

論文 コンクリートの弾性係数と粗骨材の見かけの弾性係数

川上 英男*1

要旨: 前報ではコンクリートの弾性係数をその各素材の弾性係数と含有量から複合理論を用いて評価する場合、問題点となっている骨材の弾性係数測定と骨材境界層の影響を一挙に解決する方法として粒状骨材の見かけの弾性係数を用いる方法について検討した。本論ではその検討対象を拡大して、その見かけの弾性係数の特徴と境界層の影響のより一般的な傾向を明らかにした。またそれら川砂利の平均的な見かけの弾性係数を用いて、境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響について再評価を行った結果、細骨材よりも粗骨材の方が大きいことを見出した。

キーワード: コンクリート, モルタル, 複合理論, 粗骨材, 境界層, 見かけの骨材弾性係数

1. まえがき

1.1 背景

コンクリートは多質の材料で構成されている。したがってその複雑な構成体から成るコンクリートは不完全弾性体であって、その圧縮強度や弾性係数（以下圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数; Secant Modulusをいう）に対してもそれらの構成体並びにそれらの境界層がそれぞれ影響を及ぼしている。

コンクリートの弾性係数について日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」ではコンクリートの設計基準強度を主な指標とし、気乾単位容積質量、骨材岩種及び混和材を参考とする関係式を示している¹⁾。

一方、母材と骨材から成る2相複合体に対し各素材の含有量と弾性係数に基づいて複合体の弾性係数を理論的に評価する方法がある^{例えば 2)}。

先に筆者はコンクリートの実験結果を検討の上その弾性係数と圧縮強度は物理的には本来直接的な関係は認められないこと、複合理論によるコンクリートの弾性係数評価法が圧縮強度を指標とする評価法よりコンクリートの物理的現象に忠実であることを報告した^{12, 13)}。

1.2 複合理論によるコンクリートの弾性係数評価

複合理論としては複合構造モデルの中で最も精緻とされる Hashin-Hansen の提案式(1)²⁾を用いる。

$$E_c = E_m \frac{[V_m E_m + (1 + V_a) E_a]}{[(1 + V_a) E_m + V_m E_a]} \quad (1)$$

E_c, E_m, E_a : 複合体, 母材, 骨材の弾性係数

V_m, V_a : 母材, 骨材の体積含有率,

$$(V_m + V_a = 1)$$

さらにこの複合理論を適用するに当たって、コンクリートの構成素材をセメントペースト、細骨材及び粗骨材

の3種と見なした。その理由の一つは両者の表面境界層がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響が異なることを見出したからである³⁾。ここに2相材料を対象とする複合理論を3相の材料に展開する必要に対して筆者はその2段階適用を検討している⁴⁾。

しかしコンクリートの弾性係数実験値はこのようにして得られる計算値より低下する傾向がある。この現象に対し筆者は補正係数(J)を乗ずる方法を取り入れてきた。J値は次頁 図-1⁵⁾に示すようにC/Wの減少につれて低下し、C/W = 1.54ではC/W = 3.0の場合に対し10~15%程度の減少を示す。

1.3 粗骨材粒状体の弾性係数測定

もう一つの問題点は骨材の弾性係数評価である。

天然岩石を母岩とする骨材では母岩から採取したコアの圧縮試験時の歪測定から弾性係数を求める方法では測定結果にバラツキがあるので数多くの測定から平均値を求めることが必要となる⁶⁾。

また川砂利・海砂利・山砂利のように数種の母岩が混在する場合にはそれぞれの母岩コアの圧縮試験が必要になる上、岩種の体積構成比に合わせて全体の弾性係数を評価することになる。

