

人工軽量骨材を組み合わせた 高強度コンクリートのヤング係数の推定

山口佳起¹・吉武 勇²・田中 浩³・浜田純夫⁴

¹正会員 修(工) 錢高組 大阪支社 土木支店 土木部 (〒550-0005 大阪府大阪市西本町2-2-11)

²正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 株式会社栗本鐵工所 大阪臨海工場 鉄構事業部 (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町2-2)

⁴正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

本研究は、水セメント比 30%の高強度コンクリートを対象に、人工軽量骨材および普通骨材を種々に組み合わせた際のヤング係数の定量的評価を試みたものである。その結果、軽量骨材の容積置換に伴いヤング係数が低下し、単位容積質量に概ね比例することが示された。さらに複合則理論モデルによるヤング係数の推定を行い、軽量骨材の組み合わせコンクリートにおいても、これらのモデルに基づくヤング係数推定の妥当性が示された。

Key Words : *lightweight aggregate, Young's modules, composite structural model*

1. はじめに

人工軽量骨材コンクリート(以下、軽量コンクリート)は、一般的なコンクリートに比べ、ヤング係数が小さいことが知られている。そのため、軽量コンクリートによる構造物では、変形の増大あるいは鉄筋の応力負担の過酷化が予想される。さらに、プレテンション方式のプレストレストコンクリート(PC)とすると、普通コンクリートに比べプレストレッシング時の弾性変形に起因するプレストレス力の損失が懸念される。

本研究は、近年開発された高強度・低吸水性を有する人工軽量骨材(以下、軽量骨材)を対象に、これを用いたコンクリートのヤング係数の定量的評価を目的とするものである。特に、ヤング係数の向上を図るため、普通骨材や軽量骨材を組み合わせた低水セメント比(W/C)のコンクリートを作製し、その軽量性と圧縮強度およびヤング係数の評価を行った。

一般に、コンクリートのヤング係数を求めるにあたり、圧縮強度や単位容積質量による推定がなされている^{1),2)}。しかしながら、これらの諸物性とヤング係数は異なる物理量であり、複合則理論モデルのような各構成材料のヤング係数を取り込んだコンクリートのヤング係数の推定³⁾がより適切に評価できる手段と考えられる。そこで本研究では、軽量骨材を組み合わせた軽量コンクリートにおける複合則理論モデルの適用性について検討を行った。

2. 実験条件

(1) 使用材料および配合条件

a) 使用材料と配合の考え方

軽量骨材は、他の材料との密度差が大きく、施工時の材料分離の可能性が否めない。そこで本研究では、高性能AE減水剤(標準使用量0.01C)を併用してW/Cを30%に押さえ、モルタルの粘性を大きくすることで、軽量骨材が均一に分散するように配慮した。主に使用した軽量骨材は表-1に示すように、膨張頁岩系の細骨材(S_L)と真珠岩系(G_{LI} :最大寸法15mm)および石灰炭系(G_{LII} :同15mm)の粗骨材である。これらの軽量骨材と普通骨材(添字Nで表す)を用いて① G_{LI} - G_N :細骨材 S_N, S_L と粗骨材 G_{LI}, G_N 、および② G_{LI} - G_{LII} :細骨材 S_N と粗骨材 G_{LI}, G_{LII} の骨材組み合わせコンクリートを作製した(図-1参照)。これらは、最もコンクリートの軽量化を可能とする G_{LI} を中心とした配合であり、普通骨材に加えて、他の軽量骨材(G_{LI} より高強度だが密度大)によりヤング係数の向上ならびに軽量性の確保を試みたものである。

b) G_{LI} - G_N 組み合わせ

G_{LI} - G_N の組み合わせによるコンクリートの配合を表-2に示す。本研究では、できるだけ広範な単位容積質量を有する軽量コンクリートとすべく、軽量骨材 S_L と G_{LI} の容積置換率(以下、置換率)を0, 50, 100%として、それぞれの組み合わせで計9パターン⁴⁾の供試体を作製した。

