

論文 軽量骨材を用いたコンクリートのヤング係数と乾燥収縮ひずみ

清原 千鶴^{*1}・永松 静也^{*2}・佐藤 嘉昭^{*3}・上田 賢司^{*4}

要旨: 近年, 従来の軽量骨材よりも吸水率が小さく, 強度特性に優れた軽量骨材の研究開発が行われており, 軽量コンクリートの需要拡大が期待される。本論文では新たに開発された軽量骨材を用いたコンクリートのヤング係数と乾燥収縮ひずみについて, 水セメント比, 骨材容積比およびヤング係数比との関係について検討し, 構成物質の力学特性と構成比に基づく複合則理論式を用いた推定式について考察を加えた。

キーワード: 軽量コンクリート, ヤング係数, 乾燥収縮ひずみ, 複合則理論

1. はじめに

近年, 高機能化を追求した多種多様なコンクリートの研究が進んでおり, その中の1つとして軽量骨材を用いたコンクリートが挙げられる。最近では, 従来の軽量骨材より吸水率が小さく, 強度特性に優れた軽量骨材の研究開発が行われている。これにより従来の軽量骨材を用いたコンクリートと比べて耐久性および施工性が改善され, 今後, その用途範囲は拡大していくことが期待される。軽量骨材を用いたコンクリートの力学特性を定量的に評価することができれば, 構造部材の調合設計に対して有効な資料を提供できるようになるものと思われる。

そこで, 本研究では軽量骨材を粗骨材に用いたコンクリートのヤング係数および乾燥収縮ひずみと水セメント比, 骨材容積比および構成物質のヤング係数比との関係について考察し, 定量的な推定の可能性について検討した。

水セメント比を30,40,50,60%とし, それぞれに圧縮強度および乾燥収縮ひずみ試験を計画した。また, 比較のため同一の水セメント比を持つ普通コンクリートについても同様な実験を行った。

2.2 使用材料および調査

表-1 に実験に使用した軽量骨材の物理的性質を示す。軽量骨材は流紋岩(真珠岩の一種)系ガラス質微粉末を主原料とした造粒型人工軽量骨材である。表-1 に示すように軽量骨材の吸水率は24時間で3.3%と小さいことから, 骨材のプレウェッチングは行わず, 混練時に24時間吸水分を練り混ぜ水に加えた。

表-2 にコンクリートの調合および使用材料の物理的性質を示す。コンクリートのスランプおよび空気量は混和剤の添加量で調整し, それぞれ18±2cm, 4.5±0.5%の範囲とした。軽量コンクリートの空気量測定はJIS A 1128に準じて行い, 骨材補正係数2.6を用いて算出した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では, 粗骨材自体の力学特性やその量がコンクリートの力学特性に及ぼす影響について調べるため, 細骨材に天然砂を用いた軽量I種コンクリートとした。軽量コンクリートの調合は

表-1 軽量骨材の物理的性質

絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	最大寸法 (mm)	含水率 ^{*1} (%)	24h吸水率 ^{*2} (%)
0.89	0.92	0.54	61.0	15	0.17	3.3

※1 気乾状態の骨材を用いて測定を行った。

※2 絶乾状態にしたものを24h静水中に浸漬し, 表乾状態にしたものの含水率。

*1 大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

*2 大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

*3 大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博(正会員)

*4 (株)さとうベネック建築事業本部技術開発室 工博(正会員)

2.3 混練、打設および養生方法

コンクリートの混練には傾胴型ミキサを用いた。混練手順はセメント、細骨材および粗骨材を投入し60秒間空練りし、その後水ならびに混和剤を投入して90秒間練り混ぜた。供試体は全て材齢1日で脱型し、所定の材齢まで恒温恒湿室内(温度 $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%\text{RH}$)にて封緘養生とした。

2.4 実験方法

圧縮強度試験においては $\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、JIS A 1108に準拠した。ひずみの測定にはコンプレッソメータを用いた。乾燥収縮試験においては $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用い、材齢7日より乾燥を開始した。ひずみの測定にはコンタクトゲージ(標点距離20cm, 精度1/1000mm)を用いた。なお、乾燥収縮試験は全て恒温恒湿室内にて行った。

