セメント系押出成形材料のヤング係数の予測方法の提案

A PROPOSAL ON PREDICTING ELASTIC MODULUS OF CEMENTITIOUS MATERIALS PRODUCED BY EXTRUSION MOULDING

渡部嗣道 — *1 馬場明生 — *2
守 明子 — *3

Tsugumichi WATANABE — *1 Akio BABA — *2
Akiko MORI — *3

キーワード：
ヤング係数, 押出成形, セメント系複合体, 複合則, マトリックス, 粒子

Keywords:
Young's modulus, Extrusion moulding, Cementitious composite, Composite law, Matrix, Particle

In this paper, a method for predicting Young's modulus of cementitious composites produced by extrusion moulding is proposed. The applicability of the method was examined by three series of experiments. After the Young's modulus of matrices of composites are predicted, Young's modulus of composites are predicted by Hashin-Hansen equation, which is formed on the basis of Self-Consistent Approximation (S.C.A model) for finding composites mechanism on elastic modulus. Furthermore, it is clarified in case of extrusion moulding that Young's modulus of matrices are deeply influenced by visco additives and fiber additives as well as cement water ratio and degree of hydration. As the result of this experiment, predicted values are nearly equal to tested ones. Therefore, it is possible to predict Young's modulus of cementitious materials produced by extrusion moulding.

1. はじめに

セメント系材料は今日の建設産業にとって必要不可欠なものとなっており、その製造方法も型枠成形、抄造成形、振動加圧成形、押出成形など多くの種類のものが実用化されている。製造方法の違いはその製品の品質のほか意匠性や経済性に与える影響が大きく、また適用物の用途や要求される品質によって製造方法が決定されることもある。その中でも押出成形によるセメント系材料の品質は、他の製造方法によるものに比べてマトリックスとしてのペースト部分の組織が緻密となり、曲げ強度や耐久性について優れたものとなる。したがって、これまでセメント系の複合材料には断面性能として算定されにくい補強筋を含まない部材自身への引張応力または曲げ応力の分担も可能となった。このような既往の代表的な製品としては、サイディングやカーテンウォールなどが見られる。ただし、このように曲げ強度が向上することは、曲げ剛性によっても部材断面が決定されることを示している。

一方、近年になって、鉄筋コンクリート構造物の型枠材である合板のその代替部材として、型枠を転用・廃棄するのではなく、型枠として使用後、そのまま躯体に残す打込み型枠が注目されるようになった。特に、曲げ強度の高いセメント系押出成形部材は、この打込み型枠構法に適し、多くの開発研究がなされている[1]。この場合、部材としての曲げ耐力のほか、コンクリートの側圧等の施工時の外力作用に対して所要の寸法精度を確保するため、さらに建設物の完成後の複合部材としての挙動を明確にするために、曲げ剛性も重要になってくる。しかし、セメント系押出成形材料のヤング係数の予測方法に関する研究はほとんど見られず、成形されることに実験的に求められているのが現状である。したがって、使用物質・調合お

よび部材の断面形状によって部材の曲げ剛性を予測する方法の確立が強く求められている。

型枠成形によるコンクリートについては、セメントペーストをマトリックスとした粒子分散系の複合材料として取り扱った場合のヤング係数の予測方法がこれまで多く提案されており、その有効性は幅広い実験結果によって確認されている[2]。セメント系押出成形材料もこれと同様に、粒子分散系の複合材料であるために、同方法が適用できるものと思われるが、押出成形に求められる可塑性・保形性を確保するために使用される増粘剤や繊維質添加材などの混和材料を含むマトリックスの物性や高圧押出成形による異方性の発生により、型枠成形材料とは異なるものと考えられる。したがって、本報告では、セメント系押出成形材料のヤング係数を予測する方法として、これら型枠成形のコンクリートなどについて提案されているセメント系の粒子分散系複合材料のヤング係数の予測方法をセメント系押出成形材料にも適用し、新しい予測方法を提案する。続いて、多様な物質・調合についてその妥当性を実験によって検討した。

2. 型枠成形によるセメント系材料のヤング係数の複合則に関する既往の研究

表1および図1～4に、セメント系粒子分散系複合材料のヤング係数を予測するためにこれまでに提案された代表的な複合モデルを示す。一般的に、コンクリートは均質等方性のマトリックス相とその中に分散している粒子相とからなる2相材料と考えられ、そのヤング係数は構成相のヤング係数と体積比とで予測する手法が提案されている。

直列式と並列式は、図1に示すように、それぞれ2相系複合材料

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 助手・工修
(〒775-8611 宇部市常盤台2-16-1)

*2 山口大学工学部感性デザイン工学科 教授・工博

*3 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 教授・博士(工学)

*1 Assistant Prof., Dpt. of Kansei Design and Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., M. Eng.

