論文　テストハンマーによるコンクリート強度の推定方法に関する研究

谷口　秀明[*1]・山本　泰彦[*2]

要旨：本研究では，テストハンマーによるコンクリートの強度推定に対して，筆者らが提案した反発度と圧縮強度の関係を表す理論式を適用する場合に必要となる各係数に及ぼす諸要因とその影響の度合いを室内実験により確認した。提案式は，検討の結果をもとに各係数に対して適切な値を代入すれば，筆者らが実施した室内実験のみならず，他者が実施した室内実験および高流動コンクリートを用いた大型部材の試験値にも適合することがわかった。

キーワード：反発度，圧縮強度，骨材量，水セメント比，材齢

1. はじめに

テストハンマーによる構造物の検査・点検では，1958 年に日本材料試験協会（現在，日本材料学会）の指針案 [1)]に示された推定式（以下，JSMS 式）により，コンクリートの圧縮強度を推定されることが多い。しかし，実測の圧縮強度と JSMS 式で求めた推定強度が一致しないことも多く，指針案の制定直後から様々な推定式が提案されている。JSMS 式を含め，既存の推定式は，いずれも反発度と圧縮強度の試験値に対して直線式等で回帰して求めたものである。このため，測定上の諸条件の違いにより推定精度の低下と新たな推定式の提案を繰り返すこととなり，現在においても JSMS 式が使用されている。

筆者らは，テストハンマーの構造および測定方法ならびにコンクリートの変形性状等について論理的に考察を行い，反発度と圧縮強度の関係を表す理論式を導き出し，これが妥当なものであることを確認している [2)]。理論式に含まれる各係数は，個々にキャリブレーションを行って求めるのが望ましいが，実務では必ずしも実施できるとは限らない。そこで，本論文では，理論式に含まれる各係数に及ぼす諸要因とその影響の度合いを把握し，小型試験体および大型部材の試験値との比較により，得られた各係数の値を代入した提案式の妥当性を確認した。

2. 反発度と圧縮強度の関係を表す理論式

提案した理論式を，式(1)に示す。単位荷重当たりの全弾性変形 δ'_e，比例係数 α およびエネルギー効率 η は，通常のテストハンマー試験および圧縮強度試験以外に，静的圧入試験（3.3 を参照）を実施することにより求まる係数である。

$$F = \frac{(R/100)^2}{2\pi r \alpha \delta'_e \left[\eta - (R/100)^2\right]} \tag{1}$$

ここに，

F：圧縮強度(N/mm^2)

R：反発度

r：プランジャー先端の曲率半径(mm)

α：比例係数

δ'_e：単位荷重当たりの全弾性変形(mm/kN)，（以下，単位全弾性変形と略す）

η：エネルギー効率

3. 室内実験

3.1 セメント硬化体の条件

セメント硬化体の使用材料および配合を，それぞれ，**表－1**，**表－2** に示す。セメントには早強ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントを使用した。また，骨材量の影響を把握するため，コンクリート以外に，モルタル，ペーストを使用し，さらに骨材の容積比率を変化

*1 三井住友建設（株）　技術研究所　土木研究開発部　博（工）（正会員）

*2 筑波大学大学院　システム情報工学研究科　Ph.D. 工博（正会員）

させた配合も加えた。モルタルの配合比率は，コンクリート中のモルタル部分と一致させた。

3.2 供試体の条件

圧縮強度試験には円柱供試体（ϕ 100mm×200mm），テストハンマー試験および静的圧入試験には立方体供試体（一辺が 200mm，指針案[1]に準拠）を使用した。供試体の養生は，一般的な工事条件に合わせ，湿潤養生日数を早強ポルトランドセメントでは 3 日，普通ポルトランドセメントでは 5 日とし，その後は恒温恒湿室（20℃，60%）内に供試体を存置した。

