

論文 テストハンマーによる人工軽量骨材コンクリートの強度推定

谷口 秀明*1・山本 泰彦*2・唐崎 彰彦*3・内田 誠二郎*4

要旨: 本研究では、テストハンマーによる人工軽量骨材コンクリートの強度推定に関して、筆者らの提案した反発度と圧縮強度の関係を表す理論式の妥当性を検討した。検討の結果、理論式に含まれる各係数の値に及ぼす要因を考慮すれば、普通コンクリートと同様に人工軽量骨材コンクリートの強度推定に提案した理論式を適用できることが確認された。また、中庸熟ポルトランドセメントを用いた人工軽量骨材コンクリートに対して 7 日間の湿潤養生を行った後、乾燥させた場合、理論式に含まれる諸係数が材齢によって大きく変化するが、それらの値を理論式に代入しても強度推定曲線はほとんど変化しないこと等がわかった。

キーワード: 反発度, 圧縮強度, 人工軽量骨材コンクリート, セメント, 材齢

1. はじめに

非(微)破壊検査の一種であるテストハンマーを用いたコンクリートの強度推定は、様々な構造物の検査および点検に用いられている。これまでの研究では、テストハンマーで測定された反発度と圧縮強度の試験値に対し、直線式等により回帰を行って求めた強度推定式が提案されてきた。しかし、いずれも回帰式であるため、その式で推定した圧縮強度は、測定条件の違いにより実際の圧縮強度と大きく異なる場合があり、圧縮強度を精度良く求められる推定方法が求められてきた。

これに対し、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状等について論理的に考察し、これに基づく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実験により確認した¹⁾。また、普通骨材を用いたコンクリート(以下、普通コンクリート)については、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、各係数に対して骨材量、水セメント比、材齢等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、各係数の値を直接求めていなくても、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がわかった²⁾。

本論文では、普通骨材コンクリートに比べてテストハンマーによる強度推定に関する研究報告が相当に少ない人工軽量骨材を用いたコンクリート(以下、軽量コンクリート)を対象とし、筆者らの提案した理論式の妥当性について検討を行った。

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められる係数である。

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

ここに、

F : 圧縮強度(N/mm²)

R : 反発度

r : プランジヤー先端の曲率半径(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(実験1)

3.1 コンクリートの条件

実験1では、軽量コンクリートに対して理論式が適用できるか判断するため、既報²⁾の普通コンクリートと同一の方法で実験を行った。

コンクリートの使用材料および配合を、それぞれ、表-1、表-2に示す。PC橋上部構造への軽量コンクリートの適用を想定し、早強ポルトランドセメントを使用した、比較的高い強度のコンクリートを中心に用いた。普通コンクリートは、既報²⁾から軽量コンクリートと同一の水セメント比の配合を抜粋したものである。

使用した人工軽量骨材は、国内で製造される一般的な構造用軽量コンクリート骨材の一つである。水セメント比は 30,40,60% とし、単位粗骨材絶対容積は一定

*1 三井住友建設(株) 技術研究所土木研究開発部主任研究員 博(工)(正会員)

*2 筑波大学名誉教授 Ph.D., 工博(正会員)

*3 三井住友建設(株) 九州支店土木部長

*4 三井住友建設(株) 技術研究所土木研究開発部主任研究員(正会員)

(0.375m³/m³)とした。軽量コンクリートの単位水量は、軽量骨材の浮上り抑制を目的として普通コンクリートよりも減じた。実験1では、軽量骨材を粗骨材のみ（軽量1種、記号：NL）、細骨材のみ（記号：LN）、粗骨材と粗骨材（軽量2種、記号：LL）に使用した場合の3種類の軽量コンクリートと普通コンクリート（記号：NN）を比較することとした。

3.2 供試体の条件

圧縮強度試験には円柱供試体（φ100mm×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³⁾に準拠）を使用した。いずれも型枠は鋼製のものである。供試体の養生は、一般的な工事条件に合わせ、湿潤養生期間を3日とし、その後は恒温恒湿室（20℃、60%）内で供試体を乾燥させた。

3.3 コンクリート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 3,7,28,91 日である。他試験も同一材齢で実施した。