表-1 使用材料

	セメント(C)	細骨材(S)		粗骨材(G)			混和剤(Ad)
		S _L	S _N	G _{LI} *	G _{LII} *	G _N **	
使用材料 主原料	早強ポルトランドセメント	膨張頁岩系 軽量骨材	北九州若松 産海砂	真珠岩系 軽量骨材	石炭灰系 軽量骨材	山口県宮野産 安山岩碎石	高性能 AE 減水剤
密度(g/cm ³)	3.13	1.84	2.60	0.85	1.85	2.70	1.05
吸水率(%)	—	9.80	1.19	5.0以下	3.0以下	0.64	—

*最大寸法 15mm **最大寸法 20mm

c) G_{LI}-G_{LII}組み合わせ

G_{LI}-G_{LII}を組み合わせ用いたコンクリートの配合を表-3に示す。この配合の目的は、G_{LI}に組み合わせる粗骨材の軽量化により、なるべく軽量性を保ちつつヤング係数の向上を図るところにある。この配合では、細骨材はS_Nに固定し、粗骨材G_{LI}の置換率を100,75,50,25,0%の5水準(すなわち、G_{LII}置換率：0~100%)とした供試体を作製した。

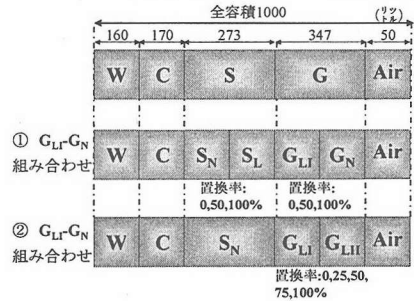


図-1 各材料の組み合わせ方法

(2) 実験方法

本研究で用いた供試体はφ10×20cmであり、材齢1, 7日において油圧式万能試験機(Max:980kN)を用いて圧縮強度試験を行った。また、JIS-A-1149に準拠して、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(以下、ヤング係数)を求めた。なお、各試験につき3本以上の円柱供試体を用い、その平均値をもって評価の対象とした。

表-2 G_{LI}-G_N組み合わせ配合表

置換率 (%)	単位容積質量 kg/m ³	単位量 kg/m ³					
		W	C	S		G	
G _{LI}	S _L			S _L	S _N	G _{LI}	G _N
100	100	1490		502	0		
	50	1593		251	354	295	0
	0	1697		0	709		
50	100	1811	160	533	502	0	
	50	1914			251	354	147
	0	2018			0	709	
0	100	2132			502	0	
	50	2235			251	354	0
	0	2339			0	709	937

3. 骨材組み合わせコンクリートの圧縮強度

(1) G_{LI}-G_N組み合わせ

S_LおよびG_{LI}置換率に伴う圧縮強度の推移を図-2に示す。材齢1日における圧縮強度は、S_Lの置換率に伴う明確な傾向は確認できなかった。また、材齢7日では、S_L置換率の増加に応じて圧縮強度の若干の低下傾向が認められるものの、強度低下は最大で5N/mm²程度であり、その影響は大きなものではないと判断される。

表-3 G_{LI}-G_{LII}組み合わせ配合表

置換率 (%)	単位容積質量 kg/m ³	単位量 kg/m ³				
		W	C	S	G	
G _{LI}	G _{LII}				G _{LI}	G _{LII}
100	0	1697			295	0
75	25	1784			221	160
50	50	1871	160	533	709	147
25	75	1957			74	481
0	100	2044			0	642

また、3本の回帰直線で表されるG_{LI}置換率の圧縮強度に対する影響をみると、材齢7日においてG_{LI}置換率が50~100%と増えるに従い、約10N/mm²ずつ低下していることが分かる。

