

論文 セメントペースト及びモルタルの弾性係数と材齢の関係

川上 英男^{*1}

要旨: コンクリートの弾性係数が材齢によってどのように変化するかについてセメントペースト及びモルタルを対象に実験的検討を行なった。材齢につれて物性が変化するのはセメントペーストと見なされることによる。角柱・円柱試験体の超音波伝播速度より得られる動弾性係数 (E_d) 及び圧縮試験より得られる静弾性係数 (E) を最長材齢 40 週まで追跡した。その結果 E_d と E は直線的関係にあること、両者共材齢が大きくなるほどその増加は緩慢になること、 E_d と材齢との関係を材齢 4 週時の E_d に対する比率 (E_d ratio) で表すと水セメント比の大小に関わらずほぼ同一の関係を示すことが見出された。

キーワード: セメントペースト, 弾性係数, 超音波伝播速度, 材齢, モルタル, 複合理論

1. はじめに

コンクリートの弾性係数がどのようにして決まるのかについて明確な解明は見当たらない。その実用的評価法の一つはコンクリートの圧縮強度、密度あるいは骨材の岩種を参考に統計的平均値を算定するものである^{例1)}。したがって特定のコンクリートに対応する値が得られる保証はない。他の一つはコンクリートを 2 種類の素材から成る構成体とみなして、各素材の含有量と弾性係数に基づいて複合理論によって評価するものである^{例えば 2), 3)}。

先に筆者はコンクリートの実験的検討からその弾性係数と圧縮強度は本来 無関係と考えられること、そして各構成材料の弾性係数と含有量によってコンクリートの弾性係数が支配されることを示した^{4), 5)}。しかし 2 種類の材料としてセメントペーストと細・粗骨材骨材とするか、モルタルと粗骨材とするかについては未だ結論が出ているわけではない。

筆者はコンクリートをセメントペースト・細骨材・粗骨材の 3 種の構成と見なすことにした。粗骨材は細骨材に比べて格段にそのサイズが大きいこと、またそのサイズがコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を見出したからである⁶⁾。

⁷⁾。 更に加えてこれからのコンクリートでは細骨材と粗骨材それぞれに多様化が進むことを視野に入れる時、それらにも適用可能な、より汎用性の高い評価法を志向したからである。

そして先ずセメントペーストと細骨材に複合理論を用いてモルタルの弾性係数を算定し、次いでそのモルタルと粗骨材に同様に複合理論を適用してコンクリートの弾性係数を算定するという複合理論の 2 段階適用を提案した⁵⁾。ここに粗骨材境界層がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を取り入れることも可能となった⁸⁾。

さてコンクリートの力学的性質が検討されるのは通常、材齢 4 週を基本としている。材齢の変化は弾性係数にどのような影響を及ぼすのかについて検討するのが本論の目的である。

ここで上述の複合理論を適用すれば、セメントペーストの材齢と弾性係数の関係を検討することで目的が達成されると考えた。すなわち細骨材・粗骨材の弾性係数は材齢とは無関係に一定と考えられるからである。ただセメントペーストではブリーディングによる沈降の影響が考えられるので、コンクリート中に存在するセメントペーストがモルタルの状態で存在することから、モルタルの試験も併せて行なった。

^{*1} 福井工業大学 工学部建設工学科建築学専攻教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 実験計画

本論の実験では水セメント比は0.68～0.33の範囲で3水準、それぞれセメントペーストとモルタル試験体を製作する。所定の材齢において各試験体の質量(W)、超音波伝播時間(T; μ sec)を測定、これより式(1)によって動弾性係数(Ed)を算定する。

$$E_d = V^2 \times \rho \quad (\text{GPa}) \quad (1)$$

V: 超音波伝播速度 (10 × L / T ; km/sec)

L: 試験体長さ (cm), W: 試験体質量,

ρ: 密度 (W/試験体体積 ; g/cm³)

Edの算定は試験体の質量・超音波伝播時間の測定という非破壊試験によるため材齢との関係を同一試験体について継続して追跡することができるのが特徴である。ただしこのEd値は通常用いられている圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数(E)とは異なるので、さらに試験体の1部に対して圧縮試験を行なって応力度・歪度関係を記録し、割線弾性係数(E)を算定(詳細は後述)することにした。

実験1の試験体は4×4×16cmの角柱、実験2の試験体は直径5cm高さ10cmの円柱である。

2.2 使用材料

セメント: 普通ポルトランドセメント

細骨材: 九頭龍川砂, 表乾密度 2.56 g/cm³, 吸水率 2.66%, 弾性係数 (Ea) 37.7 GPa.