(2) テストハンマー試験

使用したテストハンマーは、一般に普通コンクリートに用いられるもの（ばね式、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）である。供試体の固定方法（圧縮応力：0.74 N/mm²）、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³⁾に準じた。ただし、従来の材齢や湿潤状態に対する補正³⁾は行わないこととした。

(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 （プランジャーとコンクリートの弾性変形を荷重で除した値）、ブリネル硬度 H_B （コンクリートの塑性変形による）および計算反発度（エネルギー効率 η 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^{1),2)}と同一である。

3.4 実験結果および考察

理論式の諸係数と材齢および水セメント比の関係を、図-1～図-3に示す。図中の普通コンクリートの係数（太線）は、既報²⁾で求めた回帰線である。

(1) 単位全弾性変形 δ'_e

図-1に示すとおり、軽量骨材を使用した場合におい

表-1 使用材料（実験1）

材料の種類	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)	C
細骨材	軽量細骨材(膨張性頁岩, 絶乾密度1.6g/cm ³ , 0.5時間の吸水率12.0%)	LS
	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(容積比1:1)	NS
粗骨材	軽量粗骨材(膨張性頁岩, 造粒型, 絶乾密度1.4g/cm ³ , 0.5時間の吸水率4.7%)	LG
	葛生産砕石2005A(硬質砂岩, 密度2.65g/cm ³)	NG
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（実験1）

コンクリートの種類	目標空気量 (%)	W/C (%)	絶対容積(m ³ /m ³)				<記号> W/C: 水セメント比, Vw, Vp, Vm, Vg: 水, ベースト, 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
			Vw	Vp	Vm	Vg	
軽量コンクリート	5.0 (±0.5)*1	30	0.160	0.330	0.580	0.375	
		40		0.287			
		60		0.245			
普通コンクリート	4.5 (±0.5)*1	30	0.170	0.350			
		40		0.305			
		60		0.260			

ても、単位全弾性変形 δ'_e は材齢とともに若干増加する傾向がある。また、配合 NL は、配合 NN と同様に水セメント比が小さいほど、単位全弾性変形 δ'_e が大きな値になり、水セメント比の影響は材齢の経過とともに小さくなるが、配合 LN、配合 LL においてはその傾向は明確でない。軽量骨材を使用した場合には、いずれの配合においても、普通骨材を使用した場合よりも単位全弾性変形 δ'_e が大きく、細・粗骨材に軽量骨材を使用した配合 LL の値が最も大きいことがわかる。

(2) 比例係数 α

比例係数 α は、図-2に示すとおり、配合 NN の場合には水セメント比が60%では、材齢が短いほど、大きくなる傾向があるが、30,40%では材齢の影響をほとんど受けず、ほぼ一定となる。一方、軽量骨材を使用した場合には、配合 NL では配合 NN と同様の傾向も見られるが、水セメント比の影響は配合 NN に比べてかなり小さい。また、材齢の影響は、配合 LL では材齢とともに比例係数 α が若干の減少傾向があるが、その他の配合ではほとんど認められない。軽量コンクリートの比例係数 α は、普通コンクリートよりも小さくなる傾向がある。