3.3 セメント硬化体の品質に関する試験

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度の試験方法は JIS A 1108 に準じた。材齢は，早強ポルトランドセメントでは 1～182 日，普通ポルトランドセメントでは 5～580 日とした。以下の他試験も，同一材齢で実施した。

(2) テストハンマー試験

実験には，ばね式のテストハンマー（衝撃エネルギー：2.207N・m，プランジャー先端の曲率半径 r：25mm）を使用した。供試体の固定方法（圧縮応力 0.74 N/mm^2），打撃方法（水平方向），打撃数（20 点），反発度の異常値（測定した反発度の平均値に対して±20%以上外れるもの）の扱い等は，すべて指針案[1]に準じた。材齢や湿潤状態に対する補正は行わないこととしたが，高周波容量式水分計を使用し，供試体表面近くの含水率（以下，表面含水率）を測定した。

(3) 静的圧入試験

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，上方から供試体表面に対してプランジャーを押し付けた場合の変位を測定する試験である。荷重－変位曲線から得られるプランジャーとコンクリートの弾塑性変形により，単位全弾性変形 δ'_e（プランジャーとセメント硬化体の弾性変形を荷重で除した値），ブリネル硬度 H_B（セメント硬化体の塑性変形による）および計算反発度（エネルギー効率を 1 とし，弾塑性変形から求まる値）を計算した。また，比例係数 α はブリネル硬度 H_B と圧縮強度 F が比例関係（$\alpha=H_B/F$）にあると仮定して求め，エネルギー効率 η はテストハンマーで測定した反発度と計算反発度により求めた。荷重等の諸条件や各係数の算出方法は既報[2]と同一である。

表－1　使用材料

材料	種類，物性，成分	記号	
水	水道水	W	
セメント	早強ポルトランドセメント (密度3.14g/cm^3, 比表面積4480cm^2/g)	H	C
	普通ポルトランドセメント (密度3.15g/cm^3, 比表面積 3310cm^2/g)	N	
細骨材	鬼怒川産川砂(表乾密度2.58g/cm^3)と葛生産砕砂(硬質砂岩, 表乾密度2.64g/cm^3)の混合砂 (容積比1：1)	S	
粗骨材	葛生産砕石2005(硬質砂岩, 密度2.65g/cm^3, 吸水率0.60%, F.M6.65)	G	
混和剤	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	SP	
	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	AE	