さらに人工焼成骨材は多孔質な内部と硬質外殻から成るのでその弾性係数測定は一層複雑である。

これらの問題点を一挙に解決する方法として、コンクリートとそのモルタル母材の弾性係数計測結果を用いて、複合理論式(1)を書き換えた式(2)により粗骨材の弾性係数を逆解析する方法を考えた。この方法によって得られた弾性係数は間接的に求めたものである以下“見掛けの弾性係数(pEa)”と呼び、母岩より直接求めた弾性係数(Ea)と区別する。すなわち式(2)では式(1)のEaをpEaと置き換えてある。

*1 福井大学名誉教授・福井工業大学名誉教授 工博 (正会員)

$$pEa = Em \frac{[Vm Em - (1+Va) Ec]}{[Vm Ec - (1+Va) Em]} \quad (2)$$

上記の方法によってあらゆる粒状骨材の弾性係数評価が可能となった。しかもこの値には境界層の影響を包含していると見なされるので、式(1)によって算定した弾性係数値に対して境界層の影響を考慮した補正を行う必要がないと見なされる⁶⁾。

2. 本論の目的

前報⁷⁾では1シリーズの限られた実験結果から考察を試み、コンクリートの弾性係数評価例を示し、併せて粗骨材と細骨材それぞれの境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響を論じた。

本論ではより広範囲の実験結果を参考に、粗骨材の見かけの弾性係数を算定し、その全般的な特徴を把握することを意図した。すなわちセメント水比、粗骨材含有率、コンクリート及びモルタルの弾性係数の資料が揃った実験例について粗骨材の見かけの弾性係数(pEa)を式(2)によって求め、骨材の種類・粒度・含有率との関係を検討する。また川砂利の代表的な見かけの弾性係数(pEg)を用いて細骨材・粗骨材境界層の影響について検討をやり直す。なお細骨材の見かけの弾性係数については追加資料が手元に見つからないので前報そのままとしておく。

3. 粗骨材の見かけの弾性係数 (pEa)

3.1 セメント水比の影響

6シリーズの川砂利コンクリート実験結果の中から、比較のため材齢が28日、砂利含有率が実用に近い範囲(0.4~0.5)を取り上げた。各シリーズの調査と砂利粒度を表-1に示す。砂利の見かけの弾性係数(pEg)を算定した結果を表-2に示す。モルタル及びコンクリートの弾性係数実験値(Em, Ec)はそれぞれ試験体3本の平均値である。

図-2にセメント水比とpEgの関係を白抜き○印で示す。C/Wが小さくなるにつれてpEgの値は小さくなり、C/W=3 対して C/W= 1.67 (W/C=0.6) では約0.8~0.5倍に低下している。データに散らばりがあるが回帰式を求め図の中に表示した。

なお図中の塗りつぶし●印は前報⁷⁾に示したデータである。C/Wの低下に対するpEgの変化が少なく、境界層の影響が極めて少ない事例となっている。今回整理した例からかなり偏った値を示しているのは、恐らく試験体作製時の条件によるものと思われる。すなわちミキサが他の例のアイリッヒ型と違ってオムニミキサを用いた

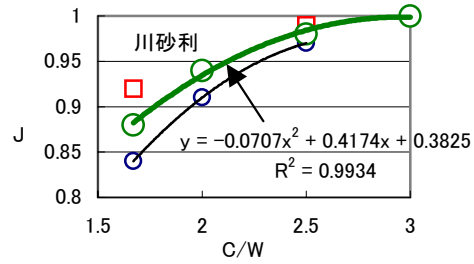


図-1 補正係数 (J) とセメント水比

表-1 調査と砂利粒度

シリーズ No.	セメント：川砂 (絶対容積比)	砂利粒度
		(mm)
1	1 : 1~1.7	10~20
2	1 : 1.5	5~25*
3	1 : 1.5	5~25*
4	1 : 2	5~25**
5	1 : 2	5~25***
6	1 : 2.3, 2.98	5~20
* 5~10, 10~15, 15~20, 20~25 2 : 3 : 1.5 : 3.5		
** 5~10 : 20~25 = 2 : 1		
*** 5~10 : 20~25 = 1 : 2		