: 豊浦産珪砂, 表乾密度 2.61 g/cm³
吸水率 0.65%

2.3 調合

各1バッチの調合を表-1に示す。

2.4 混練と計測

実験1の調合1(W/C=0.65)のセメントペーストではモルタルミキサーに所定のセメント全量と所要水の半分を加えて混練り3分、残りの水を加えて3分混練、その後80分経過して10分混練を加えてから型枠に打ち込んだ。調合2と調合3では混練5分後、約1時間経過して

表-1 調合表

実験名		W/C	水	セメント	細骨材	
調合名			(g)	(g)	(g)	含有率*
実験1	1	0.65	726	1117	0	0
	2	0.45	634	1408	0	0
	3	0.33	588	1668	0	0
	4	0.636	464	730	1690	0.482
	5	0.685	474	692	1495	0.452
	6	0.343	380	1109	850	0.308
実験2	1	0.65	759	1168	0	0
	2	0.45	662	1472	0	0
	3	0.33	576	1746	0	0
	4	0.65	521	806	2355	0.533
	5	0.45	555	1241	1916	0.433
	6	0.33	590	1784	1383	0.313

(* モルタル中の細骨材絶対容積含有率)

から10分練り返して用いた。調合4, 5, 6のモルタルでは豊浦産珪砂とセメントを空練りの後、水を加えて5分混練を行い、20分経過後に練り返してから型枠に打ち込んだ。打ち込みから4-5時間後に上面を均しポリエチレンシートで覆った。翌日脱型し直ちに水中に浸漬した。実験2では細骨材として九頭龍川産川砂を用いた。混練・打ち込みは実験1とほぼ同様である。翌日キャッピングを施し、翌々日脱型し以後水中養生を行なった。

2.5 計測と圧縮試験

実験1の角柱試験体は各調合につき6本、合計36本である。質量と試験体長手方向の超音波伝播時間を試験体全数に対して計測した。圧縮試験は所定材齢ごとに各種1本とした。試験体長手方向に圧縮し、両側面中央の歪ゲージ(検長60mm)により圧縮歪を計測した。この圧縮は想定破壊荷重の約1/3までとした。その後同一試験体を用いて打ち込み方向の側面から4cm×4cm耐圧板を用いて中央部の圧縮破壊試験を行い、両端部に対してもセメント圧縮強度試験と同様に行った。圧縮強度はそれらの平均値である。

実験2の円柱試験体数は各調合に対して15本、合計90本である。所定材齢における質量と試験体高さ方向の超音波伝播時間の測定は全数に対して行った。圧縮試験は各調合の3本に対して行い、両側面中央に歪ゲージ(検長20mm)を貼り付け歪度を計測した。試験材齢を表-2に

示す。太字は圧縮試験を併せて行なったことを示す。以下の検討では圧縮試験結果は各3本の平均値を取り上げた。

表-2 試験材齢 (日)

実験 1	8, 15, 28, 56, 92, 184, 277
実験 2	7, 14, 21, 27, 55, 90, 125 (Paste)
	7, 13, 20, 28, 54, 89, 124 (Mortar)

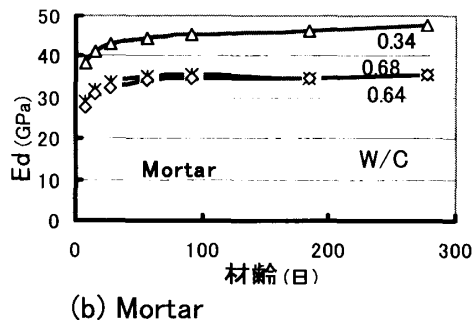
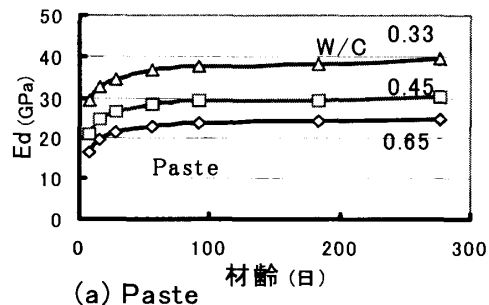
3. 実験結果と考察