3.3で述べたとおり、比例係数 α がブリネル硬度と圧縮強度の比にあり、ブリネル硬度は静的圧入試験により供試体表面をプランジャーで加圧した場合の塑性変形

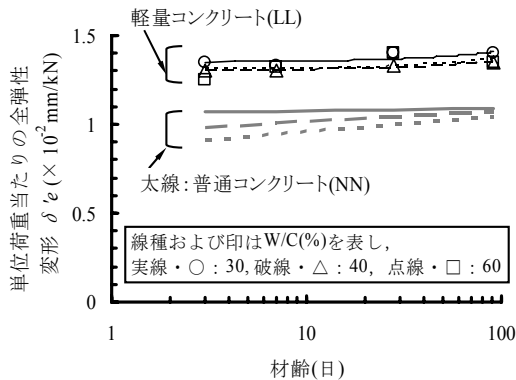
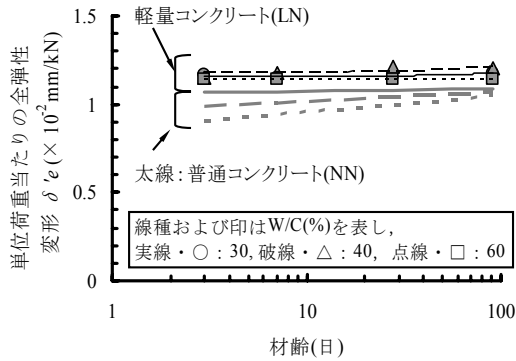
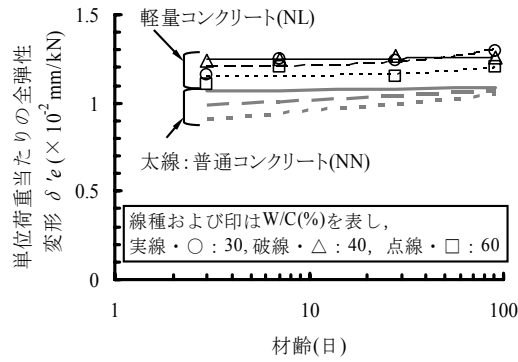


図-1 単位全弾性変形 (実験 1)

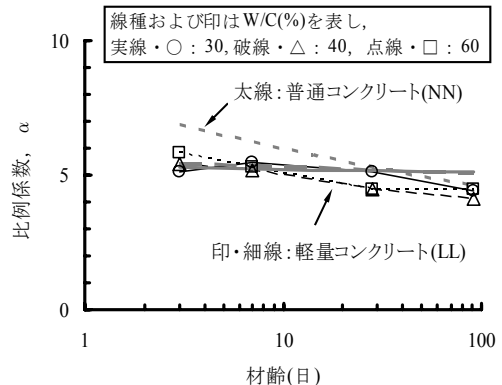
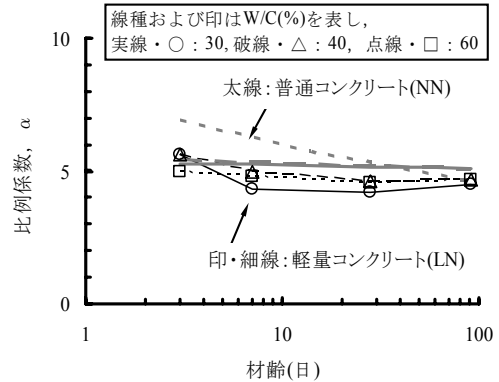
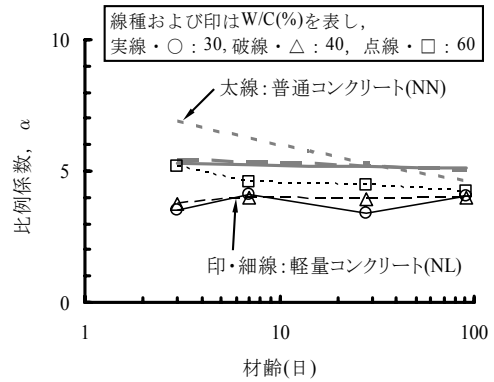


図-2 比例係数 (実験 1)

から求めている。筆者のこれまでの研究⁴⁾によれば、コンクリートの強度が小さい場合には、荷重一定の条件下では塑性変形が大きくなるが、ある程度大きくなると、内部の骨材が抵抗して塑性変形の増加を抑える働きがある。塑性変形の逆数であるブリネル硬度は、配合 NN では水セメント比が 60%以上で、材齢が短い場合に大きくなり、比例係数の増大を招くことが明らかになっている。この結果に基づけば、軽量コンクリートにおいてそれらの影響が小さいことは、骨材の強度が小さいことに起因するものと推察される。

(3) エネルギー効率 η

エネルギー効率 η は、図-3 に示すとおり、配合 NN の場合、湿潤養生を終了した材齢 3 日と乾燥を開始して経過時間が短い材齢 7 日では異なる傾向を示し、28 日以降で材齢の経過に伴って緩やかに増加する。一方、軽量

骨材を使用した場合には、配合 NL の水セメント比 30% において材齢 3 日の値がやや大きい。配合 NN のような材齢 3 日から材齢 7 日におけるエネルギー効率 η の変動はほとんど見られない。また、軽量コンクリートのエネルギー効率 η は、配合 NN に比べて初期材齢ではやや小さいが、材齢の経過に伴う増加率は大きく、材齢 28 日から 91 日で配合 NN とほぼ同程度の値に達する。