表-2 川砂利の見かけの弾性係数 (pEg) 算定値

シリーズ No.	W/C	C/W	Vg	Em (GPa)	Ec (GPa)	pEg (GPa)	引用文献
1	0.325	3.08	0.45	28.8	36.5	49.1	8)
	0.465	2.15	0.45	24.7	32.8	47.3	
2	0.4	2.5	0.4	24.1	29.8	41.4	5)
	0.5	2.0	0.4	19.8	25.7	38.7	
	0.6	1.67	0.4	17.9	22.1	30.7	
3	0.5	2.0	0.4	19.9	25.6	37.9	5)
	0.6	1.67	0.4	19.2	21.4	25.1	
4	0.5	2.0	0.45	25.1	31.3	41.2	5)
	0.5	2.0	0.5	25.1	32.0	41.2	
5	0.5	2.0	0.45	25.1	30.8	39.7	5)
	0.5	2.0	0.5	25.1	35.2	41.7	
6	0.4	2.5	0.4	29.3	35.8	48.8	5)
	0.6	1.67	0.4	25.3	30.3	40.0	

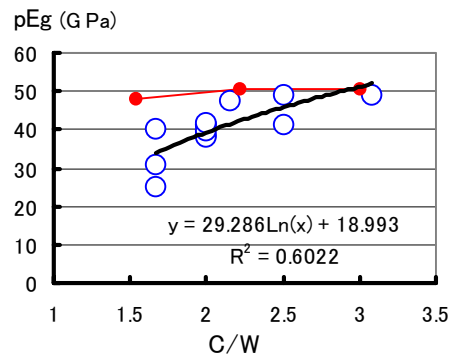


図-2 見掛けの弾性係数 (pEg) と C/W

こと、あるいは混練時間が影響したものと思われる。原因は明確ではないが、特殊な事例と見なして上記の回帰式の対象から除外してある。

3.2 砂利含有量及び粒度の影響

見かけの弾性係数 pEg はモルタルの弾性係数 (E_m)、コンクリートの弾性係数 (E_c) 及び砂利含有率から算定されるので、 C/W の他 砂含有率などモルタルの性質と砂利の粒度によって影響を受けるものと考えられる。

その特徴を実験結果⁹⁾ から検討する。すなわち水セメント比は 0.50 で一定とし、砂利の粒度は単一粒径 4 種と混合 (Blend) 1 種、含有量は $V_g=0.6$ まで 5 段階に変えた実験である。圧縮試験の材齢は 7 日である。

調査を表-3 に示す。前節同様に式 (2) を用いて見かけの弾性係数 pEg を算定した結果を表-4 に示す。モルタル及びコンクリートの弾性係数実験値 (E_m , E_c) はそれぞれ試験体 3 本の平均値である。

図-3 は砂利の粒度と pEg の関係を砂利含有量 (V_g) 別に示したものである。バラツキが大きい $V_g=0.15$ の場合を除けば単一粒径が大きいほど pEg は小さくなる傾向にある。すなわち境界層の影響が大きくなる傾向が窺われる。

また含有量 (V_g) が大きいほど単一粒径と pEg の関係は下方に位置し、境界層の影響が大きくなる傾向が認められる。

5~25mm Blend の場合を同図中央縦線の近傍に塗りつぶしマークでプロットした。 pEg の値の大きさは表-2 の材齢 28 日・ $C/W=3$ の場合の約 6 割に過ぎない。若材齢でセメントの水和が進んでいないためと考えられる。

以上、 pEg の値には C/W のみならず砂利の粒度・含有量も影響することが明らかとなった。図-2 に見られるデータの散らばりにもこういった要因が関係しているものと考えられる。実用上、粒度範囲が限定されれば散らばりは縮小すると考えられる。

