

論文 骨材の組み合わせによる軽量コンクリートの強度および変形特性

山口 佳起^{*1}・吉武 勇^{*2}・田中 浩^{*3}・浜田 純夫^{*4}

要旨：本研究は、細・粗骨材に対して、人工軽量骨材と普通骨材を種々に組み合わせ用いたコンクリートの強度および変形特性の把握を試みたものである。その結果、全ての骨材の組み合わせパターンにおいて、プレストレス可能な強度 30MPa を材齢 1 日で確保することができた。さらに、得られた実験結果に複合則理論を適用し、各種骨材の容積比をパラメータとしたヤング係数の推定モデルを構築するとともに、4 種の推定式による評価を試みた。
 キーワード：軽量骨材コンクリート，ヤング係数，複合則理論

1. はじめに

橋梁床版の押し抜きせん断破壊現象に対して、版厚を大きくすることは有効な手段のひとつであるが、一般的な RC 床版では、その重量増加に伴う主桁等の負担が大きくなる。特に、少数主桁橋梁においては、その影響が著しいものと推察される。このような橋梁構造においては、軽量骨材コンクリートによる PC 床版の採用が有効な手段のひとつになると思われる。

ここで、軽量骨材コンクリートは、普通コンクリートに比して収縮・クリープが同等以上にみかかわらず、ヤング係数が極めて小さいことによって、クリープ係数が小さくなる特徴を有する。このことは、時系列な応力損失もさることながら、プレストレス時の応力損失が大きくなることを意味する。換言すれば、ヤング係数を向上させれば、軽量 PC 床版の設計に大きく貢献できるものと考えられる。本研究は、軽量骨材コンクリートのヤング係数特性の把握およびその向上を目的とするものである。

2. 骨材の組み合わせによるコンクリートの力学的性質

2.1. 実験目的

軽量骨材コンクリートは、一般的なコンクリ

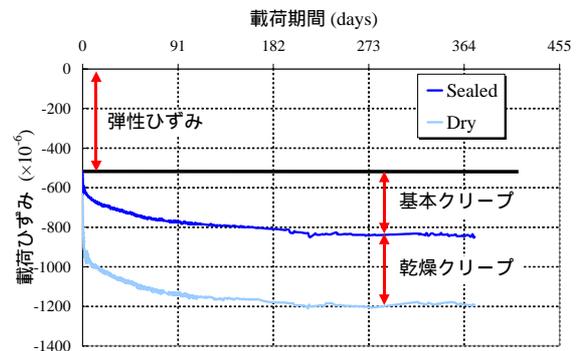


図-1 時間依存性ひずみ変化の一例

ートと同等以上のクリープひずみとなるが、これに対して、弾性ひずみが大きくなるために、結果的にクリープ係数が小さい傾向にある¹⁾。人工軽量骨材コンクリートの時間依存性のひずみ変化の一例を図-1に示す²⁾。ここで示す結果は、載荷応力 7MPa における弾性ひずみとクリープひずみを表すものであるが、乾燥・基本クリープひずみがそれぞれ約 230, 330 μ 程度に対して、載荷時の弾性ひずみが約 550 μ と大きく、載荷期間 1 年では、乾燥・基本クリープ係数がそれぞれ約 0.6 および 0.9 となり、普通コンクリートの 1.5~3.0 に対して極めて小さいことが分かった。

そこで本研究では、ヤング係数の向上を図る目的から、軽量および普通の細・粗骨材を種々

*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)
 *2 山口大学助手 工学部社会建設工学科 博士(工学) (正会員)
 *3 (株)栗本鐵工所 大阪臨海工場 (山口大学大学院 理工学研究課 博士後期課程)
 *4 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D (正会員)

