) テストハンマー試験の方法

テストハンマーには、ばね式のもの（衝突エネルギー $2.207\text{N}\cdot\text{m}$ 、プランジャー先端の半径 25mm ）を使用した。テストハンマー試験の測定面は、供試体の凹凸や付着物がないことを確認した上で、砥石などによる研磨は行わず、仕上がり面の状態とした。これは、研磨作業には人為差が生じ、強度域やペースト量の相違によって研磨量が異なる可能性があると判断されたことによる。

1面当たりの打撃数は20点とし、異常値を除いた平均値を反発度とした。除外した異常値は、土木学会規準⁴⁾に従い、測定した反発度の平均値の20%以上とした。また、日本材料学会の方法³⁾に準じ、圧縮試験機を用い

表-2 直線回帰に含めるデータ範囲を変化させた場合の直線回帰の傾きおよび切片の計算結果

圧縮強度の範囲 (N/mm ²)	データ 数	傾き	切片	相関係数	
				最小	最大
9.7	20	5	1.10	-13.2	0.572
9.7	30	12	1.35	-17.9	0.859
9.7	40	21	1.57	-22.8	0.871
9.7	50	30	1.86	-29.7	0.849
9.7	60	36	2.06	-35.7	0.894
9.7	70	40	2.25	-41.7	0.916
9.7	74	42	2.33	-44.1	0.931
10	40	20	1.52	-21.2	0.841
20	50	25	1.54	-18.0	0.650
30	60	24	1.65	-19.0	0.696
40	70	19	1.78	-19.5	0.796
50	74	12	2.02	-27.3	0.813

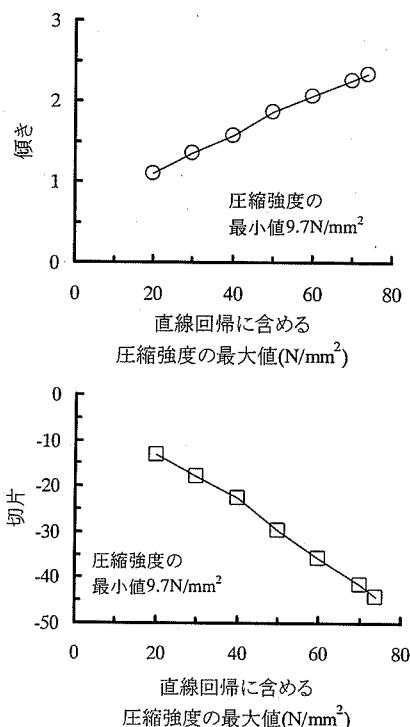


図-2 圧縮強度の最小値を固定し、直線回帰に含める圧縮強度の最大値を変化させた場合の回帰式の傾きおよび切片の関係

て圧縮応力 $0.74 \text{ N/mm}^2 (75 \text{ kgf/cm}^2)$ を与え、供試体の上下面を固定した状態で、供試体の鉛直面に対してテストハンマー試験を行った。温潤度や材齢などの補正値は明らかではないこと¹⁰⁾から、以降に記載する反発度とは、温潤度などの一般的な補正を行わないこととし、打撃方

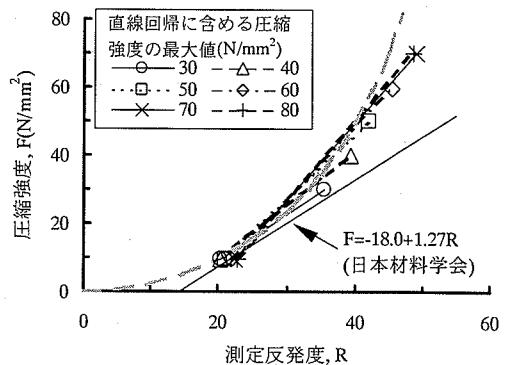


図-3 圧縮強度の最小値を固定し、直線回帰に含める圧縮強度の最大値を変えて計算した回帰直線の比較

向も水平方向に限定した反発度を指す。

(4) 反発度と圧縮強度の関係

反発度と圧縮強度の関係を、図-1 に示す。図中には、試験結果に対し、直線回帰を行った場合の一次式(1)と日本材料学会の式³を付記した。F は圧縮強度(N/mm²)、R は反発度を表す。寄与率は 0.867 と計算された。

$$F = -44.1 + 2.33R \quad (1)$$

今回の実験結果は、低強度域では日本材料学会の式との差異は認められないものの、高強度域になるにしたがい、日本材料学会の式と一致しなくなる傾向があり、高強度域まで含めた回帰式は、傾きで 2 倍程度異なる。日本材料学会の式は、坂・松井¹¹⁾が行った実験結果をもとに決められたものであるが、この実験では、水セメント比 42~80% のコンクリート（円柱供試体の圧縮強度は 5~40N/mm²）に対する圧縮強度と反発度の関係を調べている。これまでにも、反発度と圧縮強度の関係は、多くの研究者によって様々な式を提案している⁹⁾。その中で、高強度域までを対象とした沢田ら¹⁴⁾、添田ら¹¹⁾、松下ら¹⁵⁾、舟川ら¹⁶⁾の結果は、直線の傾きが 2.0~2.3、切片が -29.0~43.2 であり、今回の実験結果と概ね一致する。明石⁴⁾は、テストハンマーの個体誤差や製造時期の相違によって得られる反発度が異なることを指摘しているが、そのような影響があるとしても、最近の高強度域の研究結果や今回の筆者らの実験結果を踏まえれば、反発度と圧縮強度の関係には、測定した圧縮強度の範囲が影響する可能性が高いと考えられる。