3. ヤング係数の評価

コンクリートのヤング係数に影響する因子は(1)母材の力学的性質、(2)骨材の力学的性質、(3)構成物質の比、(4)母材と骨材界面のメカニズムが挙げられる。これらの影響因子について直接測定することは非常に困難である。そこで、ここではコンクリートを母材セメントペーストと骨材からなる二相材料として取り扱い、これらの構成物質の力学特性と構成比に基づく複合則理論を修正することによって軽量コンクリートのヤング係数を評価することとした。

3.1 圧縮強度(F_c)および

ヤング係数(E_c)とセメント水比の関係

表-3に圧縮強度試験結果を示す。ヤング係数は、強度試験時にコンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い圧縮応力ひずみ曲線を求め、圧縮強度の1/3の点の割線ヤング係数として算出した。図-1にコンクリートの圧縮強度(F_c)およびヤング係数(E_c)とセメント水比(C/W)の関係を示す。両者は右上がりの関係になっており、軽量コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は同じセメント水比の普通コンクリートと比較

表-2 コンクリートの調査

	W/C (%)	S/a (%)	単位容積質量 (kg/m^3)				Ad (C \times %)	スランプ (cm)	空気量 (%)	Va
			W	C	S	G				
軽量	30	38.3	165	550	611	323	0.80	19.0	4.6	0.616
	40	43.3	165	413	740	318	0.80	19.0	4.4	0.659
	50	46.7	170	340	819	307	0.90	20.0	4.3	0.677
	60	47.5	175	292	847	307	1.20	18.5	4.3	0.688
普通	30	35.1	185	617	522	1008	0.70	18.0	3.9	0.575
	40	42.0	180	450	688	991	0.80	20.0	4.9	0.633
	50	46.0	175	350	797	975	1.2	19.0	5.0	0.669
	60	47.5	175	292	845	975	1.1	17.0	4.9	0.688

W:水, C:セメント, S/a:細骨材率, S:細骨材, G:粗骨材, Ad:混和剤
セメント:普通ポルトランドセメント(密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材:山砂(表乾密度 $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率1.68%, 粗粒率2.68)
海砂(表乾密度 $2.56\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率1.74%, 粗粒率2.66)
粗骨材:砕石(表乾比重2.7, 吸水率0.38%)
混和剤:高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)

表-3 圧縮強度試験結果一覧

	W/C (%)	単位水量 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)			ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$)		
			3日	7日	28日	3日	7日	28日
軽量	30	165	34.39	39.13	43.23	1.68	1.76	1.84
	40	165	21.53	26.28	33.02	1.42	1.49	1.63
	50	170	17.41	20.21	27.35	1.36	1.42	1.59
	60	175	14.61	18.01	24.32	1.28	1.40	1.52
普通	30	185	-	44.42	55.64	-	3.28	3.54
	40	180	-	38.70	45.94	-	3.03	3.25
	50	175	-	32.86	38.55	-	2.58	2.85
	60	175	-	19.89	24.86	-	2.27	2.52

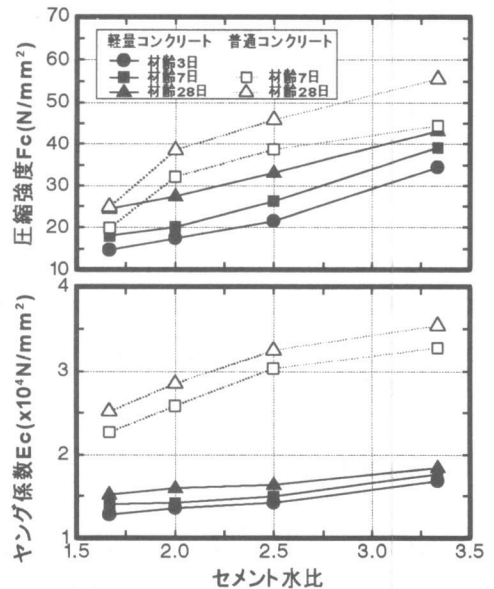


図-1 圧縮強度(F_c)およびヤング係数(E_c)とセメント水比の関係

して小さい値を示している。

3.2 圧縮強度(F_c)とヤング係数(E_c)の関係

図-2に圧縮強度(F_c)とヤング係数(E_c)の関

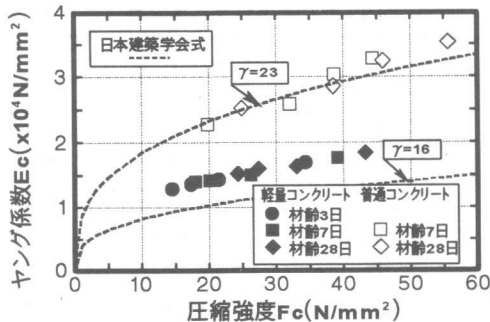


図-2 圧縮強度(F_c)とヤング係数(E_c)の関係

係を示す。図中の破線は、日本建築学会 RC 標準式 (1999 年版標準式) を示している。図より軽量コンクリートのヤング係数は同等な圧縮強度を有する普通コンクリートのヤング係数と比較して小さいことが分かる。これは、軽量骨材のヤング係数が普通骨材のヤング係数より小さいことによるものである。