に組み合わせたコンクリートを作製し、その圧縮強度およびヤング係数を求めた。

2.2. 実験方法

(1) 使用材料および配合条件

本研究で使用した材料の密度を表-1 に示す。セメントは、プレキャスト床版を対象としたことから、早強ポルトランドセメントを使用した。なお、本研究では一貫して、普通粗骨材(G_N)および普通細骨材(S_N)にそれぞれ安山岩砕石、海砂を用いた。また、軽量粗骨材(G_L)は、真珠岩系の造粒型(最大寸法：15mm)を採用し、軽量細骨材(S_L)は、膨張頁岩系のものとした。ここで軽量細骨材は、予め絶乾状態にし、吸水率分の水量を加えることで表乾状態とみなした。

表-2 にコンクリートの配合条件(目標空気量5%)を示す。細・粗骨材の各々において、容積一定条件の下、軽量骨材の置換率を0,50,100%とし、計9パターン of 供試体を作製した。ここで、GおよびSに併記する数字は、軽量骨材の置換率を表すものである。

(2) 打設方法および養生条件

コンクリートの練り混ぜは以下の手順による。

細骨材およびセメントを強制練りミキサーに投入し、60秒間空練りを行った。

水および混和剤を混ぜて再度60秒間攪拌しモルタルを作製した。

粗骨材を投入し、120秒間練り混ぜた。

供試体は全て材齢1日で脱型し、20水中養生を施した。

(3) 実験方法

本研究では、10×20cmの円柱供試体を用いて、材齢1,7日において圧縮強度試験を行った。また、圧縮強度試験と同時に、コンプレッソメータを用いて割線ヤング係数(強度の1/3応力までの関係の勾配)を求めた。

2.3. 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

骨材を組み合わせたコンクリートの、材齢1,7日における圧縮強度試験結果を図-2 に示す。本研究の全ての配合において、材齢1日で、プ

表-1 使用材料の密度

	セメントC	細骨材S		粗骨材G		混和剤Ad
		S_L	S_N	G_L	G_N	
密度 g/cm^3	3.13	1.84	2.60	0.85	2.70	1.05

: 表面乾燥飽水状態

表-2 配合条件

Case	単位体積重量 kg/m^3	単位量 kg/m^3					
		W	C	S		G	
				S_L	S_N	G_L	G_N
G100-S100	1490	160	533	500	---	294	---
G100-S50	1593			250	353		
G100-S0	1696			---	707		
G50-S100	1810			500	---	147	467
G50-S50	1913			250	353		
G50-S0	2016			---	707		
G0-S100	2130			500	---	---	934
G0-S50	2233			250	353		
G0-S0	2336			---	707		

Ad: 高性能 AE 減水剤(対セメント質量: 5~7%)

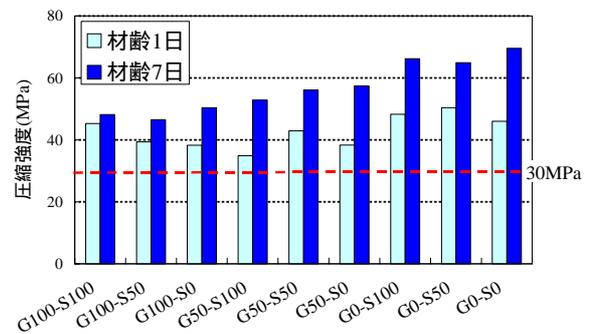


図-2 圧縮強度試験結果

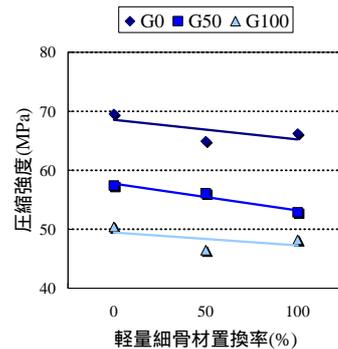


図-3 軽量骨材置換率 - 圧縮強度

レストレッシング可能な圧縮強度 30MPa を確保できた³⁾。また、材齢7日では、単位体積重量の増加に伴い、圧縮強度が増加する傾向が認められた。

ここで破壊断面の観察から、G100のコンクリートでは軽量粗骨材の明確な破壊が確認され、モルタル部のクラックと連結して破壊に至った

ものと推察された。また、G50 のコンクリートにおいても軽量粗骨材の破壊が観察されたが、普通粗骨材の破壊現象は認められなかった。また、軽量粗骨材の圧縮強度に対する影響は、軽量細骨材のそれより顕著であった。