(3) 単位容積質量と圧縮強度の相関性

(2) G_{LI}-G_{LII}組み合わせ

図-3に示すように、両材齢においてG_{LII}置換率増加に伴い圧縮強度が増進していることが分かる。これは、後述するようにG_{LI}に比べG_{LII}の剛性(ヤング係数)が大きく、モルタル部の応力負担が低減されることによるものと推察される。

G_{LI}-G_N, G_{LI}-G_{LII}を組み合わせたコンクリートの圧縮強度を、単位容積質量で整理した結果を図-4に示す。材齢1日ではばらつきが大きく、両者間の明確な相関性は認められなかった。しかしながら、材齢7日においては、軽量骨材等を組み合わせたコンクリートの圧縮強度と単位容積質量は、全体としてほぼ線形関係にあることが分かる。このことより、一定のW/Cにおける結果ではあるが、所用の軽量性と強度の大まかな推定は可能と考えられる。

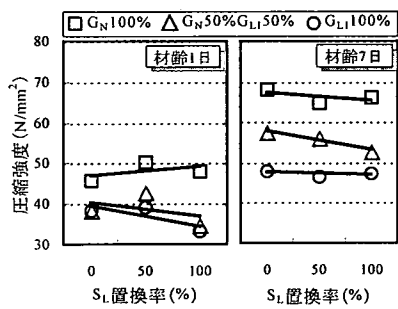


図-2 G_{LI} - G_N 組み合わせにおける平均圧縮強度

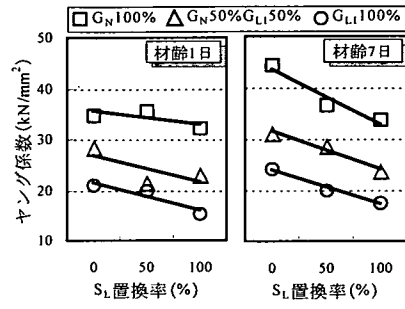


図-5 G_{LI} - G_N 組み合わせにおける平均ヤング係数

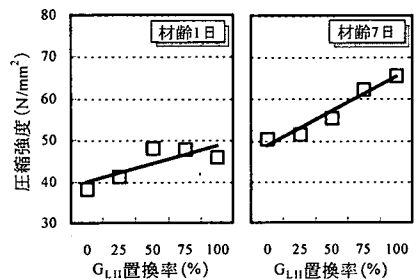


図-3 G_{LI} - G_{LII} 組み合わせにおける平均圧縮強度

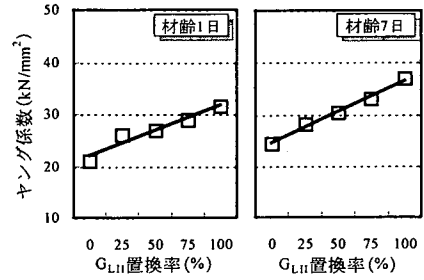


図-6 G_{LI} - G_{LII} 組み合わせにおける平均ヤング係数

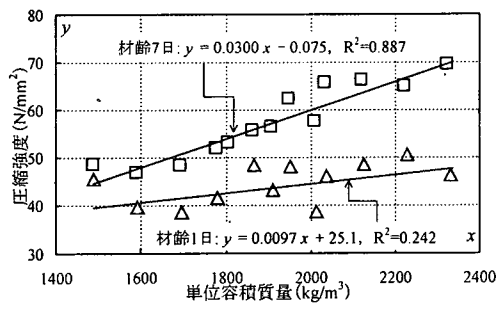


図-4 単位容積質量-平均圧縮強度

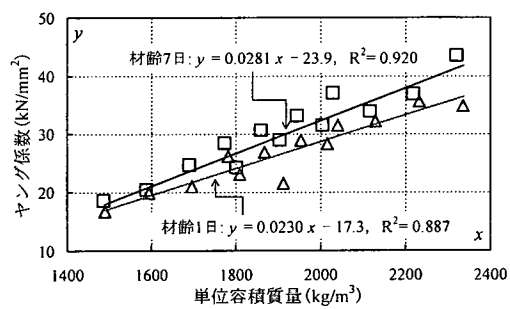


図-7 単位容積質量-平均ヤング係数

4. 骨材組み合わせコンクリートのヤング係数

(1) G_{LI} - G_N 組み合わせ

G_{LI} - G_N 組み合わせ時の S_L 置換率に伴うヤング係数の推移を図-5に示す。 G_N 置換率100%の結果において、材齢1日では緩やかな回帰直線の傾きが、材齢7日では急なものとなっている。 $G_{LI}50\%$ および 100% においても、若干そのような傾向が認められるが、著しいものではない。