3.3 複合則理論によるコンクリートの

ヤング係数の推定

複合則理論式には、Hashin-Hansen の式を修正した式(1)を用いることとした。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1-V_a)E_p + (1+V_a)(k \cdot E_a)}{(1+V_a)E_p + (1-V_a)(k \cdot E_a)} \quad (1)$$

ここに、

E_p : セメントペーストのヤング係数

E_a : 骨材のヤング係数

V_a : 骨材容積比

k : 補正係数



図-3 二相複合モデル

式(1)の適用に際しては、セメントペーストのヤング係数および骨材のヤング係数が必要となる。以下にこれらの算出方法について述べる。

3.3.1 セメントペーストのヤング係数の算出

図-4 に材齢 28 日におけるセメントペーストのヤング係数(E_p)とセメント水比の関係を示している。セメントペーストのヤング係数は既報¹⁾で求めた値である。図中の破線は式(2)で表される回帰式である。相関係数 R から対数関数である式(2)への当てはめが良好であることが分かる。そこで、本論文では E_p をセメント水比の関数である式(2)で表すこととした。

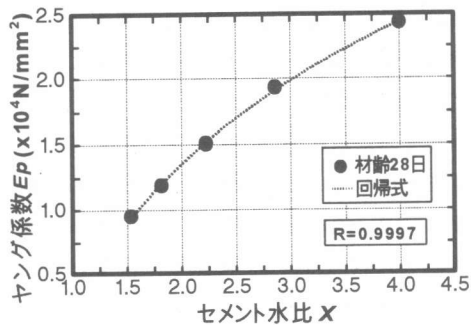


図-4 セメントペーストのヤング係数(E_p)とセメント水比(x)の関係

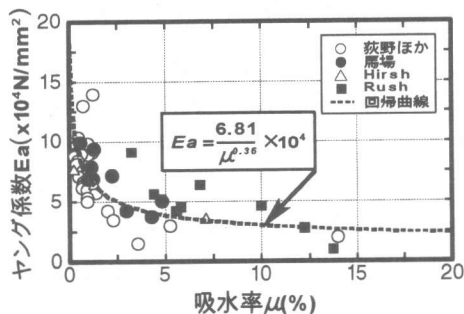


図-5 骨材のヤング係数(E_a)と吸水率(μ)の関係

$$E_p = 2680 + 36000 \cdot \log(x) \quad (2)$$

ここに、 x : セメント水比

3.3.2 骨材のヤング係数(E_a)の算出

骨材のヤング係数は、試料を成型して測定することも可能ではあるが、多種多様にある骨材の弾性係数を直接求めることは容易ではない。そこで、以下に示すようにそれぞれの骨材のヤング係数(E_a)を間接的に求めた。

(1) 普通骨材

図-5 に骨材の吸水率とヤング係数の関係を示す。両者の間に相関性があることは多くの研究者が認めており、既往の実験データ²⁾より骨材のヤング係数を式(3)に示す実験式で表わすこととした。

$$E_a = \frac{6.81}{\mu^{0.36}} \times 10^4 \quad (3)$$

ここに、 μ : 吸水率(%)

普通コンクリートの骨材のヤング係数(E_a)は、式(3)の吸水率を細骨材および粗骨材の吸水率に全骨材の絶対容積に対するそれぞれの絶対

容積比を乗じた値として求めた。算出した骨材(細骨材+粗骨材)のヤング係数を表-4に示す。

(2) 軽量骨材

本論文では球状の軽量骨材を成型加工せず強度評価を行っている原田ら³⁾の研究に基づいて軽量骨材の圧壊試験を行い、球面と平面の接触応力より式(4)を用いて軽量骨材のヤング係数を求めることとした。

$$E_a = \frac{3PE_1(1-\nu_2^2)}{\sqrt{16\delta^3 r E_1^2 - 9P^2(1-\nu_1^2)^2}} \quad (4)$$