材齢 7 日において、軽量骨材置換率の変化が、圧縮強度に与える影響を図-3 に示す。図-3 より細・粗骨材ともに軽量骨材の置換率増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向にあることが分かる。これは、軽量粗骨材の変形に応じて、モルタル部の負担応力が大きいこと、および軽量細骨材モルタルが普通細骨材モルタルに比べ圧縮強度が低いことによるものと思われる。

(2) ヤング係数試験

骨材を組み合わせたコンクリートの材齢 1, 7 日におけるヤング係数を図-4 に示す。圧縮強度と同様に、単位体積重量の増加に伴い、ヤング係数が顕著に増加する傾向にあった。これは、軽量粗骨材に比べ高剛性の普通粗骨材の置換率の割合が大きくなり、ヤング係数が増大したものと思われる。また、材齢 1, 7 日の結果を比較すると、ヤング係数に明確な差異が認められない。この結果から、コンクリートのヤング係数は、モルタルの水和度の影響は小さく、粗骨材自身の剛性の影響が大きいことが伺える。

材齢 7 日において、軽量骨材置換率の変化が、ヤング係数に与える影響を図-5 に示す。図-5 より細・粗骨材の軽量骨材置換率の増加に伴い、ヤング係数が低下する傾向が伺える。これは、あとに示す軽量粗骨材自体および軽量細骨材モルタルのヤング係数が小さいことに起因するものと考えられる。

3. 複合則理論に基づくコンクリートのヤング係数の推定と評価

3.1. 適用した複合モデルについて

(1) 既往の推定理論

多くのヤング係数推定式は、圧縮強度および単位体積重量がパラメータに含まれている。その一例として、多くの実験データを基に構築さ



図-4 ヤング係数結果

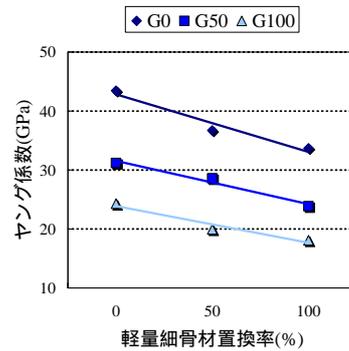


図-5 軽量骨材置換率 - ヤング係数

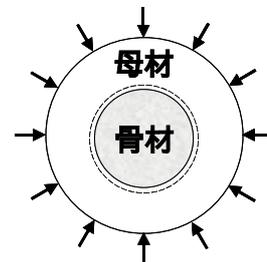


図-6 Hashin-Hansen モデル

れた日本建築学会 RC 規準式⁴⁾を式(1)に示す。

$$E_C = 2.1 \times 10^5 \cdot \left(\frac{\gamma}{2.3} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_C}{200}} \quad (1)$$

E_C : コンクリートのヤング係数推定値(kgf/cm²)

γ : コンクリートの単位体積重量(t/m³)

F_C : 圧縮強度(kgf/cm²)

次に、複合則理論の一例として Hashin-Hansen⁵⁾の提案式を式(2)に示すとともに、その概念的モデルを図-6 に示す。

$$E_C = E_m \frac{(1 - V_a)E_m + (1 + V_a)E_a}{(1 + V_a)E_m + (1 - V_a)E_a} \quad (2)$$

E_m : 母材のヤング係数, E_a : 骨材のヤング係数

V_a : 骨材容積比

複合則理論とは、コンクリートを母材(モルタルまたはセメントペースト)および骨材から構成される二相材料と捉え、母材・骨材の容積比および各々のヤング係数を用いて、コンクリートのヤング係数を推定する方法である。