実験結果を表3.1～表3.3に示す。

3.1 E_d と材齢との関係

(1) 実験1

調査ごとの E_d の平均値と材齢の関係を図-1に示す。ここに E_d 平均値とは材齢8, 15, 28日では各6本の値を対象としている。材齢28日に1本を圧縮試験に供するため材齢56日では各5本の平均値, 以下同様に圧縮試験ごとに試験体数は1本ずつ減る。材齢92日では4本, 184日では3本, 277日では2本の平均値である。

図-1 材齢と E_d (平均値) (角柱試験体)

材齢が大きくなるに従い E_d も増大するがその増加の傾向は材齢が増えるほど緩慢になる。特

表-3.1 動弾性係数 (E_d) 平均値 (GPa)

		W/C	1w	2w	4w	8w	13w	26w	40w
実験1 角柱体	P	0.65	16.4	19.8	21.5	23.1	24.1	24.4	25.0
		0.45	21.2	24.8	26.7	28.6	29.1	29.3	30.5
		0.33	29.2	32.6	34.6	36.5	37.6	38.3	39.3
	M	0.64	27.8	30.9	32.4	34.1	34.6	34.7	35.3
		0.68	29.0	32.0	33.5	34.9	35.3	34.7	35.5
		0.34	38.3	41.1	43.0	44.6	45.5	46.2	47.7
		1w	2w	3w	4w	8w	13w	18w	
実験2 円柱体	P	0.65	16.2	18.0	19.0	19.4	20.7	21.2	21.9
		0.45	21.4	23.0	24.4	24.9	26.4	27.2	27.9
		0.33	29.5	31.9	33.1	33.5	35.6	36.8	37.8
	M	0.65	26.9	28.6	30.2	30.5	32.0	33.3	33.8
		0.45	---	33.5	35.5	36.0	37.7	39.3	40.0
		0.33	35.0	36.6	38.5	38.7	41.0	42.4	43.2

P: ペースト, M: モルタル, 材齢(w)は週単位(詳細日数は表-2参照)。

表-3.2 静弾性係数 (E) (GPa)

		W/C	4w	8w	13w	26w
実験 1 角柱 体	P	0.65	12.2	15.4	13.7	14.2
		0.45	17.0	17.9	18.1	19.4
		0.33	20.8	24.9	23.7	25.9
	M	0.64	23.1	23.3	25.8	24.8
		0.68	22.2	26.0	24.6	25.2
		0.34	31.1	32.9	33.9	34.7
		1w	4w	13w	3本の 平均	
実験 2 円柱 体	P	0.65	9.22	11.0		12.4
		0.45	10.7	15.2		18.1
		0.33	22.3	21.8		25.7
	M	0.65	16.5	18.3		21.4
		0.45	21.6	22.1		26.9
		0.33	23.8	24.5	27.7	

表3.3 圧縮強度 (F_c) (MPa)

		W/C	4w	8w	13w	26w
実験 1	P	0.65	27.9	30.9	41.8	49.9
		0.45	44.4	38.8	51.2	75.1
		0.33	97.5	57.1	72.9	108.8
角柱 体	M	0.64	17.6	35.2	34.3	42.4
		0.68	29.1	34.9	32.7	48.1
		0.34	49.1	67.1	85.6	90.8
			1w	4w	13w	3本の 平均
実験 2	P	0.65	18.1	27.1	36.1	
		0.45	37.1	56.5	71.8	
		0.33	38.5	82.1	94.1	
円柱 体	M	0.65	18.9	30.9	40.4	
		0.45	45.0	52.3	65.5	
		0.33	54.7	72.6	87.9	