ここに、 δ : 変位(mm), P : 荷重(N),

r : 骨材半径(mm), E_1 : 圧板の弾性係数

ν_1, ν_2 : 圧板, 骨材のポアソン比

式(4)中の $E_1=2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, $\nu_1=\nu_2=0.3$ と仮定し、 δ は測定変位(圧板間変位)から圧板自体の変位を消去したものをを用いた。圧壊強度は骨材径による影響を受けることが考えられるため、骨材径が15mm程度のもので採取して行った。圧壊試験は図-6に示すよう載荷板に骨材を挟み0.5mm/minの速さで載荷した。測定した骨材の荷重-変位曲線の一例を図-7に示す。受圧面で圧壊しているが、いずれの骨材も中心部で引張破壊を起こしていることが確認できた。表-5にヤング係数の計算結果を示す。これより使用した軽量骨材のヤング係数を $1.45 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ とした。軽量コンクリートの骨材のヤング係数(E_a)は、細骨材のヤング係数を式(4)より求め、それぞれのヤング係数にコンクリート中の細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値とした。算出した骨材(細骨材+粗骨材)のヤング係数を表-4に示す。

3.4 ヤング係数(E_c)の算出

算出したセメントペーストのヤング係数(E_p)と骨材のヤング係数(E_a)をそれぞれ式(1)に代入する。式(1)には、骨材界面に生じるマイクロクラックおよび骨材の境界層の影響に対し、見かけ上骨材のヤング係数が低下すると考えて補正係数 k を導入している。ここでは、実測値に最も一致する値として、軽量コンクリートの

表-4 骨材のヤング係数一覧

W/C (%)	普通骨材		軽量骨材		ヤング係数 (N/mm ²)	
	細骨材	粗骨材	ヤング係数 (N/mm ²)			
			細骨材	粗骨材 (軽量)		
30	1.70	0.38	72365.2	56210	14500	30475.2
40			69738.8			32560.7
50			68337.8			33978.8
60			67883.1			34312.5

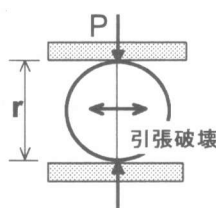


図-6 圧壊試験模式図

表-5 圧壊試験結果一覧

No.	直径 (mm)	圧壊荷重 (N)	ヤング係数 (N/mm ²)
1	15.66	1020	24451
2	14.21	1046	12770
3	15.13	1679	15834
4	15.28	1558	11165
5	14.96	1592	10462
6	14.52	942	12321
平均			14500

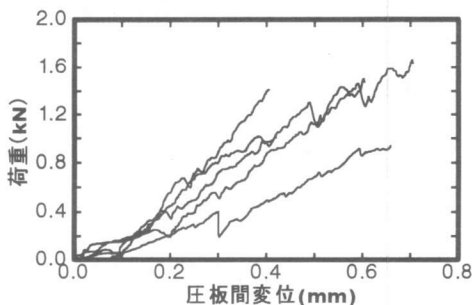


図-7 荷重-変位曲線

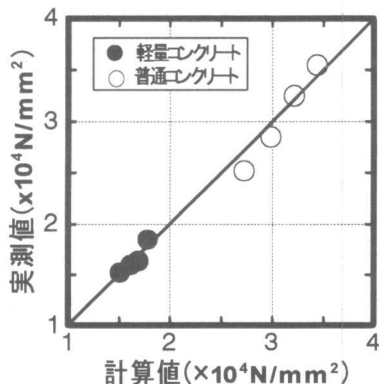


図-8 計算値と実測値の関係(補正係数k)

場合は $k=0.52$ 、普通コンクリートの場合は $k=0.65$ とした。補正係数を導入して計算した結果と実測値を比較したものを図-8に示す。ばらつきはあるものの計算値は実測値を良く表していると思われる。

4. 乾燥収縮ひずみの推定

コンクリートの乾燥収縮ひずみに影響する要因は(1)セメントペーストの収縮ひずみ、(2)構成物質の量、(3)ヤング係数比が挙げられる。ここでは軽量コンクリートの乾燥収縮ひずみとこれらの要因との関係について検討を行った。