また、圧縮強度の場合と同様に、 G_{LI} の置換率増加 (0→50→100%) に伴い、ヤング係数が5~10kN/mm² ずつ低下していることが分かる。この結果は、骨材自身のヤング係数に依存するところが大きいものと推察される。

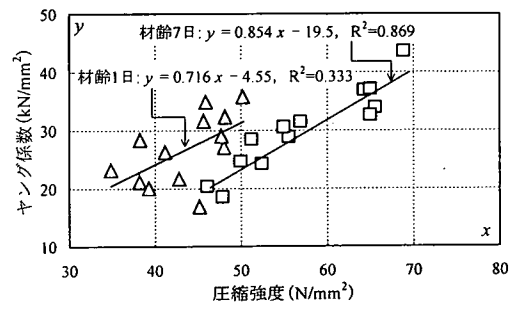


図-8 平均圧縮強度-平均ヤング係数

(2) G_{LI} - G_{LII} 組み合わせ

G_{LII} 置換率に伴うヤング係数の推移を図-6に示す。図-6より、 G_{LII} 置換率の増加に伴い線形的に大きくなり、その範囲も材齢1日で20~30kN/mm²以上、材齢7

日で25~35kN/mm²以上に及んでいる。

(3) 単位容積質量・圧縮強度とヤング係数の相関性

単位容積質量に伴うヤング係数を図-7に示す。この結果より、材齢ごとの相違は小さく、また単位容積質量に対して、圧縮強度の場合以上に線形的な相関性が強いことが分かる。

また、圧縮強度で整理したヤング係数結果を図-8に示す。圧縮強度の増進に応じてヤング係数が大きくなっているが、そのばらつきの範囲は大きく、単位容積質量の場合ほど両者間に明確な相関性は認められないことが分かる。

5. 複合則理論モデルによるヤング係数の推定

本来、単位容積質量や圧縮強度は、ヤング係数とは異なった物理量であるが、経験的に両者間に相関性があるとして、ヤング係数の推定に用いられてきた。本研究で示した結果においても、特に単位容積質量とヤング係数に高い相関性が得られている。しかしながら、より一般的なヤング係数の推定を図るには、コンクリート構成材料のヤング係数をパラメータとしたモデルをもって推定するほうが適切と考えられる。そこで本研究では、コンクリートのヤング係数推定に、従来からよく用いられる複合則理論モデルを用い、軽量骨材を組み合わせたコンクリートにおけるヤング係数の推定評価を行った。なお、本研究で検討した複合則理論モデルは、Hashin-Hansenモデルと(修正)Hirschモデルである⁴⁾。

(1) 複合則理論モデル

a) Hashin-Hansenモデル

本研究では、複合則理論モデルの中でも最も推定精度の高いとされるHashin-Hansenモデル(図-9 a)参照)の適用性について検討した。同モデルによる推定式を式(1)に示す。

$$E_C = E_M \frac{(1-V_G)E_M + (1+V_G)E_G}{(1+V_G)E_M + (1-V_G)E_G} \quad (1)$$

ここでE:ヤング係数, V_G:骨材容積比, 添字C,M,Gはコンクリート, モルタルおよび粗骨材を表す。

b) 修正Hirschモデル

骨材の組み合わせコンクリートなど構成材料が3種類以上となる時、Hashin-Hansenモデルでは多段階評価(図-9 a)参照)が必要とされ繁雑となる。本研究では、軽量コンクリートのヤング係数をできるだけ