4. コンクリートの弾性係数と境界層影響の考察

ここでは砂利の pEg と C/W との関係として図-2 の回帰式を採用し、図-4 の関係から以下の考察を進める。

図-4 では川砂利の見かけの弾性係数 (pEg) が C/W の減少に伴って低下する割合は前報⁷⁾ より川砂の方々に近づいている。このことから境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響も前報より異なることが考えられる。

4.1 実用調査コンクリートの弾性係数算定

まず実用調査を対象に、それらコンクリートの弾性係数 (E_c) を算定することから考察を進める。

実用調査としては日本建築学会の「コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説」¹⁰⁾ を参考とする。その付表 2 「普通ポルトランドセメントを用いる

表-3 コンクリートの調査

W/C	C/W	セメント：川砂 (絶対容積比)	川砂利含有率 (V_g)
0.5	2	1 : 2	0.15, 0.3, 0.45, 0.6
川砂利粒径 (mm) の種類 : 5 種 5~10, 10~15, 15~20, 20~25, Blend 5~25			

表-4 コンクリートの実験結果と pEg の算定

粒径 (mm)	E_m (GPa)	V_g	E_c (GPa)	pEg (GPa)
5~10	18.3	0.15	18.3	18.3
		0.3	22.3	36.2
		0.45	23.5	32.3
		0.6	24.6	30.2
10~15	16.3	0.15	18.2	35.2
		0.3	20.1	33.7
		0.45	21.4	30.3
		0.6	21.1	25.2
15~20	17.3	0.15	17.8	20.9
		0.3	21.7	38.2
		0.45	21.9	29.5
		0.6	20.2	22.4
20~25	18.0	0.15	19.8	34.7
		0.3	20.0	25.7
		0.45	18.7	19.6
		0.6	17.2	16.7
等量混合 Blend 5~25	19.1	0.15	18.7	16.6
		0.3	21.5	28.5
		0.45	24.3	33.0
		0.6	24.4	28.8

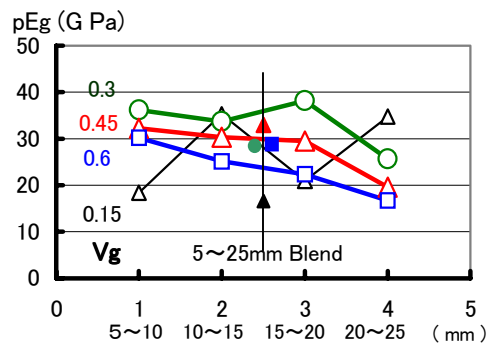


図-3 砂利含有量・粒度と pEg

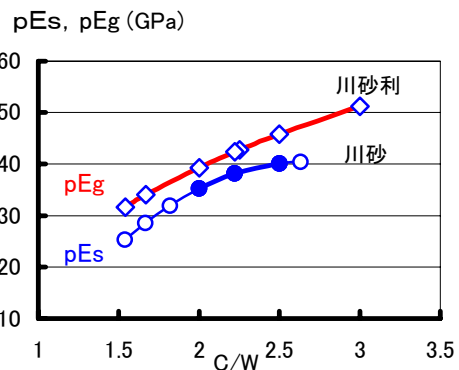


図-4 砂利・砂の見かけの弾性係数と C/W

砂・砂利コンクリートの参考調合表（その 2），砂の粗粒率 2.8 (2.5mm)，砂利の最大寸法 25mm」の調合を対象とする。なおここで pEs の実験値が得られている C/W の範囲は 2.5~2.0 である。以下の考察では対象をこの範囲に限定する。それらの絶対容積調合を表-5 に掲げる。

ここにそれぞれの水セメント比に対応して採用したセメントペーストの弾性係数 (Ep) ¹¹⁾ と図-4 から得られる砂・砂利の見かけの弾性係数 (pEs, pEg) を表-6 に示す。