*2 Prof., Dept. of Kansei Design and Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

*3 Prof., Dpt. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

のヤング係数の上限値と下限値とを示すことがよく知られている[3][4][5]。また、図2に示すように、Countoはマトリックスの中心に骨材を配置し、並列モデルと直列モデルとを併用した型で、2次元複合モデルを提案している[6]。さらに、若林は、これを3次元で表現したモデルを提案している[7]。一方、図3に示すように、O.Ishaiは、複合体（コンクリート）中の骨材体積率の比較的小さい場合の希釈分散系モデルを提案している[8]。これは、セメントペーストのマトリックスの中に粒子として骨材が存在しているモデルであり、複合体のヤング係数はマトリックスのヤング係数および骨材体積率に比例して増加する。また、図4に示すように、Self-Consistent Approximation（以下、S.C.A.と記す）によるモデルが、T.C.Hansenによって提案された[9]。この考え方は、1つの粒子とその周囲の複合材料との力学的な相互作用として複合モデルを提案することによって、全体系の性質を予測する手法である。このモデルは、圧力を受けている同心球をペーストおよび骨材からなる複合材として考え、その中心に1個の骨材を想定した球を存置し、それと球殻である複合材との力の相互作用を考えるものである。

以上のモデルのうち、S.C.A.モデルによるHashin-Hansen式が、型枠成形によるコンクリートのヤング係数の予測式として、広範囲の物質・割合について最も精度よく適用できることが確認されている[2]。

3. セメント系押出成形材料のヤング係数の予測方法の提案

セメント系押出成形材料は、型枠成形によるコンクリートと同様に、粒子分散系2相材料として取り扱えると仮定し、これと同様なモデルを使用して、ヤング係数の予測方法を提案する。

図5に、ヤング係数の予測フローを示す。まず、増粘剤と繊維質添加材の種類と混入によってマトリックス固相のヤング係数 E_1 を仮定し、製造プロセスにおいて混入した空気量や成形工程における水量の脱水も考慮した有効水セメント比とセメントの水和率によるマトリックスのポロシティを算出し、(1)式からマトリックスのヤング係数 E_m を予測する。ここで、増粘剤および繊維質添加材をマトリックスの一部とし、 E_1 は押出成形断面形状の影響を受けないことを前提条件とする。(1)式は、T.C.Powersの3乗則(Cube Law)としてよく知られている。ここに、 E_m ：押出成形材のマトリックスのヤング係数、 E_1 ：マトリックスの空隙が零のときのヤング係数、 V_p ：マトリックスの空隙率、 W_e ：有効水セメント比、 α ：セメントの水和率とする。

$$E_m = E_1 \cdot (1 - V_p)^3 \quad (1)$$

$$V_p = (W_e - 0.170\alpha) / (W_e + 0.316) \quad (2)$$

(1)式は、T.C.Powersの3乗則(Cube Law)としてよく知られているもので、セメントペーストのヤング係数は、空隙を除いた体積の3乗に比例するとするものである[10]。また、マトリックスの空隙が零のときのヤング係数は、混和材料の種類と量によって異なり、主にセメント系押出成形材料に特有の材料である、増粘剤と繊維質

(a) Parallel Model (b) Series Model
Figure 1 Parallel and series model

Figure 2 Counto's model

Figure 3 Dilute dispersion model

Figure 4 S.C.A. model

Table 1 Past composite law on elastic modulus

Type of model	researcher(A.D.)	Equations of calculating
Parallel model	M.E.De Reus and T.F.Willis (1939)	$E_c/E_m = 1 + (n-1) \cdot V_a$
Series model	P.Dantu(1957), M.F.Kaplan(1959)	$E_c/E_m = n/[n - (n-1) \cdot V_a]$
Counto's model	U.J.Counto(1964)	$E_c/E_m = [1 + (n-1) \cdot (V_a)^{0.5}] / [1 + (n-1) \cdot ((V_a)^{0.5} - V_a)]$
Wakabayashi's model	Minoru Wakabayashi(1960), J.M.Illston(1965)	$E_c/E_m = [1 + (n-1) \cdot (V_a)^{(1/3)}] / [1 + (n-1) \cdot ((V_a)^{(2/3)} - V_a)]$
Hirsh's model	T.J.Hirsh(1962)	$E_c/E_m = 0.5[1 + (n-1) \cdot (V_a)] + 0.5n/[n - (n-1) \cdot (V_a)]$
Dilute dispersion model	O.Ishai(1962)	$E_c/E_m = 1 + C \cdot V_a$
S.C.A. model	Z.Hashin(1962), T.C.Hansen(1965)	$E_c/E_m = [n + 1 + (n-1) \cdot V_a] / [n - 1 - (n-1) \cdot V_a]$ (Hashin-Hansen 式)