さらに、川上が提案する近似複合理論式を式(3)および式(4)に示す⁶⁾。

$$E_C = E_m + k \cdot (E_a - E_m) \cdot V_a \quad (3)$$

$$k = -0.8 \cdot \log(E_a/E_m) + 1 \quad (4)$$

近似複合理論式とは、二相複合モデルであるHirsch, Counto, Hashin-Hansen モデルの弾性理論解の曲線を対象に、粗骨材含有率 0.5 以下において直線近似したものである。

(2) 提案モデル

先述のように、一般にヤング係数推定式は、圧縮強度および単位体積重量をパラメータとしたものが多い。しかし、本研究におけるコンクリートの構成材料は、各々2種類の細・粗骨材を組み合わせられており、構成材料の容積比の影響を考慮した複合則モデルで評価する必要があると考えられる。また、二相モデル(母材と骨材)で構成される既往の複合則モデルにおいては、構成材料が三つ以上の場合、複合則理論の多段階評価が用いられることとなる。このとき、ヤング係数の推定方法が複雑であり、その取り扱いも容易でないものと思われる。そこで本研究では、応力の作用方向に対して、普通・軽量細骨材によるモルタルをそれぞれ直列に、普通・軽量粗骨材を並列に配置した4要素複合モデルについて検討を試みた(図-7参照)。なお、それぞれの構成比は、コンクリート中に占める容積比をもって定義した。図-7に示すモデルに基づくヤング係数推定式を式(5)に示す。

$$E_C = 1 \left/ \left(\frac{V_{mN}}{E_{mN}} + \frac{V_{mL}}{E_{mL}} + \frac{np+n}{np+1} \times \frac{V_g}{E_{gN}} \right) \right. \quad (5)$$

$$n = E_{gN}/E_{gL}, p = V_{gN}/V_{gL}, V_g = V_{gN} + V_{gL}$$

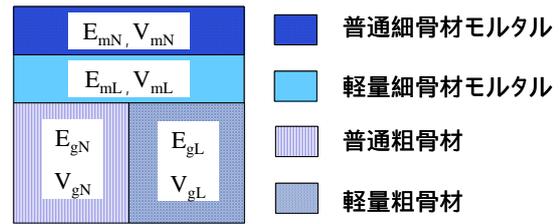


図-7 提案モデル図

表-3 付着水実験結果

W(g)	普通粗骨材			軽量粗骨材		
	骨材量(g)	付着水(g)	付着水率	骨材量(g)	付着水(g)	付着水率
251.04	1462.90	37.8	15.1%	460.54	21.96	8.7%
		26.4	10.5%		17.76	7.1%
		38.6	15.4%		17.86	7.1%
		25.8	10.3%		26.66	10.6%
	Ave.	32.15	12.8%	Ave.	20.36	8.1%
				Ave.	20.92	8.3%

表-4 モルタル配合表

Case		単位量(kg/m ³)			
粗骨材	細骨材	W	C	S _L	S _N
G100 ¹	軽量	237	863	808	0
	軽量+普通			404	571
	普通			0	1142
G0 ²	軽量	229	874	818	0
	軽量+普通			409	578
	普通			0	1156

1 : G100 コンクリート中のモルタル

2 : G0 コンクリート中のモルタル

表-5 モルタル実験結果

Case		圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
粗骨材	細骨材		
G100 ¹	軽量	36.46	21.30
	軽量+普通	68.68	31.21
	普通	59.27	32.28
G0 ²	軽量	36.75	21.99
	軽量+普通	52.94	32.89
	普通	68.59	34.38
軽量粗骨材			9.70
普通粗骨材			58.60