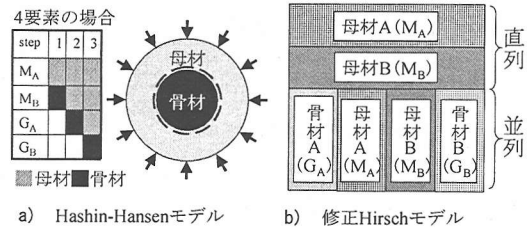


図-9 検討した複合則理論モデル

直接的に表現できるようなモデルの構築を試みた。

ここで、本研究におけるコンクリートは、細骨材がS_N&S_L, 粗骨材がG_N&G_L, あるいはG_L&G_Lの2種類ずつであるため、最大でモルタル成分および粗骨材成分がそれぞれ2要素ずつの計4要素の組み合わせとなる。このうち、本研究では一部のモルタル成分を直列に、残りのモルタル成分と粗骨材成分をそれぞれ並列に配置した簡便なモデルで評価を試みた(図-9 b)参照)。便宜上、同モデルを「修正Hirschモデル」と称す。なお、並列配置したモルタルや粗骨材成分の応力分担は、それぞれの容積比をもって定義した。修正Hirschモデルに基づく推定式は、応力(直列配置)やひずみ(並列配置)が制約条件として構築されるものであり、各要素のヤング係数を構成比率に応じて配分すると式(2)および(3)に示す形に整理される。

- G_N50,100%およびG_L25~100%の場合

$$\frac{1}{E_C} = \frac{\alpha V_{MA}}{E_{MA}} + \frac{\alpha V_{MB}}{E_{MB}} + \frac{1+p_1+p_2+p_3}{1+n_1 p_1+n_2 p_2+n_3 p_3} \times \frac{V'}{E_{GA}} \quad (2)$$

- G_L100%の場合

$$\frac{1}{E_C} = \frac{\alpha V_{MA}}{E_{MA}} + \frac{\alpha V_{MB}}{E_{MB}} + \frac{1+p'_1+p'_2+p'_3}{1+n'_1 p'_1+n'_2 p'_2+n'_3 p'_3} \times \frac{V'}{E_{GB}} \quad (3)$$

$$V' = V_{GA} + V_{GB} + (1-\alpha)(V_{MA} + V_{MB})$$

$$n_1 = E_{GB}/E_{GA}, \quad n_2 = E_{MA}/E_{GA}, \quad n_3 = E_{MB}/E_{GA}$$

$$p_1 = V_{GB}/V_{GA}, \quad p_2 = V_{MA}/V_{GA}, \quad p_3 = V_{MB}/V_{GA}$$

$$n'_1 = E_{GA}/E_{GB}, \quad n'_2 = E_{MA}/E_{GB}, \quad n'_3 = E_{MB}/E_{GB}$$

$$p'_1 = V_{GA}/V_{GB}, \quad p'_2 = V_{MA}/V_{GB}, \quad p'_3 = V_{MB}/V_{GB}$$

ここで、修正Hirschモデルではモルタル成分を並列および直列にそれぞれ配置するため、モルタル容積の成分分離が必要とされる。本研究で作製したコンクリートは、いずれもモルタルの容積がおよそ2/3を占めるため、実績率60%程度の粗骨材間に充填するモルタル(粗骨材と並列配置成分に相当)は、そのうちの半量に相当する。そこで、本研究では並列配置α=0.5(並列:直列=0.5:0.5)と仮定し、ヤング係数を求めた。なお、軽量骨材置換率0または100%の

表-4 母材配合表および実験結果

粗骨材	細骨材 置換率	単位量 kg/m ³				ヤング 係数 kN/mm ²
		W	C	S _L	S _N	
G _{LI} 100%	S _L 100%	237	863	808	0	21.30
	S _L ,S _N 50%			404	571	31.21
	S _N 100%			0	1142	32.28
G _N 100%	S _L 100%	229	874	818	0	21.99
	S _L ,S _N 50%			409	578	32.89
	S _N 100%			0	1156	34.38