図中の η_{max} とは、使用したテストハンマーの特性から判断される理論上の最大値であり、測定上のばらつきを除き、エネルギー効率 η は、基本的にはこれ以下の値となる。材齢 91 日以降の試験値は測定していないが、いずれの軽量コンクリートにおいても、材齢 91 日を超えれば、エネルギー効率 η を最大値(0.64)として理論式に代入して推定強度を求めても推定精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

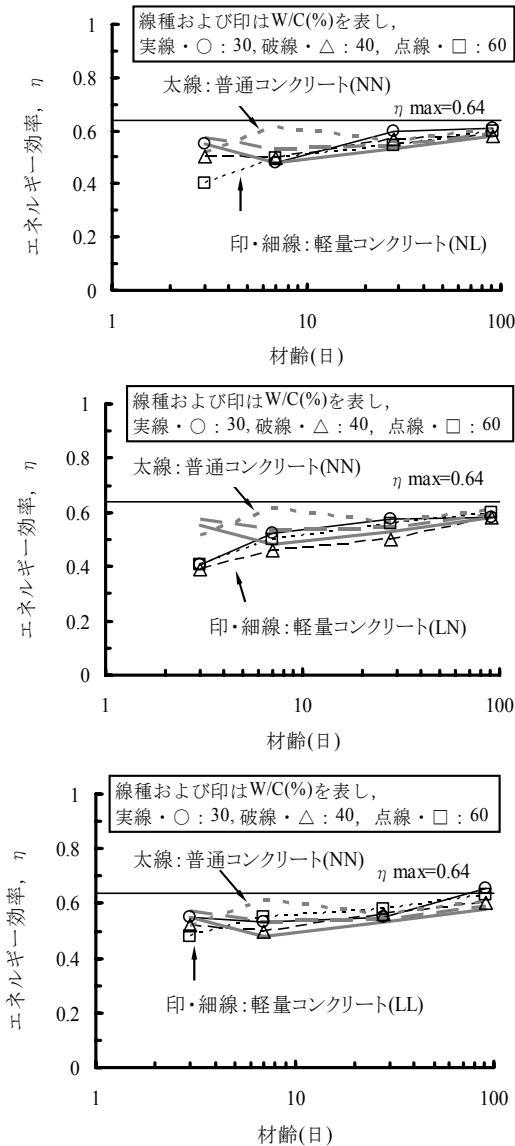


図-3 エネルギー効率 (実験 1)

(4) 代表的な材齢における各係数の値と理論式に代入した場合の推定精度

表-3は、一般に検査で対象となる材齢 28 日と 91 日における理論式に含まれる各係数の値を示したものである。それぞれの値は、水セメント比 30,40,60%の値を平均したものである。表中の値を用いて、圧縮強度の推定値と実測値を比較すると、図-4 に示すとおり、推定値は、実際の圧縮強度に対しておおよそ±0.15 倍の範囲に収まる。水セメント比ごとに求めた値を用いれば、推定精度は高まるが、実験の範囲であれば、水セメント比を考慮しなくても、普通コンクリートと同程度の精度²⁾で推定できることがわかった。

4. 実構造物の検査を目的とした実験 (実験 2)

4.1 コンクリートの条件

実験 2 では、実際の構造物 (橋脚) の検査を目的とし、

表-3 人工軽量骨材コンクリートの強度推定に用いる理論式に含まれる諸係数の値

材齢 (日)	係数	配合の種類			
		コンクリート			
		普通	軽量NL	軽量LN	軽量LL
28	$\delta'e$	1.04	1.22	1.17	1.38
	α	5.2	3.9	4.5	4.7
	η	0.55	0.57	0.55	0.56
91	$\delta'e$	1.07	1.25	1.17	1.37
	α	4.9	4.1	4.6	4.3
	η	0.59	0.60	0.59	0.63