表－2　配合

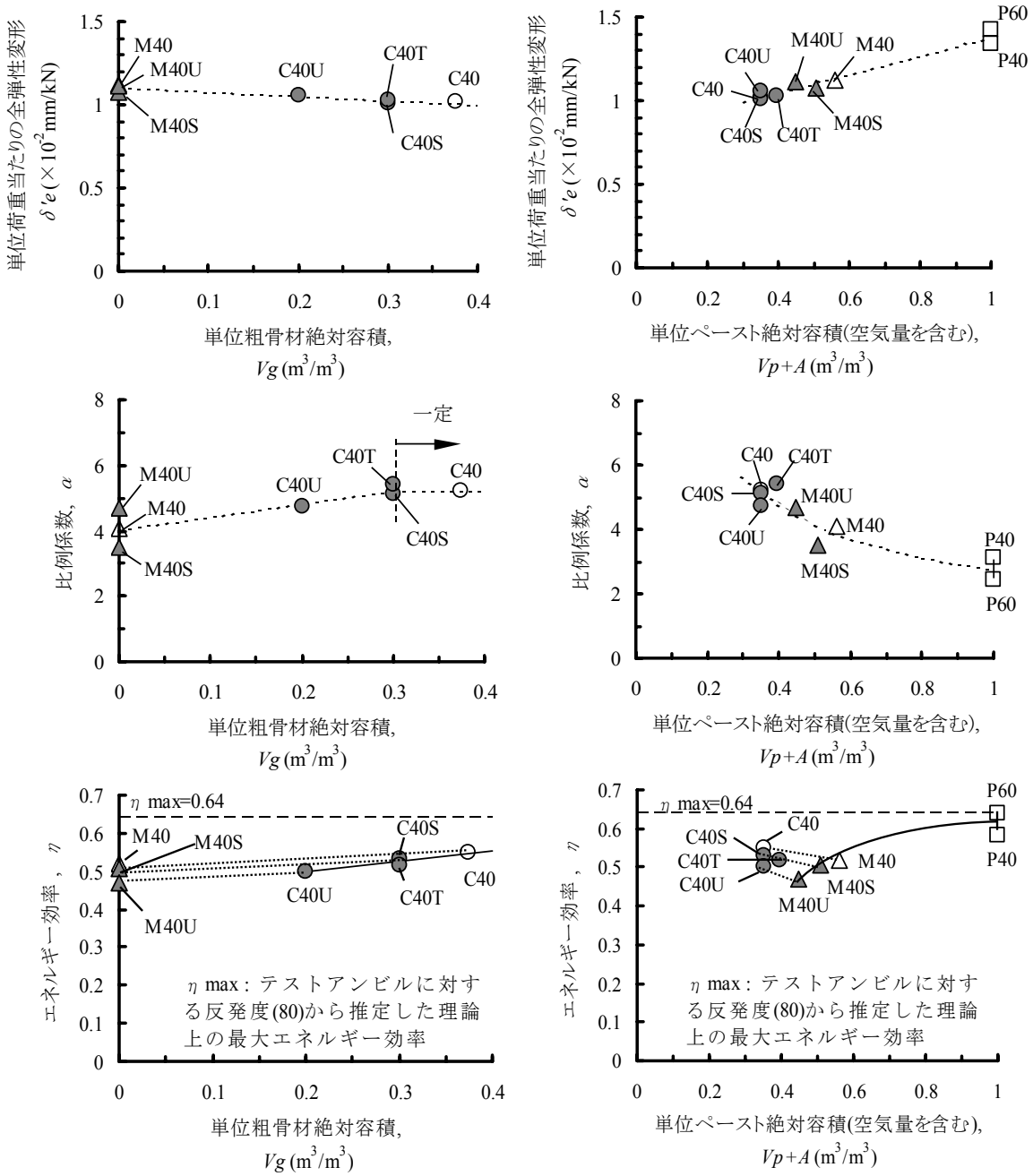
セメント硬化体の種類	空気量(%)	セメントの種類	記号	W/C(%)	絶対容積(m^3/m^3) Vw	Vp	Vm	Vg
コンクリート	4.5(±0.5)*1	H	C30	30	0.170	0.350	0.580	0.375
			C35	35		0.325		
			C40	40		0.305		
			C45	45		0.290		
			C50	50		0.278		
			C55	55		0.268		
			C60	60		0.260		
			C65	65		0.253		
			C70	70		0.247		
			C80	80		0.238		
			C100	100		0.224		
		N	C40N	40		0.305		
			C45N	45		0.290		
			C50N	50		0.278		
			C60N	60		0.260		
		H	C40S	40	0.170	0.305	0.655	0.300
			C40T		0.195	0.350		
			C40U		0.170	0.305	0.755	0.200
モルタル	7.5(±1.0)*1	H	M40		0.271	0.487	0.925	0
			M40S		0.240	0.432	0.925	
			M40U		0.208	0.374	0.925	
ペースト	0	H	P40	40	0.557	1	0	
			P60*2	60	0.653			

＜記号の説明＞ W/C：水セメント比， Vw，Vp，Vm，Vg：水，ペースト， モルタルおよび粗骨材の絶対容積
*1)（ ）の数字は，空気量の管理幅
*2)コンクリートおよびモルタルと同程度の圧縮強度を得るために空気量を増やすことが難しいので配合P60を追加。

4. 理論式に含まれる各係数に及ぼす要因

4.1 骨材量

図－1 は，水セメント比 40%のコンクリート，



図－1　粗骨材およびペーストの絶対容積が理論式に含まれる各係数に及ぼす影響

モルタルおよびペースト（配合 P60 は参考）を用いて，単位粗骨材絶対容積および単位ペースト絶対容積（空気量を含む）と理論式に含まれる各係数の関係を調べたものである。