に材齢90日を過ぎるとその増大は極めて少ない。

一方これらの E_d 平均値と圧縮試験によって求めた静弾性係数 E との関係を図-2に示す。

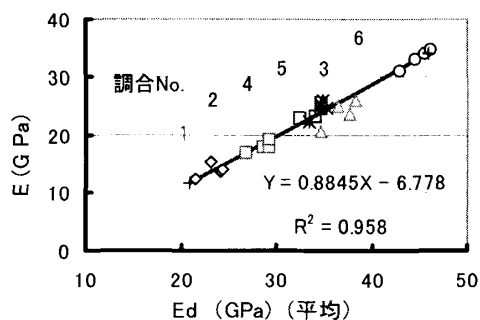


図-2 EdとEの関係

セメントペースト(調合 No.1,2,3) とモルタル(調合 No.4,5,6) 共に E_d と E の関係は同一の直線関係にあるものと見なすことが出来る。

いまこれら全体に対して1次の回帰式を求めると式(2)のようである。

$$E = 0.885 \cdot E_d - 6.8 \quad (2)$$

すなわち式(2)の関係を想定すれば図-1に示した材齢と E_d との関係は E との関係にも同様の傾向を持つものと考えられる。

(2) 実験2

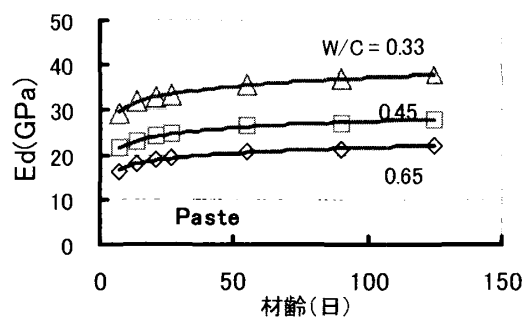
調合ごとの E_d の平均値と材齢の関係を図-3に示す。ここに平均値とは材齢7日では各15本の値である。材齢7日に各3本を圧縮試験に供するため材齢約2, 3, 4週では各12本, 以下同様に圧縮試験終了後ごとに試験体数は3本ずつ減ることになる。材齢9, 13週では9本, 18週では6本である。

材齢と E_d との関係はセメントペーストの場合とよく似ている。

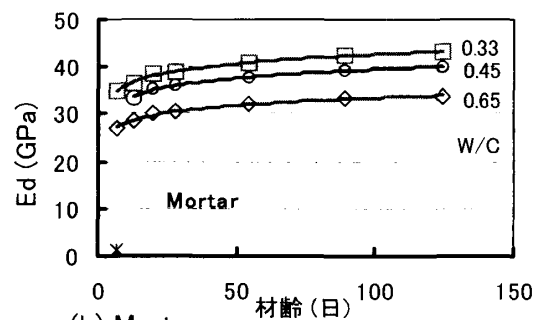
また円柱試験体の E_d と E の関係を図-4に示す。ペーストとモルタルは共通の E_d - E 関係にあると見なすことが出来る。

ここでも実験1と同様に両者の回帰式を求めると式(3)が得られる。すなわち図-3に示した傾向は E との関係にも当てはまるものと考えられる。

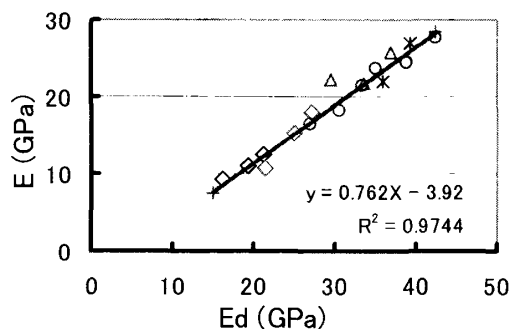
$$E = 0.762 \cdot E_d - 3.92 \quad (3)$$



(a) Paste



(b) Mortar

図-3 材齢と E_d (円柱試験体)図-4 E_d - E 関係 (円柱試験体)

3.2 弾性係数比 (E_d ratio) と材齢

上記の結果は水セメント比によってそれぞれ異なった関係を示している。実用上の観点から材齢4週の E_d に対する任意材齢の E_d の比 (E_d ratio)を取り上げる。この場合には図-5, 図-6に示すように水セメント比如何に関らずよく近接した関係が認められる。ただ回帰式は必ずしも各データを通らない部分もある。そこで若材齢のデータを除外し, 4週以降を対象とすると