そこで、表-2 に示すとおり、反発度と圧縮強度の関係に対し、直線回帰を行う場合のデータの範囲を変化させて直線の傾きと切片を求めた。図-2 および図-3 は、

表-2（上段）に示した、圧縮強度のデータ範囲の最小値(9.7N/mm^2)を固定し、 10N/mm^2 毎に最大値を変化させた場合の結果をグラフで表したものである。低強度域の試験データをもとに作成された日本材料学会の式は、図-3で圧縮強度の最大値を低強度とした場合の回帰式とほぼ一致していることがわかる。しかし、直線回帰に含める圧縮強度の範囲によって、得られる回帰式は大幅に異なり、回帰に含める圧縮強度の最大値の増加に伴い、傾きは大きく、切片は小さくなる傾向がある。いずれの回帰式も、高強度域であるほど、計算される圧縮強度は大きく異なる一方で、反発度20付近の圧縮強度は 10N/mm^2 程度となるという特徴もある。また、図-2において直線回帰に含める圧縮強度の最大値を 0N/mm^2 に近づければ、切片は0に限りなく近い値となる。

このように、広い範囲の圧縮強度を対象とした場合には反発度と圧縮強度の間には直線関係は成立しない。前述の回帰直線の傾きと切片の変化により、図-1、図-3に示したように、原点を起点とし、反発度20付近で日本材料学会式に接し、さらに高強度域で今回の測定点群の中心を通る何らかの曲線が実際の現象を的確に表している。これは、圧縮強度を 30N/mm^2 間隔で 10N/mm^2 ずつ大きくした場合(表-2の下段)においても、前述の最小値を固定した場合と同様の傾向がある。

これまでにも反発度と圧縮強度の関係に対し、曲線回帰を行った研究があり、日本建築学会マニュアル⁹⁾では二次式や累乗式等の研究例が紹介されている。例えば、今回の試験結果に対し、累乗回帰を行ったものが、式(2)である。

$$F = 41.8 \times (R / 100)^{2.38} \quad (2)$$

図-1に示した試験結果と回帰曲線の関係を見れば、低強度から高強度域に至るまで広範囲にわたって圧縮強度を推定する場合には、何らかの曲線式で近似するのが妥当である。ただし、テストハンマーの反発度とコンクリートの圧縮強度の関係を明確にするためには、まず、反発度の物理的な意味合いを把握した上で、その原理に沿った近似式を与えることが重要であると考えられる。

3. テストハンマーの動作機構に基づく反発度の理論式の導出

テストハンマーの内部構造の主たる部分を、図-4に示す。テストハンマーとは、ばねの力を利用し、その跳ね返りの程度を測定する試験器である。図-5は、図-4に示した試験器内部におけるハンマーとプランジャーの

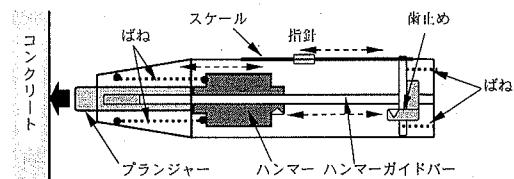


図-4 テストハンマーの内部構造

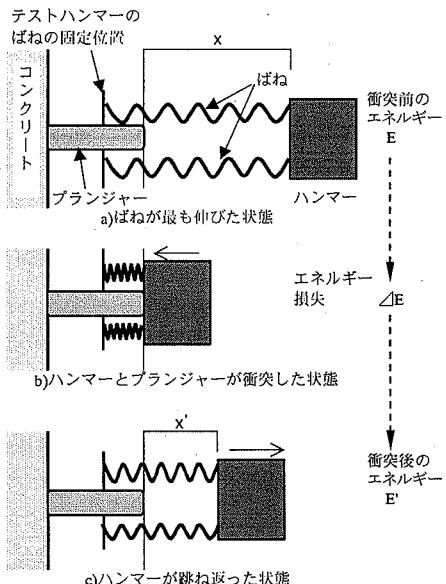


図-5 テストハンマー試験器内におけるハンマーとプランジャーの衝突現象のモデル化

衝突現象を簡略化して表したものである。ばねのエネルギーは、式(3)に示すとおり、ばね定数kと衝突前の距離xで表すことができる。

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \quad (3)$$

図-5のとおり、衝突後の跳ね返り距離を x' とすれば、衝突に伴うエネルギー損失 ΔE は式(4)と表される。また、衝突前後の距離の比 x/x' を反発係数eに置換し、式(3)を式(4)に代入すれば、式(5)のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{1}{2} k(x^2 - x'^2) \\ &= \frac{1}{2} kx^2 \left\{ 1 - \left(\frac{x'}{x} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta E/E = 1 - e^2 \quad (5)$$

次に、テストハンマーの内部には、図-4 に示したように様々な部品があり、機械的な摩擦や補助的に使用されているばね等のエネルギー損失を考慮する必要がある。しかし、機械の特性値は非公開で、個々の値を求めて検証するのは困難であるため、本論文ではエネルギー効率 η として一括して処理することとした。また、プランジャーとコンクリートには、図-6 に示すとおり、衝突によって何らかの変形を伴う。テストハンマーの試験後に観察されるコンクリート表面のくぼみ（塑性変形）はその一つであり、エネルギーの一部はこの塑性変形によって消費される。コンクリートおよびプランジャー（鋼材）が弾性体であることから、衝突時には双方で弾性変形が生じると考えられる。以上の現象を考えたエネルギー収支は、式(6)に示すとおり、衝突前のハンマーによってばねに与えられたエネルギー E に対してエネルギー効率 η を乗じたエネルギー ηE が、衝突後の弾性変形に伴うエネルギー E_e とコンクリートの塑性変形に費やされたエネルギー E_{cp} の和に相当する。

$$\eta E = E_e + E_{cp} \quad (6)$$

ただし、プランジャーがコンクリート構造体に衝突した際には、そのエネルギーの一部が弾性波の伝播、逸散によって消費される可能性がある。式(6)では、試験器の機械的な摩擦損失と弾性波の伝播・逸散を総合したエネルギー効率を η として与えていることになる。