単位全弾性変形 δ'_e は単位粗骨材絶対容積が小さくなるほど，単位ペースト絶対容積が増加するほど大きくなる傾向がある。すなわち，セメント硬化体中の骨材量が少ないほど，単位全弾性変形 δ'_e は大きくなる性質を有する。ただし，コンクリートを対象とすれば，単位全弾性変形 δ'_e は大きく変化する係数ではない。

比例係数 α は，単位全弾性変形 δ'_e の場合とは反対に，単位粗骨材絶対容積が大きいほど，単位ペースト絶対容積が小さいほど，大きくなる傾向がある。ただし，単位粗骨材絶対容積が $0.3 m^3/m^3$ 以上となる通常のコンクリートでは，比例係数 α はほぼ一定（5 程度）と見なせる。

同一の配合比率のコンクリートとモルタルを比較すれば，単位粗骨材絶対容積の減少あるいは単位ペースト絶対容積の増加に伴い，エネル

ギー効率 η が低下する傾向がある。エネルギー効率 η は均質なペーストが最も大きいが，粗骨材の存在によっても大きくなることがわかる。

4.2 水セメント比および材齢

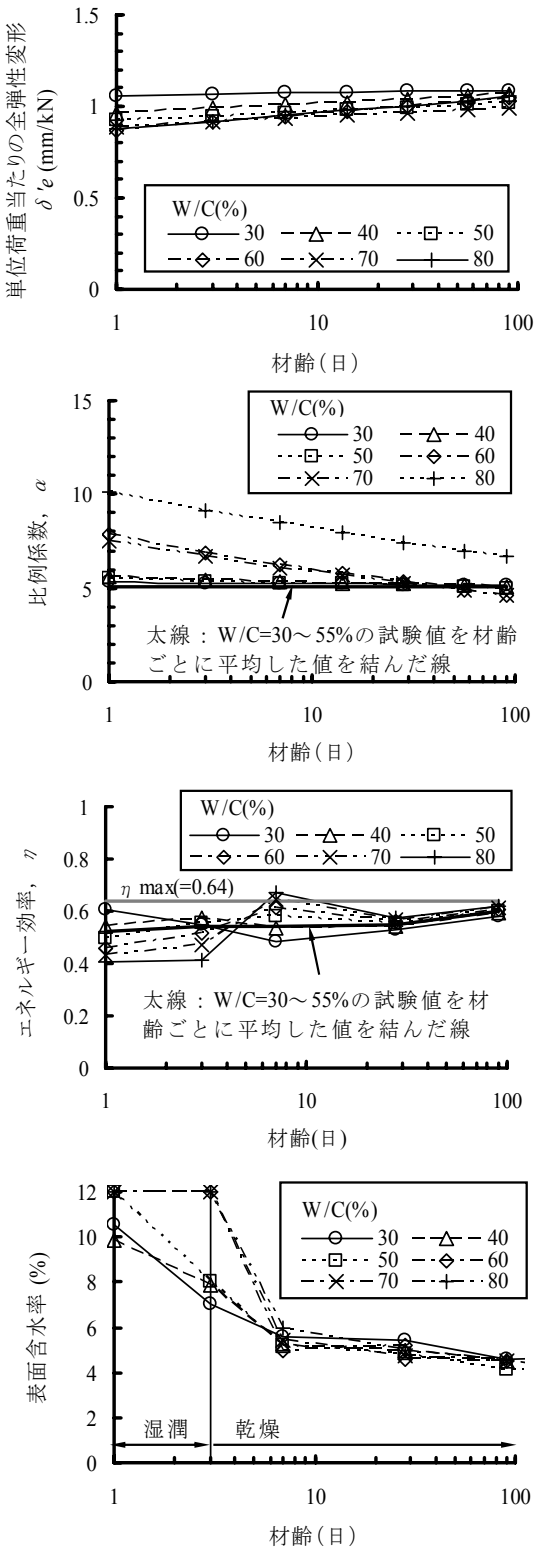
水セメント比と材齢が各係数に及ぼす影響を調べたものが，**図－2** である。ここでは，単位全弾性変形 δ'_e および比例係数 α の算出には材齢を変数とする累乗式を，エネルギー効率 η の算出では反発度（計算反発度を含む）とセメント水比の関係に対して直線式を用いて回帰した結果によって，おおよその傾向を表すこととした。