E_c : Young's modulus of concrete, E_m : Young's modulus of matrices, E_a : Young's modulus of aggregate, n : E_a/E_m (Young's modulus ratio), V_a : Volumetric ratio of aggregate in concrete or mortar

添加材の影響を受けるものと考えられる。一方、空隙率は、ゲル空隙・毛細管空隙および連行空気とを加えたものであり、(2)式で計算する。これは、100 gのセメントが完全に水和する場合に 22.7 gの水と反応し、その際、水の体積が 0.75 倍になるものとして与えられたものである。また、セメントの水和率の算定は、JIS R 5202 (ポルトランドセメントの化学分析方法)によって、まず硬化後の試験体および使用したセメントの強熱減量を測定し、その差から結合水量と自由水量との和を求める。なお、この際、CaO と SiO₂ の量からセメント量と骨材量とを確認する。続いて、硬化後の試験体中の自由水量を表乾時と絶乾時との質量差から算出する。結合水量と自由水量との和とこの自由水量との差から結合水量を計算し、これらの結果よりセメントの水和率を求める。次に、押出成形材料のヤング係数は、(1)式で求められたマトリックスのヤング係数と骨材のヤング係数および骨材の体積率から、(3)式の Hashin-Hansen 式が適用できるものとして求める。

$$E_c / E_m = [n+1+(n-1) \cdot V_a] / [n-1+(n-1) \cdot V_a] \quad (3)$$

4. 検証に用いた実験

4.1 使用物質および調査

使用物質は、結合材料として普通ポルトランドセメントを、骨材として旧 JIS R 5201(セメントの物理試験方法)の「セメントの強さ試験法」に用いられていた豊浦砂または製造用の熊本砂を、上水道水、増粘剤としてメチルセルロース (S N社製 90SH-4000)、その他押出成形に標準的な繊維質添加材としてクリソタイル 6 D (JIS M 8602) および親水性加工したポリプロピレン繊維 (S D社製)をそれぞれ用いた。表 2 に普通ポルトランドセメント(M社製)、表 3 に骨材、表 4 に繊維質添加材について、それぞれの物性を示す。

モルタルの調査を表 5 に示す。骨材質量に対するセメント質量の割合を 1.00 の一定とし、水量比 (水量をセメント質量・骨材質量および水量の和で除した値)は押出成形可能な全範囲 0.12~0.25 とした。増粘剤の添加量は、水量比や繊維質添加材の種類によらず混和材料を除いたモルタル総質量に対して 1%とした。また、繊維質添加材の添加量は、同様にモルタル総体積の 4%とした。なお、本実験は 3つのシリーズに分けて実施し、シリーズ I は骨材を豊浦砂とし、繊維質添加材の種類を変化させたもの、シリーズ II は繊維質添加材をクリソタイルとして骨材の種類を変化させたものである。また、シリーズ III はセメントペーストに関するものである。

4.2 製造方法

シリーズ I および III ではアイリッヒミキサ (75 リットル)、シリーズ II ではオムニミキサ (30 リットル) で混合した。ここで、アイリッヒミキサはオムニミキサよりも均一混合性において優れている。混合後、スクリー径 100mm の軸式ニーダで混練した。混練された材料すなわちモルタルをダイ(口金)開口形状 12.0×60.0mm、バレル内径 50.0mm(ダイ断面/バレル断面積=絞り率 36.7%)で、バグミル部とバレル部の間に真空室を有する押出成形機にて押し出した。バグミル部とバレル部のスクリー回転速度は 11.0rpm と一定とした。なお、練混ぜ水量は、脱水や空気の混入などにより、各製造工程で異なる結果となる。そこで、本実験では、その製造工程ごとに練混ぜ水量を求め、水セメント比を計算した。

Figure5 Method of predicting Young's modulus of cementitious materials produced by extrusion moulding