式(5)に示したエネルギー損失 ΔE は、式(7)に示すようにエネルギー効率 η に関わる損失 $(1-\eta)E$ とコンクリートの塑性変形に費やされたエネルギー E_{cp} の和であるが、式(6)の関係により衝突前のエネルギー E から弾性変形に伴うエネルギー E_e を差し引いた値でもある。

$$\begin{aligned} \Delta E &= (1-\eta)E + E_{cp} \\ &= E - E_e \end{aligned} \quad (7)$$

変形に着目した場合には、図-6 に示した衝突時の変形は、式(8)に示すとおりである。

$$\begin{aligned} \theta_{all} &= \theta_e + \theta_{cp} \\ &= \theta_{pe} + \theta_{ce} + \theta_{cp} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、

- θ_{all} :衝突によって生じる全変形
- θ_e :衝突時の全弾性変形
- θ_{pe} :プランジャーの弾性変形
- θ_{ce} :コンクリートの弾性変形
- θ_{cp} :コンクリートの塑性変形

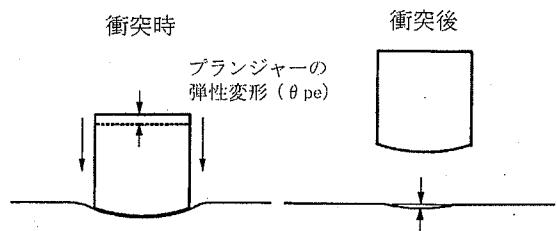


図-6 コンクリート表面とプランジャーの衝突によって発生する変形

また、荷重 P と弾性変形 θ_e は一次の関係にあるので、弾性変形に伴うエネルギー E_e は式(9)のように表すことが可能である。

$$\begin{aligned} E_e &= \frac{1}{2} \theta_e \cdot P \\ &= \frac{1}{2} \theta'_e \cdot P^2 \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、

E_e :弾性変形に伴うエネルギー

θ_e :全弾性変形

P :荷重

θ'_e :単位荷重当たりの全弾性変形, $\theta'_e = \theta_e / P$

一方、塑性変形は弾性変形と同様に荷重と一次の関係にあるとは限らないが、ブリネル硬度の定義を利用すれば、弾性変形と同様の扱いが可能である。ブリネル硬度とは、金属やセラミックスの硬度指標の一つで、式(10)で定義される¹⁷⁾。ブリネル硬度試験は、鋼球を試験体に押しつけ、発生したくぼみの直径から硬度を計算するもので、ブリネル硬度は鋼球に与えた荷重と比例、発生したくぼみの直径および深さとは反比例の関係にある。

$$\begin{aligned} H_B &= \frac{P}{2\pi r \theta_{cp}} \\ &= \frac{1}{2\pi r \theta'_c P} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、

H_B :ブリネル硬度

P :荷重

r :プランジャー先端の曲率半径

θ_{cp} :コンクリートの塑性変形

θ'_c :単位荷重当たりのコンクリートの塑性変形,

$$\theta'_c = \theta_{cp} / P$$

式(10)の分母は、球体の表面積の計算に相当する。Frank のばね式ハンマー¹⁸⁾は、まさしく同一の原理を用いたテストハンマーである。今回の研究で使用したテストハンマーは、この Frank のばね式ハンマー¹⁸⁾を応用したもので、プランジャーの先端が球面であることから、同様にブリネル硬度の考え方を用いることができる。ブリネル硬度の定義に従えば、塑性変形は弾性変形と同様な式の展開が可能になり、塑性変形に費やされるエネルギー Ecp は式(11)に示すとおりである。

$$\begin{aligned} Ecp &= \frac{1}{2} \theta' cp \cdot P \\ &= \frac{1}{2} \theta' cp \cdot P^2 \end{aligned} \quad (11)$$

さらに、式(6)、式(9)および式(11)の関係により、弾性変形に伴うエネルギー Ee と打撃前にはねに蓄えられたエネルギー E の比は、式(12)に示すように単位荷重当たりの弾性変形 $\theta' e$ 、単位荷重当たりの塑性変形 $\theta' cp$ およびエネルギー効率 η で表すことができる。

$$Ee/E = \eta \frac{\theta' e}{\theta' e + \theta' cp} \quad (12)$$

テストハンマーの反発度は、試験器に取り付けられた目盛を全長とし、跳ね返りの程度に合わせて移動する指針の距離の比を読み取っている。これは、図-5 に示したハンマーとプランジャーの衝突前後における距離の比 x'/x を伝達したものであり、結局、反発度は式(4)、(5)に示した反発係数 e に相当する。ただし、反発度は一般にはこの距離の比を百分率で表示した値を用いている。そこで、式(5)の反発係数 e を反発度 ρ に置換すれば、式(7)の関係により Ee/E は反発度 ρ の 2 乗になる。これを式(12)に代入すれば、反発度 ρ と塑性変形およびそのエネルギーとの関係式が得られる。それぞれの関係は、以下に示すとおりである。

$$Ee/E = 1 - \Delta E/E = \rho^2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{\eta \frac{\theta' e}{\theta' e + \theta' cp}} \\ &= \sqrt{\eta \frac{Ee}{Ee + Ecp}} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)において、単位荷重当たりの塑性変形 $\theta' cp$ を限り