4.1 乾燥収縮ひずみの経時変化

図-9に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を表わすには、一般的に乾燥期間 t_0 の双曲線関数が指数関数が用いられる。ここでは、 t_0 の関数式である式(6)で近似的に表わすこととした。

$$S(t_0) = \frac{S_\infty \cdot t_0}{\alpha + t_0} \quad (6)$$

ここに、 t_0 : 乾燥期間(日)、 α : 材料定数

S_∞ : 乾燥収縮ひずみの最終値

以下の考察においては、乾燥収縮ひずみの最終値(S_∞)を用いて行った。

4.2 乾燥収縮ひずみと水セメント比の関係

図-10に既往の実験結果⁴⁾より得られたセメントペーストの乾燥収縮ひずみ(S_p)と水セメント比の関係について示す。以下の考察に用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみは、実験結果より得られた式(7)より算出した値である。

$$S_p = \alpha \cdot x^\beta \quad (7)$$

$$\hat{\alpha} = 1.76 \cdot t^{0.0467} \quad \hat{\alpha} = 0.837$$

ここに、 x : 水セメント比(%), t : 乾燥開始材齢(日)

図-11にコンクリートの乾燥収縮ひずみ(S_∞)と水セメント比の関係を示す。図より軽量コンクリートの乾燥収縮ひずみは、水セメント比が同一な普通コンクリートに比べて大きな値を示しており、その傾向は水セメント比が大きくなるほど顕著に表れている。

4.3 セメントペーストの乾燥収縮ひずみ(S_p)とコンクリートの乾燥収縮ひずみ(S_∞)の関係

図-12に母材セメントペーストの乾燥収縮ひずみ(S_p)とコンクリートの乾燥収縮ひずみ(S_∞)との関係を示す。セメントペーストの乾燥収縮ひずみの増加とともに、コンクリートの乾燥収縮ひずみも増加している。コンクリートの乾

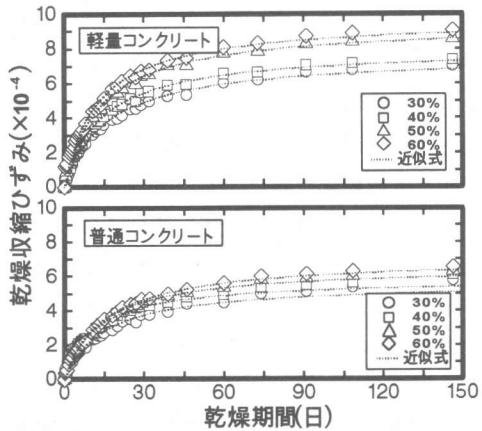


図-9 乾燥収縮ひずみの経時変化

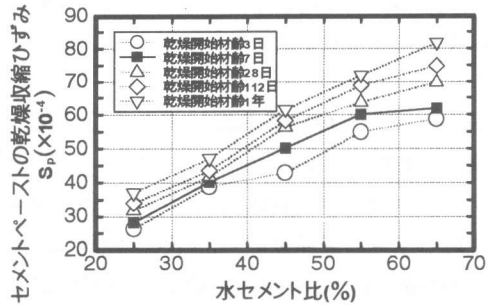


図-10 セメントペーストの乾燥収縮ひずみ(S_p)と水セメント比の関係

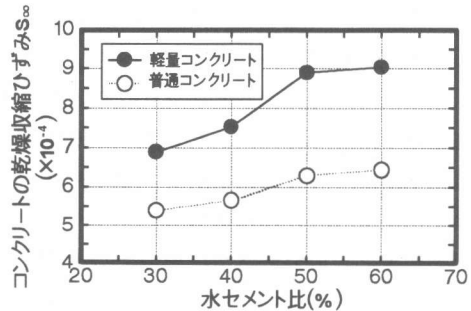


図-11 コンクリートの乾燥収縮ひずみ(S_∞)と水セメント比の関係

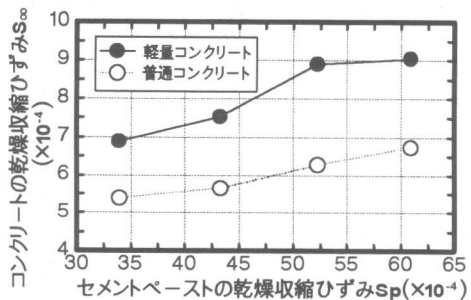


図-12 コンクリートの乾燥収縮ひずみ(S_∞)とセメントペーストの乾燥収縮ひずみ(S_p)の関係

乾燥収縮ひずみはセメントペーストに起因するが、セメントペーストの乾燥収縮ひずみとはその値が大きく異なる。また、セメントペーストの乾燥収縮ひずみが同一な場合においても、軽量コンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートに比べて大きい値を示している。これは、骨材のヤング係数が大きいほど、骨材中に圧縮応力が生じることによる力学的な乾燥収縮ひずみの抑制効果が大きいことを意味する。このことから、骨材がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響については、骨材のヤング係数(剛性)とその量(骨材容積比)の2つの面から考察していく必要があることが分かる。