単位全弾性変形 δ'_e は，材齢とともに増加する傾向がある。また，水セメント比が小さいほど，単位全弾性変形 δ'_e は大きな値になるが，水セメント比の影響は材齢の経過とともに小さくなることがわかる。

比例係数 α は，水セメント比が 60%以上で，かつ材齢が短いほど，大きくなる傾向があるが，水セメント比が 55%以下では水セメント比および材齢の影響をほとんど受けず，ほぼ一定(5.1 程度)と見なせる。また，水セメント比が 60～70%であっても，材齢 28 日以降であれば，比例係数 α はほぼ一定として取り扱うことができる。

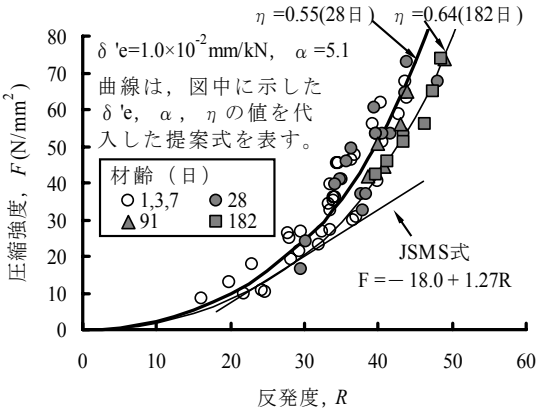
エネルギー効率 η は，水セメント比が大きいほど，材齢 1,3 日では小さく，材齢 7 日では反対に大きい。ただし，水セメント比が 30～55%の範囲ではエネルギー効率 η の差は小さく，また材齢 28 日以降では配合の違いによる差異は認められない。各材齢の平均値を結んだ太線により，エネルギー効率 η は材齢の経過に伴って緩やかに増加することがわかる。

材齢 7 日の表面含水率は，配合によって明確な違いは認められない。しかし，エネルギー効率 η の変化から判断すれば，水分計で測定される範囲よりも深い位置の含水状態がエネルギー効率に影響を及ぼす可能性がある。