なく 0mm/kN に近づければ、反発度 ρ は、式(15)に示すとおり、エネルギー効率 η の平方根に収束し、これが反発度の最大値 ρ_{max} となる。エネルギー効率 η は、試験器の機械的な摩擦損失や弾性波の伝播・逸散によって発生するものであり、これらが全く存在しない場合には $\eta = 1$ となるが、実際の問題としてテストハンマー試験ではこれを無視できず、 $\eta < 1$ となる。

$$\rho_{max} = \sqrt{\eta} \quad (15)$$

式(14)に戻り、これに式(10)を代入すれば、結局、ブリネル硬度と反発度の関係が式(16)に示す形で表されることになる。反発度は硬度自体を表すものではなく、硬度とは式(16)の関係にある指標で、これは反発度を理解する上で極めて重要な関係である。

$$H_B = \frac{\rho^2}{2\pi r \theta' e (\eta - \rho^2)} \quad (16)$$

ここで、硬度（硬さ）とは、材料の弾塑性変形に対する抵抗を表す一つの尺度であるが、モース、ピッカース、ロックウェル、ショア、ブリネルなどの考案者の名前をとった様々な硬度が存在し、その試験方法も統一したものではない^{17) 19)}。基本的には、硬度というものの実態は明らかにはなっておらず、現状では、圧縮強度などの他の物性を簡易的に推定する指標として利用しているに過ぎない。金属やセラミックスの分野では、実務的には材料の強度と硬度が比較的直線関係にあるとしている^{19) 20)}。そこで、本論文においても、式(17)に示すように、コンクリートの圧縮強度 F とブリネル硬度 H_B の比例関係にあると仮定する。この仮定が成立するのであれば、式(16)および式(17)により、圧縮強度と反発度は式(18)に示した関係にある。

$$H_B = \alpha F \quad (17)$$

$$F = \frac{\rho^2}{2\pi r \alpha \theta' e (\eta - \rho^2)} \quad (18)$$

テストハンマーの反発度からコンクリートの圧縮強度を推定することが妥当であるかどうかを明確に判断するためには、まず、テストハンマーの反発度が式(14)で表されるようなエネルギーの授受を正確にとらえ、式(16)に示した硬度という指標を反映したものであるかどうか明らかにする必要がある。また、硬度と圧縮強度の相関性を調べ、この硬度という指標が圧縮強度を推定す

る上で有効であることを明らかにしなければならないと考えられる。

4. 静的圧入試験による反発度とブリネル硬度および圧縮強度の関係の検証

(1) 実験方法

3. で導いた反発度とブリネル硬度の関係を表す理論式、並びに圧縮強度とブリネル硬度の比例関係の仮定を検証するため、静的圧入試験を実施した。静的圧入試験とは、圧縮試験機の加圧板上に供試体を設置し、上方からテストハンマーのプランジャーで供試体表面を加圧するものである。プランジャーを固定した治具の両側に変位計を取り付け、載荷開始から除荷終了での変位を測定し、2値を平均した。コンクリートに対する静的圧入試験に定まった方法がないので、圧縮強度試験（JIS A 1108）を参考に、同程度の加力速度（1秒当たり 0.5 N/mm^2 ）を想定した。しかし、プランジャーの先端が球形で、応力（接触面積）で等速とするのは難しいため、円柱部の断面積 177mm^2 （直径 15mm ）で考えて 0.1kN/s とした。最大荷重は、圧痕深さが過大とならない $6\sim8\text{kN}$ を中心、 $4, 6, 8, 10\text{kN}$ の4水準とし、この4水準で得られた変形量を平均したもので評価を行った。なお、供試体等の条件は、2. の従来手法による検討と同一である。

静的圧入試験によって得られる荷重-変位曲線を、図-7に示す。荷重と変位の関係は、載荷時、除荷時ともに直線ではなく、曲線となる。弾性変形および塑性変形は式(9)、式(10)で荷重に比例するものと定義しているが、プランジャー先端が球面であるのでコンクリートに接する表面積が荷重によって変化し、また球の表面積と変位が一次の関係にあることから、このような曲線を描くことになる。

弾性変形 θ_{cp} および塑性変形 θ_e は、変位を直接読み取ることによって求めることができる。しかし、前述のように直線変化を示さず、最大荷重点Aから除荷する場合に荷重 0kN 近くで急激に変化することから、除荷点Cの変位を正確に読み取ることが難しい。そこで、図中の載荷時の曲線OAと直線ABおよび直線BOで囲まれる部分の面積と、除荷時の曲線ACと直線ABおよび直線BCで囲まれる面積によって、弾性変形に伴うエネルギーEe（黒塗り部分）と塑性変形に費やしたエネルギーEcp（白抜き部分）を計算した。これらの値を式(14)に代入し、エネルギー効率を仮定すれば、反発度が算定可能となる。ブリネル硬度についても同様に、その塑性変形に費やしたエネルギーEcpと式(11)によって塑性変形を計算し、この塑性変形を式(10)に代入して求めた。

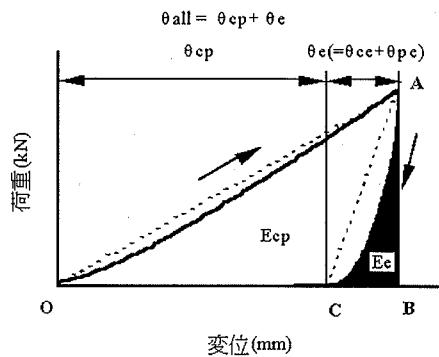


図-7 静的圧入試験における荷重-変位曲線

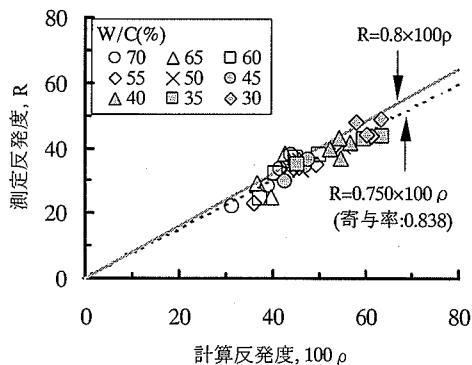


図-8 計算反発度と測定反発度の関係

静的圧入試験では、テストハンマー試験と異なり、コンクリートへの弾性波の伝播・逸散によるエネルギー損失はなく、またハンマーガイドバー等による摩擦に伴うエネルギー損失も生じないことから、エネルギー効率 $\eta=1$ と仮定した。このように静的圧入試験から得られた反発度を、テストハンマー試験による測定反発度と区別して計算反発度と呼ぶことにする。