算定には式 (1) を用いて、先ず Ep と pEs からモルタルの弾性係数 (Em') を、次いで Em' と pEg からコンクリートの弾性係数 (Ec') を求める。補正係数 (J) を乗ずることはしない。

このように算定したコンクリートの弾性係数 (Ec') を表-7 に示す。また同表には C/W = 2.5 の Ec' に対する比率 (Ec' ratio) をも示してある。

C/W と Ec' との関係を 図-5 に示す。

両者の関係はスランプに応じて差異があるものの、その傾向は良く似ている。

またセメント水比 2.5 の Ec' に対する各弾性係数の比率 (Ec' ratio) を求めてみると、表-7 右欄に示すように、スランプが異なってもその差は極めて小さい。

スランプ 15cm の場合について C/W と Ec' ratio の関係を 図-6 に示した。この関係は前掲図-1 の補正係数 (J) とセメント水比の関係と類似していると言えよう。

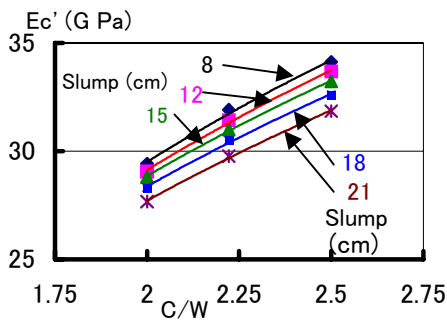


図-5 コンクリートの弾性係数 Ec' とセメント水比

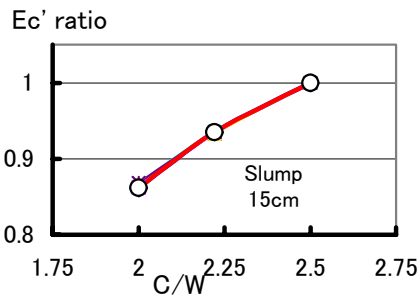


図-6 セメント水比とコンクリートの弾性係数比

表-5 参考調合表

W/C	Slump (cm)	絶対容積 (l/m ³)			
		水	セメント	砂	砂利
0.40	8	171	136	232	451
	12	182	144	213	451
	15	193	153	193	451
	18	205	163	204	418
	21	221	175	208	386
0.45	8	168	118	253	451
	12	179	126	234	451
	15	188	133	218	451
	18	199	140	233	418
	21	215	152	237	386
0.50	8	167	106	266	451
	12	176	112	251	451
	15	183	116	240	451
	18	194	123	255	418
	21	209	133	262	386

表-6 ペースト・砂・砂利の弾性係数採用値

W/C	C/W	Ep	pEs	pEg
		(G Pa)		
0.40	2.5	20.5	40.1	45.8
0.45	2.22	18.3	38.2	42.4
0.50	2.0	16.3	35.3	39.3

表-7 コンクリートの弾性係数 (Ec') 算定値

W/C	slump (cm)	C/W	Ec' (G Pa)	Ec' ratio
0.4	8	2.5	34.13	1
0.45	8	2.22	31.91	0.935
0.5	8	2	29.41	0.862
0.4	12	2.5	33.69	1
0.45	12	2.22	31.44	0.933
0.5	12	2	29.06	0.863
0.4	15	2.5	33.23	1
0.45	15	2.22	31.01	0.933
0.5	15	2	28.81	0.867
0.4	18	2.5	32.6	1
0.45	18	2.22	30.5	0.936
0.5	18	2	28.31	0.868
0.4	21	2.5	31.85	1
0.45	21	2.22	29.77	0.935
0.5	21	2	27.66	0.868

4.2 川砂・川砂利の境界層効果の特徴

C/W に対応するペーストの弾性係数 (E_p) 並びに 図-4 に示す C/W と pE_g の関係から得られる砂、砂利の見かけの弾性係数 (pE_s , pE_g) を用いてコンクリートの弾性係数 (E_c') を算定し、それらの比較から境界層の影響を検討する。