$\delta'e$ の単位: $\times 10^2 \text{mm/kN}$

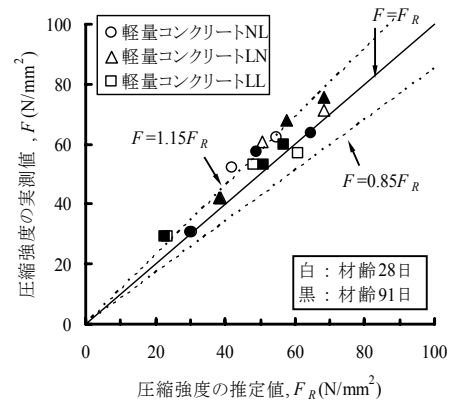


図-4 圧縮強度の推定値と実測値の関係の一例

3.と同様に小型供試体による室内実験を行って理論式に含まれる諸係数の値を求め、構造物を模擬した大型供試体に適用した場合の強度の推定精度を確認した。

使用材料および配合を、それぞれ、表-4、表-5 に示す。セメントは中庸熱ポルトランドセメントを使用した。人工軽量骨材は、国内で製造される一般的な構造用軽量コンクリート骨材の一つであるが、実験 1 とは異なる製造会社で製造された非造粒型のものである。配合は、実際の構造物に使用される軽量コンクリートに合わせ、水セメント比を 45%、単位水量を 165kg/m^3 とし、製造時の水量変動を想定して単位水量を $\pm 10 \text{kg/m}^3$ および $\pm 20 \text{kg/m}^3$ 変化させたものを加えた。

4.2 供試体の条件

室内実験で使用する小型供試体は、3.2 と同一である。ただし、実際の構造物に合わせて湿潤養生期間は 7 日とし、その後は 3.2 と同じ恒温恒湿室で乾燥させた。大型供試体は橋脚の寸法を考慮して一辺の長さを 1m とした立方体であり、室内には置けないため、屋外 (6 月~8 月) に暴露した。なお、型枠はいずれも合板型枠とした。

4.3 コンクリートの品質に関する試験

室内実験で実施した試験は、3.3 と同一である。試験材齢は 7 日、28 日、56 日および 91 日とした。大型供試体に関しては、材齢 28 日と 56 日にテストハンマー試験を行い、その近辺からコアを採取して圧縮強度を測定し

表-4 使用材料 (実験 2)

材料	種類, 物性, 成分	密度 (g/cm ³)	記号
水			W
セメント	中庸熟ポルトランドセメント	3.22	C
細骨材	球磨郡高原産陸砂, 吸水率2.36%, 粗粒率3.00	2.59	S
粗骨材	人工軽量粗骨材, 膨張頁岩系, 非造粒型, 吸水率34.0%, 粗粒率6.35	1.64	G
化学混和剤	AE減水剤, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体		WAE
	AE剤, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤		AE

表-5 配合 (実験 2)

水量の変化量 (kg/m ³)	水セメント比 W/C(%)	絶対容積(m ³ /m ³)				<記号> Vw, Vc, Vs, Vg : 水, セメント, 細骨材 および粗骨材の絶対容積
		Vw	Vc	Vs	Vg	
0	45.0	0.165	0.114	0.312	0.354	
+10	47.7	0.175		0.302		
-10	42.2	0.155		0.322		
+20	50.4	0.185		0.292		
-20	39.5	0.145		0.332		

た。コア供試体は, 供試体表面から2cm程度を除去した。

4.4. 実験結果および考察

図-5 は, 軽量コンクリートの水量の変化量と理論式に含まれる各係数の関係を表したものである。各係数の値は, 水量によって多少異なるが, おおよそ, この範囲では材齢ごとに一定と見なせる。図中に示した材齢ごとの各係数の平均値を示したものが, 表-6 である。エネルギー効率 η に関しては, 材齢の経過に伴う変化はほとんどなく, ほぼ一定である。しかし, 単位全弾性変形 $\delta'e$ および比例係数 α は, 材齢 28~56 日を境界として大きく変化している。このような現象は, 早強ポルトランドセメントを使用した実験 1 では確認されていない。