1 : G100 コンクリート中のモルタル

2 : G0 コンクリート中のモルタル

E : 各構成材料のヤング係数

V : 各構成材料の容積比

3.2. モデル構築のための基礎実験

(1) 実験計画

コンクリートの構成材料をモルタルと粗骨材と捉えた時、コンクリート中の水の一部は粗骨材表面に付着拘束されるとともに、残りはモル

タルの骨材構造(強度発現)の形成に大きく寄与するものと考えられる。

そこで本研究では、骨材を組み合わせたコンクリートのモデル化に要されるモルタル(軽量・普通細骨材)のヤング係数を求めるにあたり、粗骨材表面に付着する水(付着水)を考慮して表-2に示される配合のうちの、モルタル部の配合を求めた。

以下は、コンクリートの構造的構成材料として捉えられるモルタルの配合およびその力学的性質を示すものである。

(2) 付着水実験

本研究では、10×20cmの円柱供試体1本分の各粗骨材(表乾状態)を瞬間的に水中に浸し、付着水を計量した。実験結果を表-3に示す。多少のばらつきは認められるものの、平均的に軽量粗骨材で8.3%、普通粗骨材で12.8%の付着水率(重量比)を得た。

(3) モルタル配合

粗骨材への付着水を考慮した上で、軽量・普通骨材コンクリート中のモルタル配合を表-4に示す。なお、同モルタルにはセメント質量比8~10%で高性能AE減水剤を添加した。

(4) 構成材料のヤング係数

表-4に示すモルタルに対して、コンクリートと同様に、コンプレッソメータを用いて圧縮強度・ヤング係数試験を行った。材齢7日における実験結果を表-5に示す。さらに同表には、軽量・普通粗骨材自身のヤング係数も併記している。この結果より単位水量の相違に起因して、軽量粗骨材コンクリートのモルタルに比べ、普通骨材コンクリートのモルタルの方が、ヤング係数が若干大きくなる傾向にあった。

3.3. ヤング係数の推定結果

各推定式(モデル)を用いた材齢7日におけるヤング係数推定結果の平均値を表-6に示す。また、比較のために材齢7日における実験値を併記している。また、各推定理論を用いた推定結果と実験値との整合性を式(6)に示す平均誤差を用いて評価を行った。

表-6 ヤング係数推定結果(平均値)

パターン	推定値(GPa)				実験値(GPa)
	建築学会式	Hashin-Hansen	近似複合理論	4要素複合モデル	
G100-S100	17.52	16.42	16.19	15.29	18.09
G100-S50	19.02	21.60	20.74	16.65	19.94
G100-S0	21.77	22.15	21.20	18.28	24.28
G50-S100	24.56	23.64	22.61	25.08	23.86
G50-S50	27.50	31.03	29.50	28.97	28.59
G50-S0	30.10	31.89	30.29	34.30	31.18
G0-S100	35.10	30.19	30.34	28.05	33.69
G0-S50	37.32	39.97	40.00	33.02	36.71
G0-S0	41.33	41.19	41.21	40.12	43.45
平均誤差	4.45%	6.96%	6.99%	11.89%	

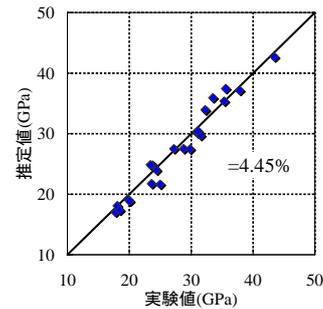


図-8 推定式の評価(建築学会推定式)

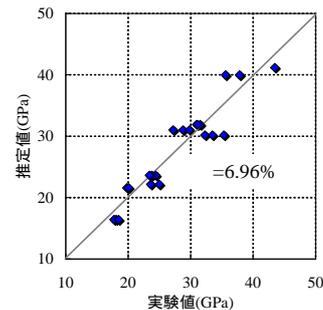


図-9 推定式の評価(Hashin-Hansen モデル)

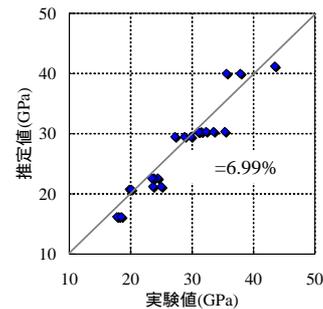


図-10 推定式の評価(近似複合理論)