表-5 推定結果 (G_{LI}-G_N 組み合わせ: 材齢 7 日)

置換率 (%)	S _L	ヤング係数 (kN/mm ²)		
		Hashin-Hansen	修正Hirsch	実験値
100	100	16.42	16.88	17.08
	50	21.60	19.95	19.94
	0	22.15	23.43	24.28
50	100	23.44	25.59	23.86
	50	30.74	29.21	28.59
	0	31.58	33.61	31.18
0	100	29.67	31.89	33.69
	50	39.18	36.30	36.71
	0	40.37	41.87	44.40

表-6 推定結果 (G_{LI}-G_{LI} 組み合わせ: 材齢 7 日)

置換率 (%)	G _{LI}	ヤング係数 (kN/mm ²)		
		Hashin-Hansen	修正Hirsch	実験値
100	0	22.15	23.43	24.28
75	25	25.82	26.86	28.12
50	50	27.85	29.99	30.28
25	75	29.82	32.87	32.91
0	100	35.37	35.51	36.86

配合に対して、 α をパラメータとしたヤング係数の逆解析を行ったところ、得られた α は 0.4~0.6 の範囲にあり、上記の仮定値 $\alpha = 0.5$ はある程度妥当な値と推察される。

(2) 複合則理論モデルにおける各種構成材料

複合則理論モデルでは、母材(モルタル)のヤング係数が必要とされる。しかしながら、コンクリートの配合から粗骨材分を取り除き、モルタルを作製すると、水分過多で材料分離が生じやすく、コンクリート中におけるモルタルの挙動と異なることが予想される。そこで本研究では、コンクリート中の水の働きを、水和反応に寄与する部分および粗骨材表面に付着拘束される部分(付着水)に仮定し、微量ではあるが付着水を取り除いたモルタル供試体(φ10×20cm)を作製した⁵⁾。モルタルの配合およびヤング係数を表-4に示す。

なお本研究では、既往の研究^{6)~9)}に基づいて安山岩砕石である普通骨材G_Nのヤング係数55.1kN/mm²、および真珠岩系の軽量骨材G_{LI}のヤング係数9.7kN/mm²を引用した。また、G_{LI}のヤング係数は、川上の手法⁷⁾に基づき、G_{LI}100%のコンクリートに対

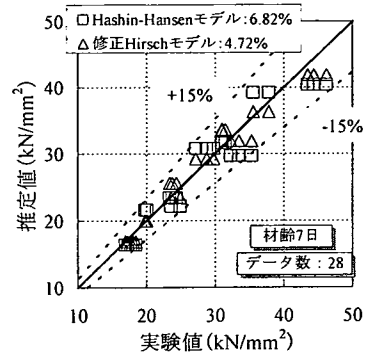


図-10 ヤング係数実験値と推定値 (G_{LI}-G_N 組み合わせ)

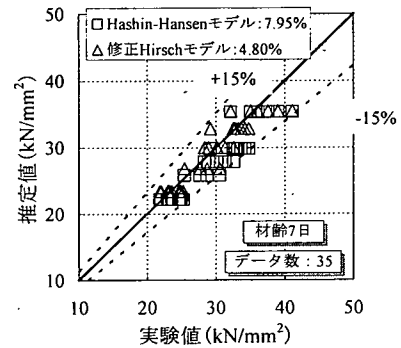


図-11 ヤング係数実験値と推定値 (G_{LI}-G_{LI} 組み合わせ)

する Hashin-Hansen モデルの適用逆解析から 42.1kN/mm²とした。

(3) 各モデルの推定精度の評価

G_{LI}-G_NおよびG_{LI}-G_{LI}の組み合わせコンクリートのヤング係数推定値(材齢7日)を各々表-5、表-6に示す。また、材齢7日での各組み合わせコンクリートにおける全てのヤング係数実験値と Hashin-Hansen モデルおよび修正 Hirsch モデルによる推定値の比較を図-10、図-11に示す。なお、凡例中に示す数字(%)は平均誤差を表している。