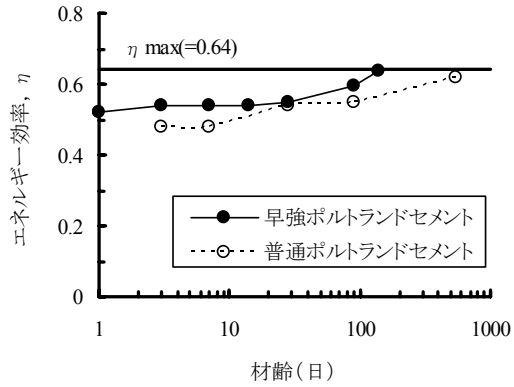


図－2　水セメント比および材齢が理論式に含まれる各係数と表面含水率に及ぼす影響

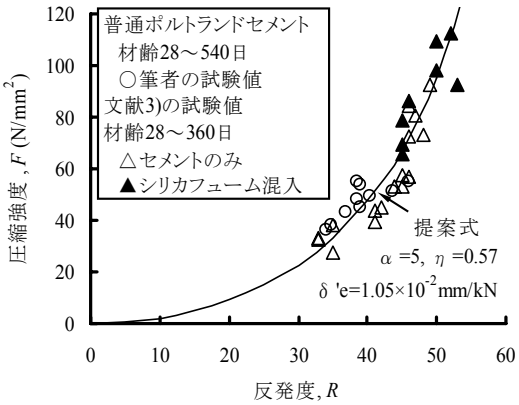
図－3 は，反発度と圧縮強度の試験値，提案式および JSMS 式を比較したものである。各係数の値には，**図－2** の結果をもとに材齢 28 日，182 日に対する平均的な値（図中に記載）を与えた。提案式の曲線は，材齢にかかわらず，試験値の傾向をよくとらえていることがわかる。提案式による推定強度は，JSMS 式の推定強度と比べ，圧縮強度が低い領域でほぼ一致し，反発度が大



図－3　反発度と圧縮強度の試験値と提案式および JSMS 式との比較



図－4　セメントの種類によるエネルギー効率の違い



図－5　普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの反発度と圧縮強度の試験値に対する提案式の適合性

きいほど高くなる傾向がある。JSMS 式が低強度域で筆者の試験値および提案式と一致するのは，JSMS 式が圧縮強度 5～40N/mm^2 程度の範囲で得られた直線回帰式であることに起因し，筆者の試験値で同様の回帰を行えば，JSMS 式に近い直線式が得られることを確認している [2]。

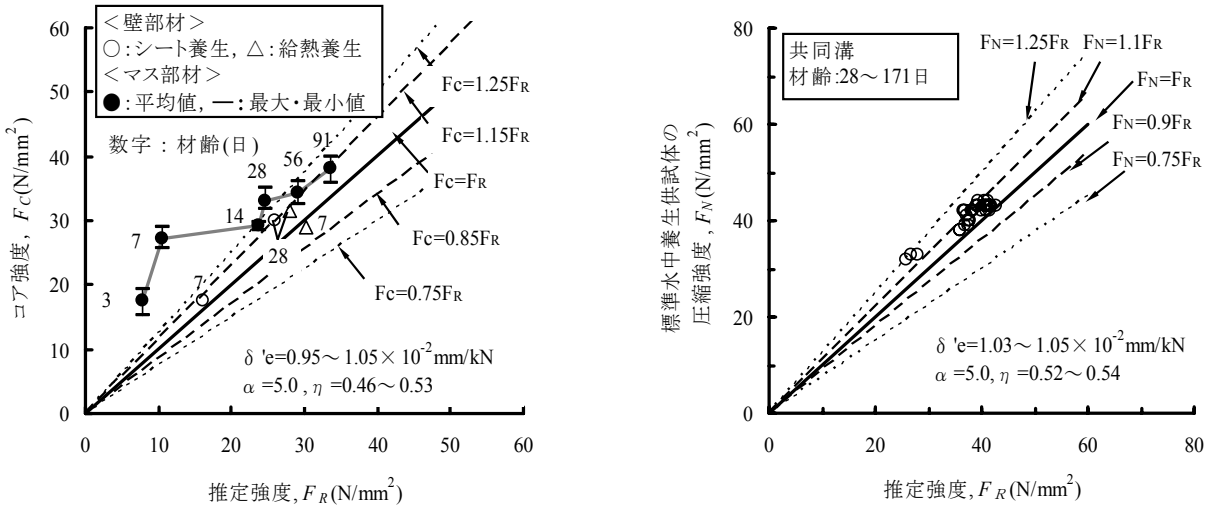
4.3 セメントの種類

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは，材齢 540 日までの単位全弾性変形 δ'_e は 0.95～1.05×10^{-2}mm/kN（材齢が長いほど増加）で，比例係数 α は平均で 5.0 となり，早強ポルトランドセメントの場合とほぼ一致する結果である。エネルギー効率 η に関しては，**図－4** に示すとおり，初期材齢の値が早強ポルトランドセメントの値よりも小さく，理論上の最大値(0.64)に達するまでの日数が長くなる。