4.4 ヤング係数比 (Ep/Ec) と

コンクリートの乾燥収縮ひずみ (S_c) の関係

図-13 に母材セメントペーストとコンクリートのヤング係数比 (E_p/E_c) とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を示す。 E_p/E_c の値は、それぞれ材齢 28 日における実験結果を用いた。この図からも母材に対するコンクリートのヤング係数(骨材のヤング係数)が小さいほど、乾燥収縮ひずみの抑制効果が小さいことが分かる。

4.5 乾燥収縮ひずみの算出

以上の検討結果を踏まえながら、コンクリートを母材セメントペーストと骨材の二相材料として取り扱い、乾燥収縮ひずみの推定を行う。馬場⁵⁾は乾燥収縮の複合機構モデルよりコンクリートのヤング係数を含む理論式を求めている。これを参考にして乾燥収縮ひずみの推定式を次のように構成した。

$$S_c = \alpha \cdot \left(\frac{E_p}{E_c}\right)^n \cdot V_p^m \cdot S_p \quad (8)$$

係数 α および指数 n , m は実測値に最も一致する値として求め、係数 $\alpha=0.6$, 指数 $n=0.5$, $m=1.0$ とした。これらは軽量、普通コンクリートに共通した値である。図-14 に計算した結果と実測値を比較したものを示す。これによる値にばらつきはみられるが、ほぼ計算できているものと思われる。

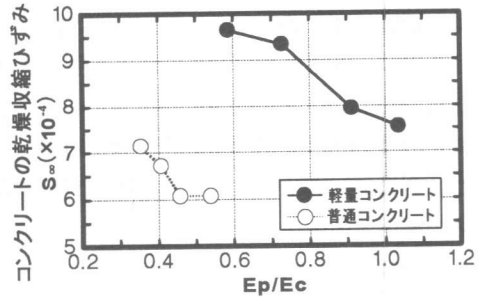


図-13 コンクリートの乾燥収縮ひずみ (S_c) とヤング係数比 (E_p/E_c) の関係

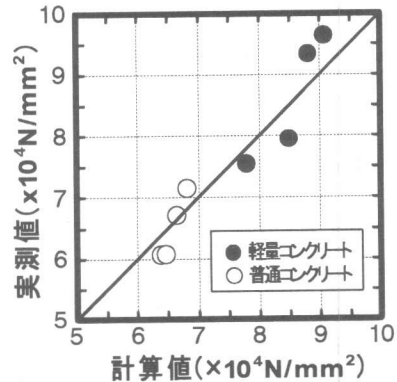


図-14 計算値と実測値の関係

5. まとめ

本論文では、軽量コンクリートのヤング係数および乾燥収縮ひずみについて、水セメント比、骨材容積比および構成物質のヤング係数比との関係について検討を行った。その結果、軽量コンクリートのヤング係数および乾燥収縮ひずみの推定式に関して構成物質の力学特性と構成比に基づく複合則理論式を修正した式 (1), 式(9) の適用の可能性を提示した。

【謝辞】

本研究費の一部は、平成 11 年度文部省科学技術研究費補助金・奨励研究 A(課題番号 11750512-00)によった。付記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 清原千鶴ほか: 複合理論によるコンクリートの各種力学特性に関する基礎的研究(その 1, その 2), 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, 1999.9
- 2) 永松静也: 骨材の性質・性能-力学的性質-, コンクリート工学 Vol.16, No.9, pp.18-24, 1978.9
- 3) 原田至克ほか: 人工軽量骨材の強度評価方法, 太平洋セメント研究報告第 136 号, pp.49-58, 1999
- 4) 清原千鶴ほか: コンクリートの力学特性に関する基礎的研究(その 1, その 2), 日本建築学会九州支部研究発表会第 37 号・1, 1999.3
- 5) 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究, 東京大学学位論文, 1975