ここで示す結果より、Hashin-Hansenモデルおよび修正 Hirsch モデルによるヤング係数推定値は、ほぼ $y=x$ ライン近傍にあり、比較的良好な整合性を示していることが分かる。特に図-10の結果から、ヤング係数が 16~42kN/mm² と広範囲に及ぶ組み合わせコンクリートにおいても、両モデルにより推定値の誤差は最大でも ±15% 以内に収まっている。さらに、実験値と推定値の差異は何らかの傾向を示すものでなく、概ね均等にばらつく程度のものであり、ヤング係数の実験値そのもののばらつきも考慮すれば、本研究で採用した両モデルの妥当性が窺われる。

ここで、Hashin-Hansenモデルおよび修正 Hirschモ

デルによる推定値を比較すると、前者は平均誤差6.82~7.95%のばらつきを有するのに対し、後者では同4.72~4.80%と5%以下となる推定精度を有していることが分かる。これらの推定精度は、W/C=30%と限られた配合の軽量骨材組み合わせコンクリートにおけるものであるが、複合則理論モデルの構成から鑑みれば、本研究で示した修正Hirschモデルによって、概ね妥当なヤング係数を推定することが可能と考えられる。

6. 結論

本研究は、高強度・低吸水性の人工軽量骨材を中心として、普通骨材や異なる軽量骨材を組み合わせたコンクリートのヤング係数評価を試みたものである。さらに複合則理論モデルを適用し、普通骨材や異なる軽量骨材を組み合わせた軽量骨材コンクリートのヤング係数の推定評価を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する。

- ① 骨材を組み合わせたコンクリートの圧縮強度は、軽量骨材の容積置換率増加に伴い低下する傾向にあった。
- ② ヤング係数は、圧縮強度と単位容積質量の増加に応じて大きくなる傾向にあり、特に単位容積質量に対して線形の相関性が認められた。
- ③ Hashin-Hansenモデルおよび修正Hirschモデルによるヤング係数の推定を行ったところ、両モデルによる評価の推定誤差は±15%以内に収まった。特に、修正Hirschモデルでは平均誤差が5%以下であり、ヤング係数推定の妥当性が窺えた。

本研究で示した結果は、ある力学特性(圧縮強度やヤング係数)を満足する配合のうち、最も軽量となるコンクリートを得るための一指標になるものと考え

られる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準仕方書(構造性能照査編)，p.28，2002.3.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・解説，丸善，1991.
- 3) 川上英男：コンクリートの弾性係数と近似複合理論，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.497-500，1995.6.
- 4) 川村満紀，Chatterji, S.K.：コンクリートの材料科学，森北出版，pp.94-109，2002.9.
- 5) 山口佳起，吉武 勇，田中 浩，浜田純夫：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.87-92，2002.6.
- 6) 川上英男：砕石コンクリートの弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.303-308，2002.6.
- 7) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と境界層の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.529-534；2000.6.
- 8) 川上英男：コンクリート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.619-624，1999.6.
- 9) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，上田賢司：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.523-528，2000.6.

(2002. 12. 12 受付)

ON THE YOUNG'S MODULES OF HIGH STRENGTH CONCRETE WITH MIXED VARIOUS LIGHTWEIGHT AGGREGATES

Yoshiki YAMAGUCHI, Isamu YOSHITAKE, Hiroshi TANAKA and Sumio HAMADA

The purpose of the present study is to obtain the higher Young's modulus of lightweight concrete by mixing various aggregates. Two different mixes of concrete were here in tested. The test results indicate that the Young's modules were almost proportional to the weight of concrete. In addition, composite structural models applied to determine the Young's modules of lightweight concrete with various aggregates, and applicability of the models was confirmed in the present study