中庸熟ポルトランドセメントを用いた軽量コンクリートは, 図-6 に示すように初期強度が小さく, 標準水中養生では長期に亘って強度発現を示す性質があるが, 湿潤養生を材齢 7 日までとし, その後, 乾燥させた場合には材齢 28 日以降の強度増進が認められない。3.3 で述べたとおり, ブリネル硬度と圧縮強度の比である比例係数 α が材齢 28~56 日を境界として大きく変化するのは, 28 日以降の材齢の経過とともに分子であるブリネル硬度は増加しているにもかかわらず, 分母である圧縮強度がほとんど変化していないことに起因する。その原因としては, 圧縮強度試験とテストハンマー試験および静的圧入試験における供試体の形状寸法の相違による乾燥の影響範囲や, 圧縮強度とブリネル硬度における乾燥による品質変化の影響の度合い等に相違があることが考えられる。

表-6 に示した諸係数の値を式(1)に代入し, 反発度お

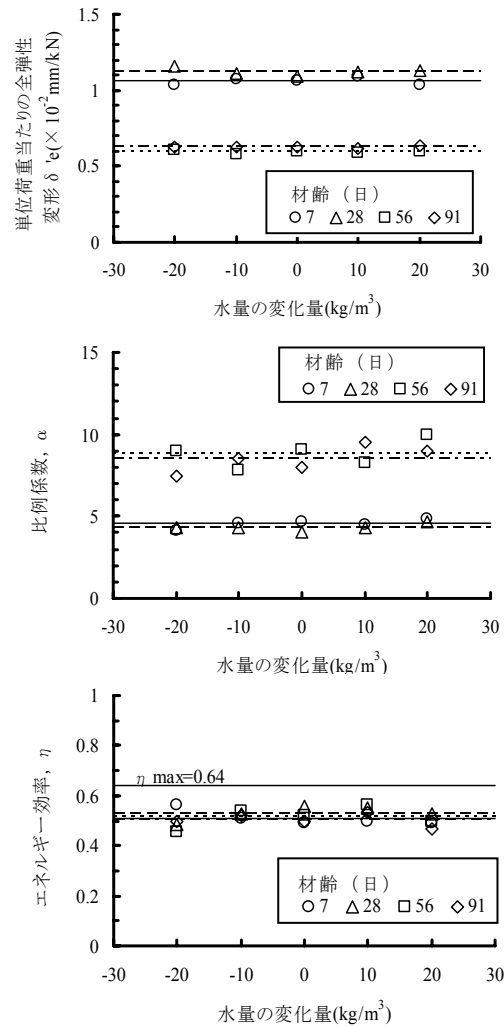


図-5 水量の変化量と理論式に含まれる諸係数の関係 (実験 2)

表-6 理論式に含まれる諸係数の値 (実験 2)

係数	材齢(日)			
	7	28	56	91
$\delta'e$ ($\times 10^2$ mm/kN)	1.06	1.12	0.59	0.63
α	4.5	4.3	8.8	8.5
η	0.51	0.53	0.51	0.50
$\alpha \cdot \delta'e$ ($\times 10^2$ mm/kN)	4.8	4.9	5.2	5.3

よび圧縮強度の推定値と圧縮強度の実測値の関係を表したものが, 図-7 および図-8 である。前述のとおり, 単位全弾性変形 $\delta'e$ および比例係数 α は材齢 28 日と 56 日を境界として大きく変化するが, 各材齢の理論式を表す曲線は大きくは異なることがわかる。比例係数 α と単位全弾性変形 $\delta'e$ は, いずれも式(1)の分母である。表-6 に示すように両者を乗じた値 $\alpha \cdot \delta'e$ は, それぞれの材齢に伴う変化をほぼ打ち消されている。換言すれば, 単位全弾性変形 $\delta'e$ の材齢に伴う変化についても, 前述の比例係数 α と同一の原因によるものと言える。し

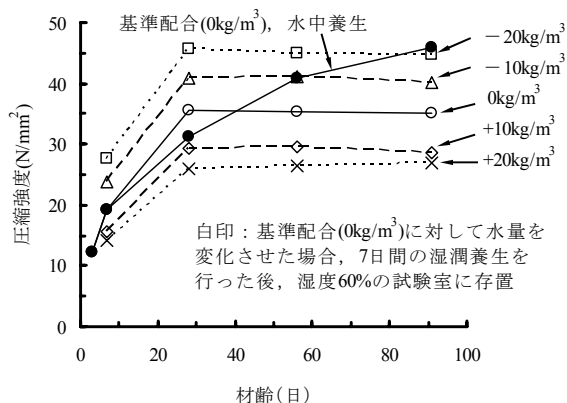


図-6 材齢と圧縮強度の関係 (実験 2)