前章で E_c' の比率 (E_c' ratio) はスランプ値が異なっても殆ど同じ傾向を示すことが明らかになったことから、ここでは代表としてスランプ値 15cm を取り上げる。

比較の方法としては、C/W = 2.5 に対して C/W = 2.0 の場合、表-6 の E_p , pE_s , pE_g がそれぞれ独立に変化した場合(下記下線部)の E_c' 値を求めて、それらの影響度合いを比較する。すなわち以下のケースを取り上げる。

A : $E_p=16.3$, $pE_s=40.1$, $pE_g=45.8$

B : $E_p=16.3$, $pE_s=40.1$, $pE_g=39.3$

C : $E_p=16.3$, $pE_s=35.3$, $pE_g=45.8$

D : $E_p=16.3$, $pE_s=35.3$, $pE_g=39.3$

算定した結果を表-8 に示す。同表には C/W=2.22 について同様に算定した結果も示してある。

C/W とこれらの E_c' との関係を図-7 に示す。

図中 A はコンクリートの弾性係数に及ぼすペーストの影響を、B と A の差は砂利の影響を、C と A の差は砂の影響を表すものと考えられる。

表-8 の C/W = 2.00 について E_c' (GPa) の B~A の差 (31.61-29.64) は 1.97, C~A の差 (31.61-30.71) は 0.9 である。この例で見える限り川砂利境界層の影響は川砂境界層の影響に対して約 2 倍となっている。

ここにコンクリートの弾性係数に及ぼす境界層の影響は、前報⁷⁾とは異なって、細骨材よりも粗骨材の方が主であることを示している。

この推論は図-4 における pE_s , pE_g 両者の相対的關係による。その定量的関係はデータの蓄積によって確かめられよう。

因みに、コンクリートの圧縮強度に対しては骨材境界層の付着破壊がコンクリート破壊の起因となる場合、主なる骨材の影響は粗骨材の粒径と量であって、細骨材は殆ど影響を及ぼさないことを報告した³⁾。

5. 骨材の見かけの弾性係数評価の意義

複合理論による骨材粒状体の弾性係数評価はあらゆる骨材に適用できる汎用性がある。C/W の大きい範囲で得られる pE_a の最大値は骨材自体の値と見なされる。またそれ以下の C/W について得られた pE_a (pE_s , pE_g) は既に境界層の影響を含む値であるので、同じ C/W のコンクリートの弾性係数を求める場合に活用できる。先に述べた補正係数 (J) を乗ずる必要が無い。

コンクリートの弾性係数評価に境界層の影響を取り

表-8 C/W とコンクリートの弾性係数 E_c' (GPa)

W/C	C/W	A	B	C	D
0.40	2.50	33.22	33.22	33.22	33.22
0.45	2.22	32.52	31.48	32.24	31.21
0.50	2.00	31.61	29.64	30.71	28.81

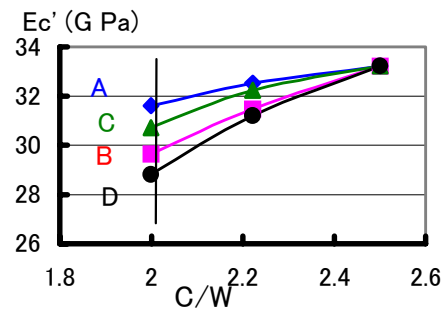


図-7 セメント水比と E_c'



図-8 見かけの骨材弾性係数と補正係数の位置付け

入れるには、複合理論値に補正係数を乗ずる方法と、本論のように母材の弾性係数と骨材の見かけの弾性係数を用いる方法がある。両者のアプローチは 図-8 に示すように、逆方向とも言える。

補正係数を用いる方法(同図右側)では係数 (J) を系統的に求める手段が得難い。母材と見かけの骨材弾性係数を用いる方法(左側)では母材と複合材両方の実験を必要とする点で手数がかかるものの、データベースの積み上げが可能である。