(2) テストハンマー試験でのエネルギー効率 η の算出

計算反発度 R と測定反発度 100ρ （ R に合わせて 100 倍した値）の関係を、図-8に示す。両者には、式(19)に示すとおり、比例関係が成立し、比例係数は 0.750 と計算された。切片を 0 としない場合の直線回帰を行った場合には、傾き 0.735 、切片 0.734 および寄与率 0.838 となり、切片が極めて小さく、寄与率にも違いがないことから、切片を持たない式(19)の関係で表しても問題ないと判断される。

$$R=0.750 \times 100\rho \quad (19)$$

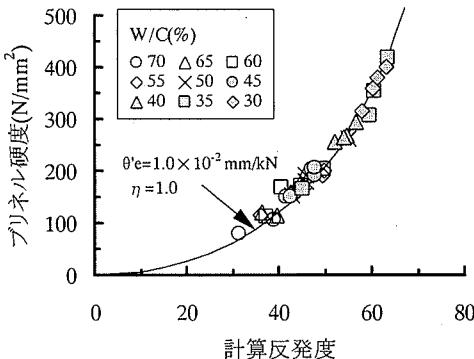


図-9 計算反発度とブリネル硬度の関係

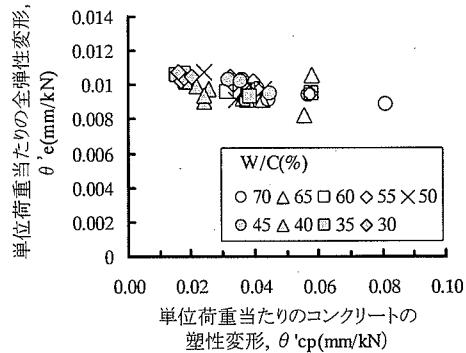


図-10 単位荷重当たりのコンクリートの塑性変形と単位荷重当たりの全弾性変形の関係

計算反発度はエネルギー効率 $\eta=1$ として反発度を求めたもので、式(14)に示したとおり、反発度はエネルギー効率の平方根との関係があることから、テストハンマーのエネルギー効率を式(20)のように計算できる。

$$\eta = (R / 100\rho)^2 = 0.563 \quad (20)$$

テストアンビル（鋼）に対する反発度 R_{max} は 80 である。繰返し使用による長期的な摩耗を除き、テストアンビルには塑性変形を生じないことから、式(15)の ρ_{max} を $R_{max}/100$ に置き換えれば、エネルギー効率 η は 0.640 と計算される。すなわち、コンクリートに対してテストハンマー試験を行った場合のエネルギー効率 η は鋼よりも小さいことになる。同一試験器の使用により機械的な摩擦は一定として扱うことが可能なので、このエネルギー効率 η の差は、供試体中に逸散する衝撃エネルギー量の違いに起因するものと判断される。

(3) 反発度とブリネル硬度の関係

計算反発度とブリネル硬度の関係を、図-9 に示す。図中に示した曲線は、式(16)に単位荷重当たりの全弾性変形 $\theta'e = 1.0 \times 10^{-2} \text{ mm/kN}$ を与えたものである。この値は、 $\theta'e$ を変数とし、全データに対して式(16)を当てはめ、最小二乗法によって算出した。計算反発度とブリネル硬度の関係は、式(16)と明確な相関が認められる。すなわち、テストハンマーの動作機構に基づいて導出した理論式(16)が成立することを示唆するものである。

単位荷重当たりの全弾性変形 $\theta'e$ のうち、コンクリートの弾性変形 $\theta'ce$ は、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数と何らかの関係があると考えるのが一般的である。実験に使用したコンクリートは、2. に示したように圧縮強度が $9.7 \sim 74 \text{ N/mm}^2$ 、これに対応するヤング係数が

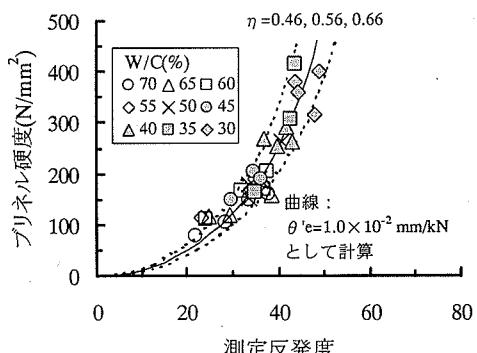


図-11 測定反発度とブリネル硬度の関係

$18.2 \sim 34.7 \text{ kN/mm}^2$ と広い範囲を有する。しかし、単位荷重当たりのコンクリートの塑性変形 $\theta'cp$ は、図-10 に示すとおり、 $1.54 \sim 8.11 \times 10^{-2} \text{ mm/kN}$ の範囲で大きく変化しているに対し、単位荷重当たりの全弾性変形 $\theta'e$ は $0.82 \sim 1.08 \times 10^{-2} \text{ mm/kN}$ となり、ほとんど変化しない。

一方、測定反発度とブリネル硬度の関係は、図-11 に示すとおり、図-9 に示した計算反発度の結果に比べ、ばらつきが大きい。単位荷重当たりの弾性変形 $1.0 \times 10^{-2} \text{ mm/kN}$ とした場合、エネルギー効率 η は 0.56 ± 0.10 程度のばらつきが見られる。