図－5 は，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの反発度と圧縮強度の試験値に対する提案式の適合性を評価したものである。図中には，筆者らと同一のテストハンマーを使用した斯波ら [3]の試験値（材齢 28～360 日）もプロットした。比例係数 α は 5.0 とし，単位全弾性変形 δ'_e およびエネルギー効率 η については，水セメント比および材齢を考慮し，それぞれ，1.05×10^{-2}mm/kN，0.57 とした。提案式の曲線は，双方の実験で得られた試験値とほぼ一致し，また，シリカフュームを混入した 120N/mm^2 程度までの高強度域に対しても適用できることがわかる。

5. 大型部材の強度推定に対する提案式の適用例

高流動コンクリートを用いた大型試験体および実構造物（共同溝）における反発度と圧縮強度の試験値 [4]と提案式を比較したものが，**図－6** である。**表－3** にはコンクリートおよび大型部材の特徴を示した。図中に示した各係数の値は，セメントの種類，骨材量，水セメント比および材齢を考慮したものである。壁部材および共同溝における推定強度は，コア強度，管理用供試体よりも若干小さな値になる傾向があるが，実際の圧縮強度に対して±0.1 倍程度の範囲に収まる。一方，マス部材においては，セメントの水和熱および外気との境界条件により表面に比べて中心部の強度増進が大きい。このため，推定強度は，初期材齢ではコア強度の最小値（合板型枠に最も近い位置）よりもかなり小さく，材齢 91 日でコア強度の最小値とほぼ一致する。



(a)大型試験体　　(b)共同溝

図－6　高流動コンクリートを用いた大型部材に対する提案式の適合性

表－3　コンクリートおよび部材の条件

コンクリートの条件		セメントの種類	普通ポルトランドセメント
		水セメント比	大型試験体：50%，共同溝：53%
		単位粗骨材絶対容積	大型試験体：0.319m³/m³，共同溝：0.329m³/m³
部材条件	大型試験体	壁部材	小断面（厚さ：0.2m）。材齢7日までシート養生と給熱養生を行った箇所がある。7,28日にコア強度と反発度を測定した。
		マス部材	大断面（1m×1m×0.5m）。2面を合板型枠，他面を断熱材（厚さ0.2m）とし，試験体全体をシートで被覆した。コア採取，反発度測定の前に合板型枠を外したが，作業終了後には再度取り付けた。材齢3～91日にコア強度と反発度を測定した。
	共同溝	コアを採取できないため，管理用供試体（材齢28日，標準水中養生）で評価した。テストハンマー検査が28日よりも遅延したため，事前に確認した材齢と圧縮強度の関係により，反発度を測定した材齢の圧縮強度に補正した。	

6. まとめ

本研究では，筆者らが提案した反発度と圧縮強度の関係を表す理論式を検査・点検の実務に適用することを目的とし，理論式に含まれる各係数に及ぼす諸要因とその影響の度合いを確認した。検討の結果，各係数に対して骨材量，水セメント比，材齢およびセメントの種類の影響を考慮すれば，理論式で求めた推定強度は室内実験の試験値とよく適合することがわかった。また，各係数の値を直接求めていない場合であっても，影響要因を適切に考慮すれば，圧縮強度が 120N/mm² 程度までの高強度コンクリートを用いた小型試験体や，高流動コンクリートを用いた大型部材の強度推定に対しても提案式が適用できることも確認された。

コンクリート構造物の検査・点検に対して提案式を適用し，圧縮強度を精度よく推定するためには，配合等の情報を正確に把握し，係数に対して適切な値を代入することが重要である。また，測定条件が本研究と大きく異なる場合や情報量が少ない場合には，キャリブレーション等を行う必要がある。

参考文献

1) 日本材料試験協会：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.427-430，1958.8.
2) 谷口秀明，渡辺博志，河野広隆，藤田学：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，土木学会論文集，No.767/Ⅴ-64，pp.199-210，2004.8.
3) 斯波明宏，石川伸介，渡邊聡，河上浩司：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) 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強度に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.322-327，1997.12.