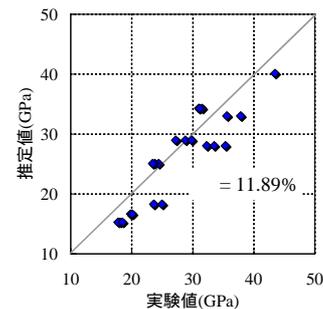


図-11 推定値の評価(4要素複合モデル)

$$= \sum_i^n \frac{|E_{C0i} - E_{Ci}|}{E_{C0i}} \times 100 \quad (6)$$

E_{C0} : コンクリートのヤング係数実験値

n : 組み合わせパターン数

: 平均誤差(%)

(1) 建築学会推定式による評価

建築学会推定式によるヤング係数の推定値と実験値の比較を図-8に示す。整合性評価の結果、平均誤差が4.45%となり、本研究で検討した推定式の中で最も精度の高いものであった。

(2) 複合則理論および近似複合理論

Hashin-Hansen モデルおよび近似複合理論による推定値と実験値の比較を図-9、図-10に示す。両推定式による整合性評価の結果、平均誤差がそれぞれ6.96%および6.99%となり、本研究で対象としたコンクリートにおいては、両者の推定精度にほぼ差異はみられなかった。

(3) 4要素複合モデルによる推定理論

4要素複合モデルによるヤング係数の推定値と実験値の比較を図-11に示す。整合性評価の結果、平均誤差は11.89%という結果となり、本研究の範囲内では最も精度の悪い結果となった。また軽量粗骨材の置換率に着目してみると、G100およびG0のコンクリートでは、推定値に若干ながら過小評価傾向にあることが認められた。これは、同モデルにおいては、モルタルは直列配置であることから、モルタル自身のヤング係数が大きく影響することとなる。ここでコンクリート構造材料として捉えた場合、モルタルには骨材との相互作用が生じることとなり、4要素複合モデルに比べ応力負担分は異なるものとなる。本研究で示したモデルでは、このような影響を十分に考慮できないため、先のような差異が生じたものと推察される。

モルタルと粗骨材の応力分担を表現できるモデルの構築が、骨材を組み合わせたコンクリートの各構成材料の容積比をパラメータとした、ヤング係数推定の高精度化に繋がるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、人工軽量骨材と普通骨材の組み合わせによるコンクリートの強度および変形特性について検討を行い、以下に示す知見を得た。

- 1) 全ての骨材の組み合わせパターンにおいて、材齢1日でプレストレスの導入が可能である30MPaが確保できた。
- 2) 軽量および普通骨材を組み合わせたコンクリートは、単位体積重量の増加に伴い、圧縮強度およびヤング係数が一律に増加傾向にあることが認められた。
- 3) 骨材を組み合わせたコンクリートにおいて、各種骨材の容積比をパラメータとしたヤング係数の推定モデルを構築した。
- 4) 建築学会推定式、Hashin-Hansenモデル式、近似複合理論式および4要素複合モデル式による推定値と実験値の比較を行い、平均誤差が各々4.45%、6.96%、6.99%、11.89%という結果を得た。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高性能軽量コンクリート委員会報告書，pp.61-64，2000.8.
- 2) 吉武 勇，田中 浩，三村陽一，浜田純夫：軽量骨材コンクリートの体積変化および鉄筋付着実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.723-732，2001.7.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(コンクリート橋編)，pp.319-327，1996.
- 4) 日本建築学会構造委員会：コンクリート構造物の剛性評価に用いるヤング係数について，建築雑誌，Vol.100，No.1241，pp.36-47，1985.12.
- 5) Z.Hashin，：The Elastic Modulus of Hetero-homogeneous Materials，*J.of App.Mech*，Vol.29，No.1，pp.143-150，1962.3.
- 6) 川上英男：コンクリートの弾性係数と複合理論の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.619-624，1999.7.