(4) 圧縮強度とブリネル硬度の関係

図-12 は、圧縮強度とブリネル硬度の関係を調べたものである。両者は、高い相関で比例関係にあり、言い換えれば、式(17)の仮定が成立することを意味する。両者の関係にはある程度のばらつきは存在するものの、ブリネル硬度は、強度域に関わらず、ほぼ一定比率で圧縮強度の推定に利用できる指標である。ただし、図中の点線が示すとおり、少なくとも、比例係数 $\alpha=5.2$ に対して

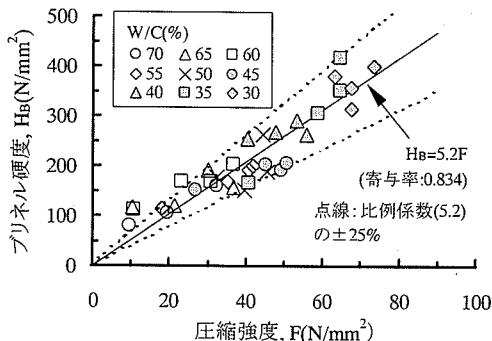


図-12 圧縮強度とブリネル硬度の関係

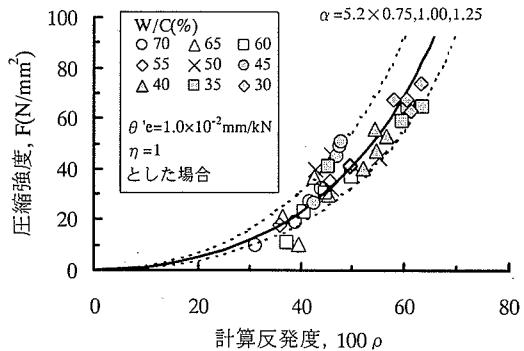


図-14 計算反発度と圧縮強度の関係における提案式の適合性

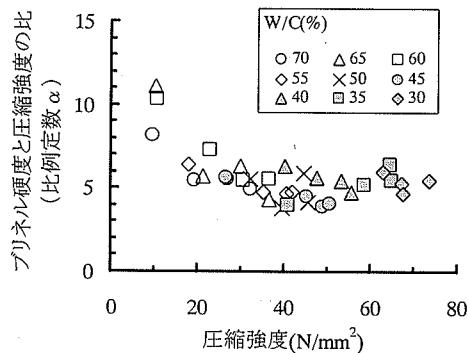


図-13 圧縮強度と比例係数 α の関係

±25%程度のばらつきを許容した上での強度推定であることを認識する必要がある。

また、図-13 に示すように、比例係数 α は圧縮強度が約 20N/mm^2 以上ではほぼ一定値に収束するが、それよりも小さい強度域では大きくなる傾向がある。今回の実験では、約 20N/mm^2 以上の試験データがほとんどであり、 α を一定値として評価しても支障はないが、これまでのテストハンマーに関する研究において低強度域のデータを多く含む場合には、一定値として取り扱うことは適当ではない可能性がある。

(5) 反発度と圧縮強度の関係

図-14 は、計算反発度と圧縮強度の関係における提案式(16)の適合性を調べたものである。図中の曲線は、式に対して、エネルギー効率 $\eta=1$ 、単位荷重当たりの全弾性変形 $\theta'e=1.0 \times 10^{-2}\text{mm/kN}$ とし、さらに図-12 で得られた比例係数(5.2)とばらつきの範囲(比例係数に対して ±25%倍)を考慮した値を代入した結果である。筆者らが導いた式の曲線は、試験結果の傾向を的確に表している。また、圧縮強度とブリネル硬度の関係で確認されたばらつきが、計算反発度と圧縮強度の関係に直接反映される

ことが理解できる。

次に、測定反発度と圧縮強度の関係に対し、計算反発度と同様の比較を行ったものが、図-15 である。図中には、エネルギー効率 η 、圧縮強度とブリネル硬度の関係における比例係数 α のいずれかを一定とし、他方を変化させた結果を示した。それぞれの値 ($\eta=0.56$, $\alpha=5.2$) および変動幅 ($\eta: \pm 0.10$, $\alpha: 5.2 \pm 25\%$) は、図-11 および図-12 の結果を用いた。測定反発度と圧縮強度の関係を表す曲線は、計算反発度の場合と同様に、試験データの傾向を的確に表している。

テストハンマーによる反発度がコンクリートの硬度を捉えるものであるとの解釈に従えば、反発度から圧縮強度を推定する際には、エネルギー効率 η 、および硬度と圧縮強度の関係を結びつける係数 α 両者のばらつきが、圧縮強度の推定誤差に結びつく。 η および α のばらつきが、それぞれ独立な事象であると考えるならば、図-11 および図-12 に示した結果により、測定反発度と圧縮強度の間のばらつきは、相当大きくなることが予想される。しかし、図-15 の結果を見れば、試験データは、いずれかの変数を一定とすることにより、他の変動幅の中に収まることがわかる。エネルギー効率 η を 0.56 とした場合の測定反発度と圧縮強度の関係は、エネルギー効率 η が 1 である計算反発度と圧縮強度の関係における比例係数 α の変動幅の影響度とほとんど違いが見られない。すなわち、 η と α の間には完全な独立の関係ではなく、何らかの相関性を有していることが予想される。

そこで、図-16 に示すように、ブリネル硬度と圧縮強度の比に相当する比例係数 α と、エネルギー効率 η の関係を調べた。比例係数 α とエネルギー効率 η の関係は右下がりの傾向にあり、比例係数 α が大きい場合にはエネルギー効率 η が小さくなる。両者の関係は明確なものではないが、コンクリート供試体の同種の性質を比較的反映しているものと考えられ、この傾向が、図-14 に示し