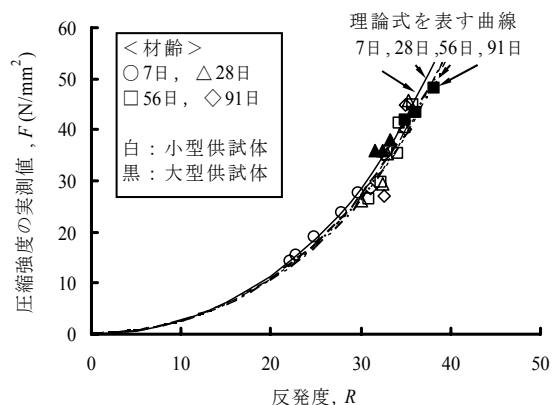


図-7 反発度と圧縮強度の実測値の関係 (実験 2)

たがって、材齢による単位全弾性変形 δ'_e および比例係数 α の変化があっても、任意の材齢における両値が確認されていれば、大きな推定誤差を生じずに圧縮強度を推定できることになる。

推定強度は、実際の圧縮強度に対して $\pm 15\%$ 程度のばらつきの範囲である。大型供試体から採取したコアの圧縮強度は、いずれも推定強度よりも大きい。これは、大型供試体の断面が大きいことや気温が高い場所で存置したことに加え、コア採取後に乾燥の影響を受けやすい表面近く部分を除去していることに起因するものと考えられる。以上の結果は、普通コンクリートの結果²⁾とおおむね一致しており、軽量コンクリートを用いた構造物に対しても、筆者らが提案した理論式を用いれば、おおむね、同程度の精度で強度を推定できる。

5. まとめ

本研究では、テストハンマーによる軽量コンクリートの強度推定に対象として、筆者らの提案した反発度と圧縮強度の関係を表す理論式の妥当性を検討した結果、実験の範囲では、以下のことが言える。

- (1) 理論式に含まれる各係数の値に及ぼす要因を考慮すれば、テストハンマーの反発度によって普通コンクリートと同様に軽量コンクリートの強度推定に提案した理論式を適用できる。また、理論式に適切な諸係数の値を代入すれば、軽量コンクリートの圧縮強度は、圧縮強度の実測値に対して ± 0.15 倍程度のばらつきの範囲内で推定できる。
- (2) 中庸熟ポルトランドセメントを用いた軽量コンクリートに対して湿潤養生を 7 日間行い、それ以降乾燥させた場合には、理論式に含まれる単位全弾性変形 δ'_e および比例係数 α が材齢 28 日と 56 日を境界として大きく変化する。ただし、それらの値を理論式に代入しても、得られる強度推定曲線は材齢によってほとんど変化しないことが確認された。

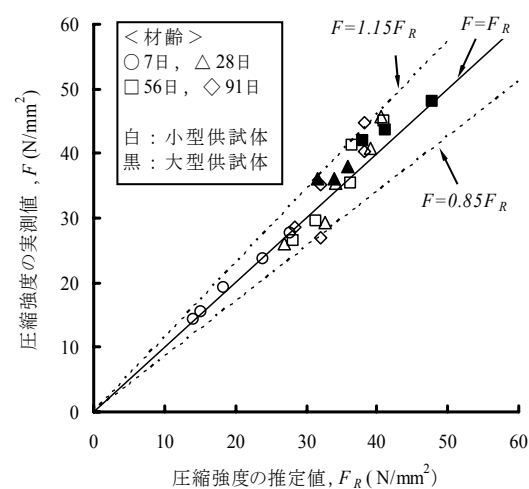


図-8 圧縮強度の推定値と圧縮強度の実測値の関係 (実験 2)

参考文献

- 1) 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
- 2) 谷口秀明, 山本泰彦: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.727-732, 2007.7
- 3) 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
- 4) 谷口秀明: テストハンマーによる構造物コンクリートの強度推定法に関する研究, 筑波大学学位論文, 2007.3