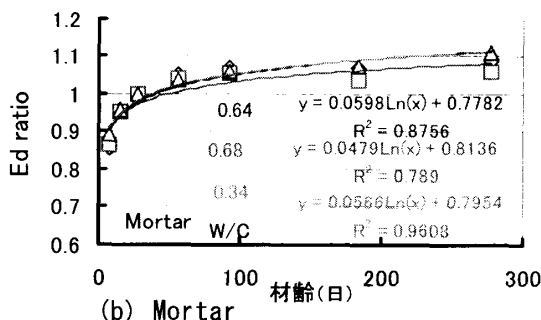
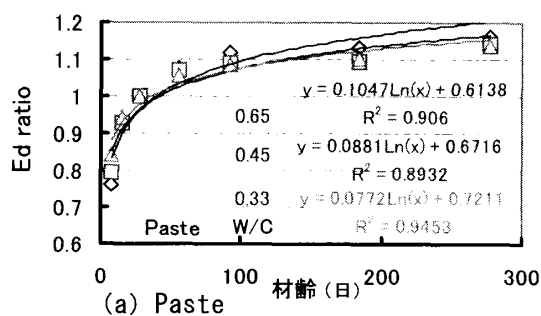


図-5 Ed ratio と材齢(角柱)

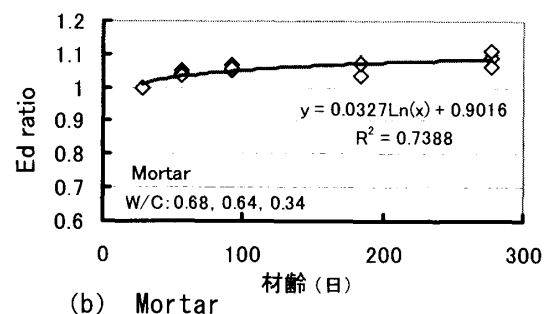
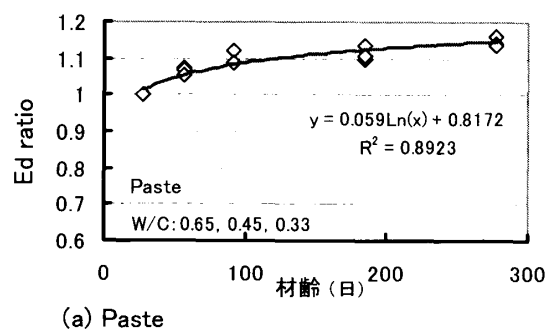


図-7 Ed ratio と材齢(角柱)

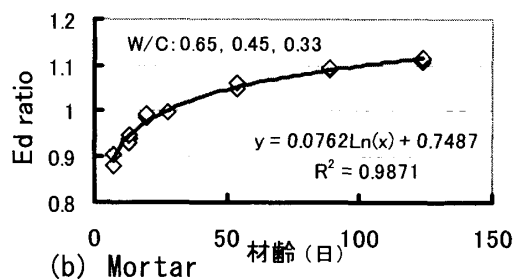
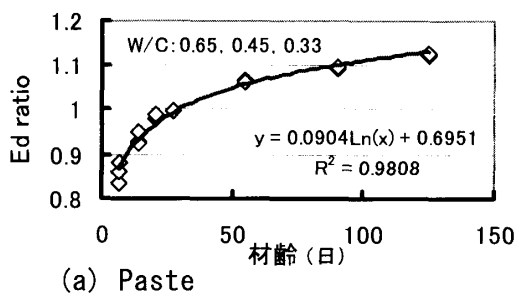


図-6 Ed ratio と材齢(円柱)

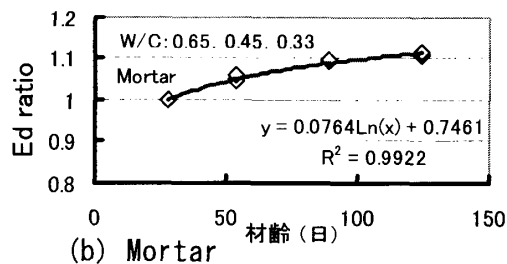
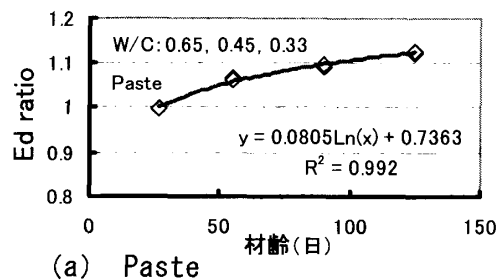