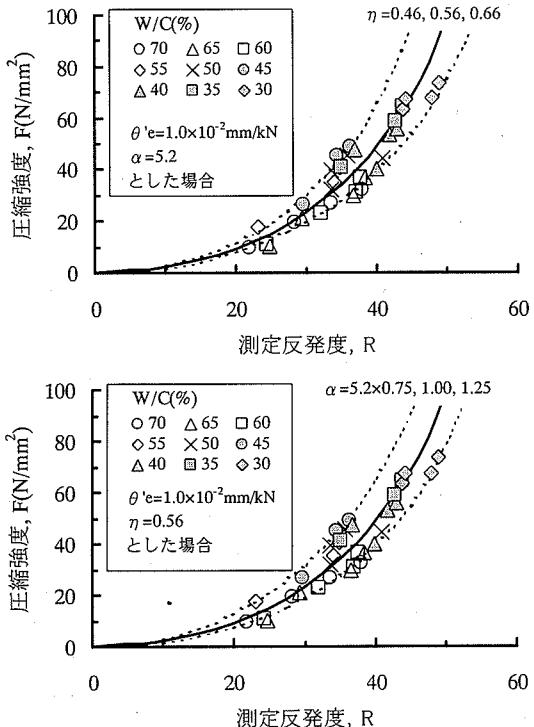


図-15 測定反発度と圧縮強度の関係における提案式の適合性

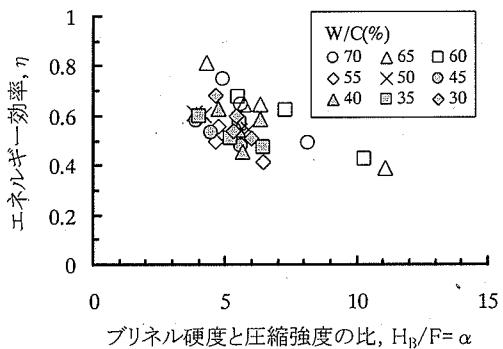


図-16 ブリネル硬度と圧縮強度の比およびエネルギー効率の分布

たように測定反発度のばらつきが想定よりも小さくなる結果を得ているものと推測される。

(6) 高強度コンクリートに対する反発度による圧縮強度の推定の問題

筆者らは、工場製品に対して反発度と圧縮強度の関係を調べ、直線回帰を行った場合、高強度域ほど、ばらつきが大きいことを報告してきた¹²⁾。図-15に示した

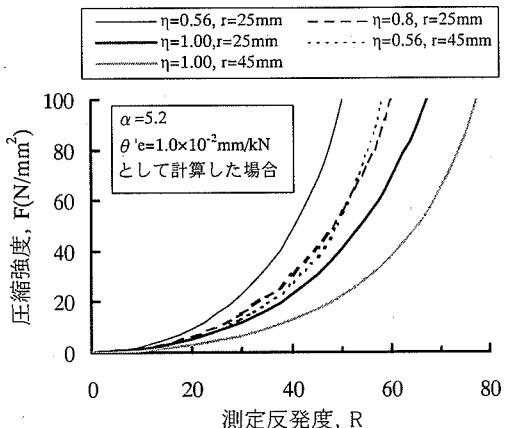


図-17 提案式のエネルギー係数 η とプランジャー先端の曲率半径 r を変化させた場合の測定反発度と圧縮強度の関係

とおり、測定反発度と圧縮強度の関係は、筆者らの提案式(18)による曲線で表すことができる。その場合、比例係数 α もしくはエネルギー効率 η が変化した場合の推定圧縮強度への影響は、高強度であるほど大きくなることが明らかである。

また、式(18)による曲線は、反発度が大きくなるほど、反発度の変化に対する圧縮強度の増分が急激に大きくなる。そのため、一次式、累乗式あるいは提案式(18)のいずれで回帰を行ったとしても、高強度域では、反発度のわずかな違いが推定される圧縮強度に大きく影響しやすい。反発度の精度、コンクリート表面等の状態の影響等を考えた場合、高強度域で圧縮強度の推定精度を向上させることはかなり難しいと考えらえる。

このようなことから、実務レベルでは、反発度の変化に対する圧縮強度の増分がなるべく緩やかになるテストハンマーが要望される。例えば、提案式(18)で計算すれば、図-17に示すように、曲率半径 r を 45mm に大きくした場合には、現状の曲率半径 $r=25mm$ のプランジャーを使用したテストハンマーに対し、エネルギー効率 η を 0.8 まで高めた状態とほぼ一致する。プランジャーの曲率半径 r が大きなものを使用し、かつ、エネルギー効率 η がなるべく 1 に近いものを使用することにより、従来よりもやや緩やかな曲線を描く可能性があるが、その効果は高強度域よりも低強度域の方が大きい。高強度域のコンクリートに対し、テストハンマーの反発度によって圧縮強度を精度よく推定するためには、テストハンマーの構造等の抜本的な見直しが必要であると考えられる。

5. 結論

テストハンマーの反発度による圧縮強度の推定に関し、従来の直線回帰手法の問題を把握することから、テストハンマーの動作機構に基づいて反発度と圧縮強度の関係を導き、静的圧入試験によってその妥当性の検証を行った。今回の実験の範囲で、以下のことが言える。