Table 2 Physical properties of ordinary Portland cement

Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Water content (%)	Setting time Initial (h:m)	Setting time Finish (h:m)	Compressive strength (28d) (MPa)
3.16	3190	28.3	236	3-45	41.6

Table 3 Physical properties of aggregate

Kinds of aggregate	Sieve mesh number	Specific gravity (g/cm ³)	Bulk density (degree)	Angle of repose	Water absorption (%)	Specific surface area (cm ² /cm ³)
Toyoura silica sand	—	2.66	1.56	0.59	0.6	256
Kumamoto silica sand	4	2.60	1.45	0.56	0.7	107
	5	2.59	1.53	0.59	0.8	140
	7	2.39	1.54	0.64	0.8	449

Table 4 Physical properties of fiber

Kinds of fiber	Density (g/cm ³)	Diameter	Aspect Ratio (—)	Tensile strength (MPa)	Young modulus (GPa)
Chrysotile(6D)	2.74	7Å	—	1863	70-140
Polypropylene	0.909	0.4mm	15	490	11.8

Table 5 Mix proportion of mortals used in the experiment

Series	No.	Kinds of aggregate	Kinds of fiber	Water content ratio	Water cement ratio	Fiber additives content	Methyl cellulose content
I	1	Toyoura silica sand	Chryso-tile	0.13	0.299	0.05	0.01
	2			0.15	0.353		
	3			0.20	0.500		
	4		Polypropylene	0.25	0.667	0.017	
	5			0.13	0.299		
	6			0.15	0.353		
	7			0.175	0.424		
II	8	Kumamoto silica sand NO.4	Chryso-tile	0.12	0.276	0.05	0.01
	9			0.15	0.353		
	10			0.20	0.500		
	11			0.25	0.667		
	12	Kumamoto silica sand NO.5		0.12	0.273		
	13			0.15	0.353		
	14			0.20	0.500		
	15			0.25	0.667		
	16	Kumamoto silica sand NO.7		0.12	0.273		
	17			0.15	0.353		
	18			0.20	0.500		
	19			0.25	0.667		
III	20	—	Chryso-tile	0.20		0.05	0.01

4.3 供試体と曲げ試験方法

押し出された断面 $12.0 \times 60.0 \text{ mm}$ 、長さ約 550 mm の長尺な成形体を水が散逸しないようにビニールシートで覆い、 20°C の室内で1日封かん湿潤養生した。さらに27日間、 20°C の水中養生を行った。養生の終了した成形体を長さ 150 mm に切断して曲げ強度測定用供試体とし、表面の水をウェスで拭き、表乾の状態曲げ強度試験に供した。曲げ試験は、スパン 120 mm 、変位制御 1.0 mm/min 、二等分中央載荷とした。一般に、押出成形材料は異方性材料であると考えられるが、ここで測定した曲げ強度および載荷点のたわみは、押出成形方向のものである。曲げヤング係数は、曲げ強度の $1/3$ の応力時における割線として求めた。ここに、 E_c : 実験から求められた押出成形材料のヤング係数、 P : 最大荷重の $1/3$ の荷重、 L : 載荷長さ、 δ : 最大荷重の $1/3$ 荷重時の供試体中央部のたわみ、 I : 試験体の断面2次モーメントである。

$$E_c = P \cdot L^3 / 48 \cdot \delta \cdot I \quad (4)$$

5. 予測結果

5.1 マトリックスのヤング係数

シリーズIIIのセメントペーストの実験結果について、空隙率が零のときのヤング係数の値である実験定数 E_1 は繊維質添加材がクリソタイルの場合で 50.7 GPa であった。これは、型枠成形のコンクリートのヤング係数を予測する際に求めたセメントペースト（水とセメントのみ）からなるマトリックスのヤング係数である 86.8 GPa [11] を下廻っている。これは、クリソタイルまたは増粘剤のいずれかの混和材料の影響と思われる。クリソタイルは硬質でセメント粒子とほぼ同じヤング係数と考えられることから、これは増粘剤の混入がセメント系のマトリックスのヤング係数を小さくする効果によるものと思われる。ここでは、押出成形材料で最も一般的な質量比である1%の添加量の場合の E_1 の値として上述の値を採用することとした。一方、ポリプロピレンの場合は、その繊維質添加材のヤング係数がクリソタイルに比べて $1/10$ 程度と小さく、体積率が4%もあることから、さらに小さな値となるものと思われる。したがって、その4%を空隙とみなしてポリプロピレンの場合の E_1 を求めると 30.7 GPa となった。