図-8 Ed ratio と材齢(週)(円柱)

図-7, 図-8 のようによく近接することが見出された。

またこれらの図ではペーストとモルタルの差が明瞭でないので、図中の回帰式から材齢1年、2年の Ed ratio を求めて表-4 に示す。ペーストに比べてモルタルの方が Ed ratio が低いのは

表-4 Ed ratio と 材齢

	ペースト		モルタル	
	1年	2年	1年	2年
角柱	1.165	1.206	1.095	1.117
円柱	1.211	1.267	1.197	1.249

材齢による弾性係数の変化がない砂を含有しているためと考えられる。

3.3 コンクリートの弾性係数と材齢

コンクリートの弾性係数については上述のモルタルの実験結果から Hashin-Hansen の複合理論解の式(4)を用いて類推することにする。

$$E_c = E_m \frac{[V_m \cdot E_m + (1+V_a)E_a]}{[(1+V_a)E_m + V_m \cdot E_a]} \quad (4)$$

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,
 $(V_m + V_a = 1)$

円柱モルタルの場合 ($W/C = 0.65, 0.45, 0.33$) を例にとり, この式に母材モルタルの弾性係数実験値 E と碎石粗骨材の弾性係数 ($E_a = 55.1 \text{ GPa}$)・含有率 (0.4 : 絶対容積 400 l/m^3 を想定) を代入してコンクリートの弾性係数を算定する。この場合材齢4週に対する13週の弾性係数の比を求めると, モルタルでは $1.13 \sim 1.22$ に対してコンクリートでは $1.08 \sim 1.14$ と算定され, モルタルに対するコンクリートの弾性係数の変化は水セメント比 $0.65, 0.45, 0.33$ に対し $0.662, 0.631, 0.626$ と算定された。コンクリートの弾性係数の変化はモルタルより更に緩慢である。

3.4 圧縮強度比と弾性係数比の比較

一方, 材齢4週に対する材齢13週のモルタルの圧縮強度比は $1.21 \sim 1.31$ であるのに対し, その弾性係数比は $1.13 \sim 1.22$ である。すなわち材齢の増加に伴う弾性係数の増加率は圧縮強度よりも緩慢である。

4. 結び

本実験によって次の知見が得られた。

- 1) セメントペースト及びモルタルの超音波伝播速度より求めた動弾性係数 (E_d) と圧縮試験より得られた最大応力度の $1/3$ の応力度における割線弾性係数 (E) とは凡そ直線的関係にある。したがって E_d から E の推定が可能である。
- 2) 上記の動弾性係数 (E_d) と材齢との関係は対数回帰式で近似することが出来、水セメント比によってそれぞれ異なった傾向を示す。

3) それらは材齢4週を規準とする弾性係数比 ($E_d \text{ ratio}$) で表すと水セメント比の大小に拘らず材齢との関係はほぼ同一と見なされる。増加の傾向は材齢が増加する程僅少となり4週に対して1年では約1.2倍程度である。

4) コンクリートの静弾性係数の材齢に伴う変化はモルタルより更に緩慢で、一般的な調査ではモルタルの約6割を想定できる。

参考文献

- 1) 梶田佳寛：コンクリート最新技術, 1) 高強度コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.4, P.86, 1994
- 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) 清原千鶴・永松静也・佐藤嘉昭・三橋博三：混和材を用いたコンクリートのヤング係数の評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.25, No.2, pp.389-394, 2003.7
- 4) 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報告集, Vol.25, No.2, pp.359-364, 2003.7
- 5) 川上英男：コンクリートの弾性係数推定試案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.417-422, 2004.7
- 6) 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, 2001.6
- 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集, Vol.22, No.2, pp.529-534, 2000.6
- 8) KAWAKAMI, H. : Estimation of Elastic Modulus of Concrete from Elastic Moduli of Its Constituents and Interfacial Zone, [Role of Interfaces in Concrete]---- Proceedings of the International Seminar at the University of Dundee, Scotland, UK, pp.209-217, Jul.1999