6. むすび

本論では母材と複合材の弾性係数測定から複合理論を用いて得られる骨材の見かけの弾性係数を対象として、骨材境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響について検討した。

本論で明らかになった点は次のようである。

- 1) 骨材の見かけの弾性係数 (pE_a) には母材と骨材両方の特性が影響する。
- 2) 川砂利の見かけの弾性係数 (pE_g) は、セメント水比が小さいほど、骨材粒径が大きいほど、骨材含有量が大きいほどその値は減少する。すなわちコンク

リートの弾性係数を減少せしめる境界層の影響が著しくなることを示している。

- 3) 川砂利コンクリートの実験資料を整理し、 pEg と C/W の一般的な関係を明らかにした。
- 4) 実用的参考調査について pEs , pEg を用いたコンクリートの弾性係数の算定例を示した。この場合には境界層の影響に対する補正係数 (J) を乗ずる必要は無い。
- 5) コンクリートの弾性係数に骨材の境界層が及ぼす影響は細骨材よりも粗骨材の方が著しい。

コンクリートの弾性係数評価に対するこの種の方法に関する研究と実験データの蓄積が進めば新しい評価法のシステムへの道が開かれることになる。

付言 本論の位置付け

コンクリートの圧縮強度を主な指標としてその弾性係数を評価する方法¹⁾は多数の実験データの統計を根拠とする経験的手法である。したがって個別のコンクリートの実測値との差が生じてもやむを得ない。また圧縮強度と弾性係数と言う性格の異なる指標を結びつける関係式の物理的根拠を示す文献は見当たらない。

一方、母材と骨材から成る2相複合体に対し各素材の含有量と弾性係数に基づく評価法²⁾は理論的には明快である。しかしコンクリートのような多相材への適用に対して、1) 複合理論の適用方法、2) 骨材の境界層の影響評価、3) 各素材の弾性係数の把握が課題である。これらに対して筆者は本論 1.2 に述べた手法を検討してきた。その特徴については参考文献^{12), 13)}に論じた。

複合理論によるコンクリートの弾性係数予測には複合理論値と補正係数を用いる方法、すなわち図-8の右側が主体である。同図左側・骨材の見かけの弾性係数を用いるプロセスではコンクリート自体の弾性係数を予測するので、その予測と言う点では全く意味がない。しかしそのデータの蓄積はこの評価方法の有力な根拠となると期待される。それは圧縮強度を指標とする評価方法¹⁾において強度・弾性係数のデータが両者の関係式の根拠となっているのと同様の意義を有している。

コンクリートの弾性係数の評価に対して、構成素材の弾性係数を指標とする体系はコンクリートの現象解明にも資する特徴を有していると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，1999
- 2) HANSEN, T.C. : Theories of multi - phase Materials applied to concrete, cement mortar and cement paste. “The Structure of Concrete,” Proceedings of an International Conference, London, Sep. 1965
- 3) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，Vol.166，pp.19-27，1969，Vol.167，pp.7-11，1970.
- 4) 川上英男：近似複合理論の多段階適用と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.19，Vol.1，pp.511-516，1997.6
- 5) 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集，Vol.22，No.2，pp.529-534，2000.6
- 6) 川上英男：複合理論による骨材の弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.111-116，2007.7
- 7) 川上英男：コンクリートの弾性係数評価についての二三の考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.345-349，2008.7
- 8) 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.497-500，1995.7
- 9) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材粒径の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No.2，pp.343-348，2001.7
- 10) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質管理指針案・同解説，1976，p.152
- 11) 川上英男：松田勝彦，熊井雄大：セメント硬化体の弾性係数について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.497-502，1994.6
- 12) 川上英男：骨材種類とコンクリートの弾性係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.359-364，2003.7
- 13) 川上英男：コンクリートの弾性係数と圧縮強度との関係についての考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No.1，pp.449-454，2006.7