5.2 各種複合モデルの妥当性評価

マトリックスのヤング係数を求め、次に Hashin-Hansen 式を適用して、セメント系押出成形材料のヤング係数を求める方法を提案した。ここでは、セメント系押出成形材料のヤング係数を予測する式の適用性を見るために、Hashin-Hansen 式のほか各種粒子分散系複合材料のヤング係数の予測式について、実験値と計算値とを比較してその予測精度を評価した。なお、対象とする予測式は、「2.型枠成形によるセメント系材料のヤング係数の複合則に関する既往の研究」で述べた①直列式、②並列式、③Counto 式、④若林式、⑤ Hashin-Hansen 式の5式とする。それぞれの予測式で計算されたヤング係数の計算値は、表1に示す計算式を利用して、(5)式で求める。ただし、骨材のヤング係数は、豊浦砂以外の骨材のヤング係数は既知でないため、本検討ではすべての骨材について豊浦砂の値である 77.5 GPa [11] を用いることとした。ここに、 E_c : 押出成形材料のヤング係数の計算値、 E_m : マトリックス（ペースト）のヤング係数

の予測値、 $F(n, V_a)$: 各種モデル式で与えられる押出成形材料のマトリックスに対するヤング係数比の計算値、 n : 骨材のヤング係数のマトリックスのヤング係数に対する比、 V_a : 骨材の容積率である。

$$E_c / E_m = F(n, V_a) \quad (5)$$

$$E_c = F(n, V_a) \cdot E_m \quad (6)$$

5.3 予測結果

図6の(a)~(e)に、各予測式で計算した値と実験値との比較を示す。並列式および Counto 式による場合の計算値は、ほぼあらゆる材料について実験値よりも大きな値を示し、特に並列式の場合の両者の差異は他のモデル式の場合よりも大きな値を示した。これらに対し、直列式による場合は、計算値は実験値よりも小さな値を示した。一方、若林式と S.C.A. モデルによる計算値は、ほぼ実験値と同一値を示した。なお、本実験では、複合材料のヤング係数で約 $5 \sim 30 \text{ GPa}$ 、骨材のマトリックスに対するヤング係数比で $5 \sim 12$ 、骨材の体積率で $0.25 \sim 0.40$ の広範囲の条件についての実験結果が得られ、その範囲における適用性の確認ができた。

図7に、計算値/実験値の変動率を示す。変動率の計算方法は、(7)式とした。ここに、 N : 同一実験因子における供試体数である。

$$\text{変動率} = (\sum_{i=1}^N (1 - (\text{計算値} / \text{実験値}))^2 / N)^{1/2} \quad (7)$$

変動率は、いずれの物質・割合に対しても並列モデルが最も大きな値を示した。若林モデルおよび S.C.A. モデルが、いずれも 0.2 以下の最も精度よい結果を示した。

また、物質の種類については、ポリプロピレンの場合と熊本砂砂7号の場合とが、やや大きな値を示した。ポリプロピレンについてはヤング係数を零と仮定したこと、熊本砂砂7号については豊浦砂砂と同等としたという大胆な仮定によるものと見られることが、誤差に結びついたものと思われる。熊本砂砂7号の吸水率は大きく、吸水率の小さな豊浦砂のヤング係数に比べ、小さな値を示すものと思われる。

6. 考察

6.1 ヤング係数比と計算値/実験値との比較

図8に、マトリックスに対する骨材のヤング係数比と計算値/実験値との関係を使用物質毎に示す。並列式による場合は、ヤング係数比が大きくなるほど、計算値/実験値が大きくなるが、他のモデル式の場合は、ヤング係数比が増大してもほぼ一定の値を示した。また、並列式の場合、他のモデル式による場合よりも $1.5 \sim 4.5$ 程度という非常に大きな値を示した。これに対して他のモデル式は、ヤング係数比にかかわらず $0.8 \sim 1.5$ 程度の値を示し、特に若林式と S.C.A. モデルの場合にはほぼ 1.0 の値を示した。以上の傾向は5種類の使用物質の組み合わせのいずれについても同様の傾向が得られた。

6.2 骨材体積率と計算値/実験値との比較

図9に、骨材体積率と計算値/実験値との関係を使用物質毎に示す。並列式による場合は、骨材体積率 V_a が大きくなるほど、計算値/実験値が小さくなる傾向を示したが、他のモデルの場合は、骨材体積率の増大にかかわらず、 V_a が $0.25 \sim 0.40$ の範囲においてほぼ一定の値を示した。これらの傾向は、5種類の使用物質の組み合わせについて、いずれも同様の傾向が得られた。