- (1) 反発度と圧縮強度に対し、直線回帰を行った場合、その回帰に用いる強度域によって傾きおよび切片が変化する。すなわち、高強度域のデータが多いほど、傾きは大きく、切片は小さくなる傾向がある。これは、反発度と圧縮強度が直線関係になく、曲線関係にあることを示唆するものである。
- (2) テストハンマーの動作機構をふまえ、反発度とコンクリートの硬度の関係を明確にした。反発度 ρ （通常の値の $1/100$ ）、ブリネル硬度 H_B 、プランジャー先端の曲率半径 r 、単位荷重当たりの全弾性変形 $\theta'e$ 、単位荷重当たりのコンクリートの塑性変形 $\theta'cp$ およびエネルギー効率 η には、次式の関係が成立する。

$$\rho = \sqrt{\eta \frac{\theta'e}{\theta'e + \theta'cp}}$$

$$H_B = \frac{\rho^2}{2\pi r \theta'e (\eta - \rho^2)}$$

- (3) コンクリートの供試体を使用した場合のエネルギー効率 η は 0.56 となり、テストアンビル（鋼）を打撃した際のエネルギー効率 $\eta=0.64$ よりも小さいことがわかった。ただし、ばらつきを考慮する上では、エネルギー効率 η として 0.56 ± 0.10 程度の範囲を与える必要がある。
- (4) 静的試験によって得られたブリネル硬度と計算反発度の関係は、結論(2)に示した関係式に対し、全弾性変形 $\theta'e$ の値として $1.0 \times 10^2 \text{ mm/kN}$ を与えた曲線上にプロットされ、提案した関係式の妥当性が検証された。
- (5) 圧縮強度とブリネル硬度の間には概ね比例関係が成立する。そのため、ブリネル硬度と反発度の理論式を発展させた次式により、圧縮強度 F の推定が可能である。ただし、約 20 N/mm^2 以下の低強度域では、比例係数 $\alpha=5.2$ よりも大きくなる傾向があること、並びに試験結果のばらつきはその比例係数 $\alpha=5.2$ に対して $\pm 25\%$ 程度の範囲を考慮する必要がある。

$$F = \frac{\rho^2}{2\pi r \alpha \theta'e (\eta - \rho^2)}$$

- (6) テストハンマー試験で測定した反発度と圧縮強度の関係では、エネルギー効率 η 、比例係数 α のいずれか一方のばらつきを考慮することにより、提案式は試験結果と一致する結果となる。すなわち、エネルギー効率 η と比例係数 α は、完全な独立の関係はない。

謝辞： 本研究は、(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメントチームと(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会で構成される「PC 部材の軽量・高耐久化に関する共同研究委員会」の共同研究の一環として実施したものであり、ご協力いただいた関係各位に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂静雄、松井敏夫：表面硬度法による実施コンクリートの強度判定法、セメント技術年報、Vol.9, pp.395-401, 1955.
- 2) 伴潔、木村恵雄：打撃硬度試験によるコンクリート強度の判定、セメント技術年報、Vol.9, pp.401-407, 1955.
- 3) 日本材料試験協会：シムミット・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.427-430, 1958.8 (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ー第38号、pp.85-90, 1974.9への転載内容を参考)。
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8, pp.1-22, 1982.8.
- 7) 長島弘：実施コンクリート強度の硬度による簡易推定方法、セメント技術年報、第9巻、pp.407-412, 1955.
- 8) 尼崎省二、明石外世樹：シムミットハンマーおよび超音波法によるコンクリートの非破壊試験について、セメント技術年報、第32巻、pp.275-279, 1978.
- 9) 尼崎省二、明石外世樹：シムミットハンマーによるコンクリートの局部変形とプランジャーに生じる衝撃応力波について、セメント技術年報、第33巻、pp.407-412, 1979.
- 10) 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.

- 11) 添田政司, 徳光卓, 濱尚史, 大和竹史: テストハンマーによる高強度・高流動コンクリートの強度推定に関する実験的研究, Cement Science and Concrete Technology, No.55, pp.245-249, 2001.
- 12) 谷口秀明, 渡辺博志, 鈴木雅博, 藤田学: プレストレストコンクリート部材へのテストハンマーの適用性に関する検討, プレストレストコンクリート, Vol.44, No.5, pp.47-52, 2002.9.
- 13) 谷口秀明, 渡辺博志, 田中良樹, 藤田学: 高炉スラグ微粉末を用いたPC用コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.531-537, 2002.6.
- 14) 沢田守雄, 兼子政志, 沢田兼二: シュミットハンマーの単打および連打によるコンクリートの強度判定について, プレストレストコンクリート, Vol.18, No.3, pp.22-28, 1976.6.
- 15) 松下博通, 徳光善治, 潤淵誠一: シュミットハンマーによるコンクリートの強度推定, セメント技術年報, Vol.33, pp.253-256, 1979.
- 16) 舟川勲, 谷口秀明, 牛島栄: 高流動コンクリートのテス
- トハンマーによる強度推定に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.322-327, 1997.
- 17) 寺澤正男: 硬さのおはなし, 日本規格協会, 1981.
- 18) 岡田清, 六車熙編: 改訂新版コンクリートハンドブック, 朝倉書店, 1991.
- 19) 産業技術センター編集委員会編: セラミックス材料技術集成, 1979.4.
- 20) 日本金属学会: 改訂3版金属便覧, 丸善, 1971.
- 21) 日本材料試験協会: 材料試験便覧, 丸善, 1957.

(2003.10.16 受付)

DISCUSSION ON ACCURACY OF CONCRETE STRENGTH ESTIMATION AND HARDNESS MEASUREMENT BY REBOUND HAMMER

Hideaki TANIGUCHI, Hiroshi WATANABE,
Hirotaka KAWANO and Manabu FUJITA

This paper describes results of the research on the problems of concrete strength estimation by rebound hammer tests. The relationship between the rebound number and the concrete hardness obtained by the experiments almost coincides with the one theoretically derived. Accordingly, the rebound number expressed hardness, including the experimental error that affected by the random change of the impact energy loss in concrete. The energy loss can cause increased error of hardness in high strength concrete. It was also shown that the hardness was approximately proportional to compressive strength, which means the hardness was a possible index to evaluate compressive strength of concrete.