6.3 セメント系押出成形材料のヤング係数の予測

図10にT.C. Powersの3乗則によるマトリックスのヤング係数の予測値を示す。本実験の結果、押出成形可能な水量比の範囲について、マトリックスの空隙率の計算値は0.36~0.56となり、 E_m の予測値は繊維質添加材がクリソタイルの場合 ($E_i=50.7$ GPa) で約5~15 GPa、ポリプロピレンの場合 ($E_i=37.0$ GPa) で約3~10 GPaの値が得られた。

図11に繊維質添加材がクリソタイルの場合、図12に繊維質添加材がポリプロピレンの場合のHashin-Hansen式によって計算された押出成形材料のヤング係数の予測値をそれぞれ示す。ここで、図7で示されたように骨材のマトリックスに対するヤング係数の比は、クリソタイルおよびポリプロピレンともに5~20 GPaであった。また、マトリックスのヤング係数は、図10で示された範囲の値となった。この結果、セメント系の押出成形材料のヤング係数の範囲は、繊維質添加材がクリソタイルの場合で6~30 GPa、ポリプロピレンの場合で5~20 GPaであった。

7. まとめ

本研究では、コンクリートなどの型枠成形材のヤング係数に関する複合モデルを適用し、セメント系押出材料のヤング係数の予測方法を提案し、その適用性を実験によって確認した。その結果、以下の結論を得た。

- (1)セメント系押出材料のヤング係数の予測方法を提案した。それは、T.C. Powersの3乗則でマトリックスのヤング係数を予測した後、セメント系粒子分散材料の複合則の一つであるHashin-Hansen式によって求める方法である。
- (2)本提案方法を検証するために、押出成形可能な全水量比の範囲について曲げ実験を実施した。その結果、増粘剤の添加によってマトリックスのヤング係数が低下した。
- (3)本実験条件の範囲において、空隙率が零のときのマトリックスのヤング係数 E_i は、クリソタイルを使用したときは50.7 GPaで、ポリプロピレンを使用したときは37.0 GPaであった。
- (4)セメント系押出成形材料のヤング係数を予測するために、マトリックスのヤング係数、骨材のヤング係数および体積率から、型枠成形によるコンクリートのヤング係数を予測するための複合則で知られている5種類のモデル式を用いた。その結果、若林モデルとS.C.A.モデルを適用できることが確認された。

[参考文献]

- [1]馬場明生ほか：薄肉打込み型枠工法ガイドライン，建設省建築研究所建築研究報告，1995年8月
- [2]岸谷孝一，馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構，セメントコンクリート，No.346，pp.30-39，1975.12
- [3]M.E. DeRews, T.F. Wills: Thermal Volume Change and Elasticity of Aggregates and their Effect on Concrete, Pro. of ASTM
- [4]P. Dantu: Etude des Contraintes dans les Milieux Heterogènes, Ann. Tech. Batiment Jraw, Publ. Vol II, 1958
- [5]M.F. Kaplan: Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete Made with Thirteen Different Cements' Aggregates, Rilem Synpo. Paris, 1959
- [6]U.J. Counto: The Effect of the Elastic Modulus of the Aggregate on the Elastic Modulus, creep and creep recovery of concrete, MCR.16, 1964
- [7]若林 実：コンクリートのヤング係数に関する材料の影響について，日本建築学会論文報告集，No.66，1960
- [8]O. Ishai: Influence of Sand Concentration on Deformations of Mortar Beams Under Low Stress, J. of ACI, Vol.58, No.6, 1961

- [9]T.C. Hansen: Influence of Aggregate and Void on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Past, J. of ACI, Vol.62, No.2, 1965
- [10]T.C. Powers, T.L. Brownard: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Pastes, J. of ACI, 1948
- [11]Akio Baba: Drying Shrinkage Mechanism of Building Materials, BRI Research Paper No.77, March.1978

Figure 10 Relationship between V_p and E_m

Figure 11 Relationship between V_a and E_c
(Fiber: chrysotile)

Figure 12 Relationship between V_a and E_c
(Fiber: polypropylene)

Figure 6 Experimental examination of composite laws on Young's modulus (overall test results)

Figure 7 Variation of predicted value

Figure 8 Experimental examination of composite laws on Young's modulus (influence of n) Figure 9 Experimental examination of composite laws on Young's modulus (influence of V_a)

[2000年4月20日原稿受理 2000年7月26日採用決定]