レジンコンクリートについて*

岡 田 清** 坂 村 晃***
村 井 信 夫*** 佐 藤 泰 敏***

Resin Concrete

by

Kiyoshi OKADA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Akira SAKAMURA, Nobuo MURAI and Yasutoshi SATO

(Sumitomo Electric Industries, Ltd., Osaka)

Resin concrete is now beginning to be used in our country as light weight structural material, electrical insulating material, or mixed materials such as adhesive mortar for repairing roads and anti-corrosive lining, but there has so far been no case of its having been used for structural purposes in civil engineering.

In its use as civil engineering structural material the major problems are concerning the manufacturing technique of large molds, its durability and fire resistance and the high cost of the materials.

We have investigated its composition and manufacturing process, and the solution of these problems will soon be found.

Resin concrete is superior to cement concrete in mechanical strength, chemical resistance, quick hardening and in many other respects. With the cooperation of NTT (Nippon Telephone and Telegraph), we are now testing the utility of resin concrete as materials for making manhole covers for communication cables, and are carrying out research and development projects of its application to many other practical uses.

In this paper we will show mainly the results of our research in polyester resin concrete.

(Received May 25, 1967)

1 緒 言

一般にプラスチックコンクリート (Plastics concrete) は次の二つに大別することができる。

- (1) ポリマーセメントコンクリート (Polymer cement concrete)
- (2) レジンコンクリート (Resin concrete)

前者は、結合材としてセメントを使用したセメントコンクリート系に、合成樹脂やゴム等の高分子物質 (Polymer) を添加して、引張り、衝撃などの機械的強度や接着力などを向上しようとするものであり、この場合ポリマーはエマルションの形で、セメントコンクリート配合系の中に混入されることが多い。

後者、すなわちレジンコンクリートは、結合材としてセメントをまったく使用せず、合成樹脂と増量材とのみから成るものである。したがって、硬化前の材料の状態・硬化の方法および成形硬化物の特性もセメン

トコンクリートとは異なっている。

レジンコンクリート (以下 Res. C と略) の特性をセメントコンクリート (以下 CC と略) と比較すると、次のようなすぐれた特徴を有している。

- (1) 曲げ、圧縮、引張強度が特に大きい。
- (2) 防水性、耐凍結融解性がすぐれている。
- (3) 硬化時間が広範囲にコントロールしうる。しかも硬化完了までの時間がきわめて短い。
- (4) 耐摩耗性がすぐれている。
- (5) 耐薬品性がすぐれている。
- (6) 電気絶縁性である。

その反面、結合材として有機材料を使用する関係上、現時点では、耐火性、耐熱性などが劣るのは否めない。

Res. C はすでにわが国でも、化粧用、標識用などの軽構造材、あるいは絶縁スペーサー、架台などの電気絶縁材料、道路補修用接着モルタル、耐食ライニング等に、漸次使用されているが、土木構造材料としては、その使用例をみることはできなかった。

筆者らは Res. C の結合材として、おもにポリエステル

* 原稿受理 昭和42年5月25日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 住友電気工業(株) 大阪市東区北浜5丁目

ル樹脂を用い研究を進めてきたが、一応構造材料として使用しうる見通しを得たのでここに報告する。

なお、説明の都合上、すでに発表した¹⁾一部を引用した。

2 樹脂の増量

樹脂への増量材の添加は、材料の体積あたりの価格を低下させ、また、得られた製品の耐久性、安定性および剛性の向上を図るために重要である。

増量の基本的な考え方、増量の限界、および増量と強度の一般的な関係について述べてみよう。

2・1 増量の限界

樹脂が増量される割合（増量比） a は、

$$a = \frac{\text{混合物の全体積}}{\text{樹脂の体積}} = \frac{1}{1-f}$$

ただし、 f = 充てん率 = 増量材の全量に対する体積比

充てん率 f は粒径が互いに等しい球の場合は、理論的に最大充てん率 $f_{\max}$ は0.74となるが、砂や石のような実際の増量材では、 $f_{\max} = 0.5 \sim 0.6$ ぐらいであり、ほとんどの場合0.55以下である。したがって、 $a > 2$ を達成するためには粒径が広範囲に分布している必要がある。

いま、

f_A = 増量材A、単独時の充てん率

f_B = 増量材B、単独時の充てん率

f_N = 増量材N、単独時の充てん率

とし、 $A \rightarrow N$ につれて、Fig. 1 のように粒径が急速に小さくなるとすると、増量比 a は

$$a = \frac{1}{(1-f_A)(1-f_B) \cdots (1-f_N)}$$

$f_A, f_B, \dots, f_N$ は約0.5ぐらいであるから、粒径の異なる N 種の増量材では、 $a = 1/0.5^N$ となる。¹⁾

このほか、骨材表面積より、結合材量を求める方法もあるが Res. C では、本式に従って最密充てんを考えるのが実用的である。

Fig. 1. Explanation pictures for loading.

2・2 増量と機械的強度

樹脂を増量すると、機械的強度は一般に増量比に逆比例して低下する。ガラス球を増量材として用いた実験 Table I¹⁾ に示すように、増量比 a を変えた場合、圧縮強度 σ_c は a に逆比例して小さくなる。

$a=2$ のとき、微粒を用いたものほど σ_c が大きい

が、 $a > 2$ になると単一粒度のみでは、成形品内に空隙が生ずるから、たとえ微粒を用いたものでも σ_c は小さくなり、粒径の大きいものを混入して、粒度分布を広くとったほうが σ_c は大きい。

また、充てん率 f を一定とし、ガラスの粒径を変えた場合は Fig. 2 のように粒径が小さくなるほど曲げ強度 σ_b が大きくなる。

Table I. Effect of glass sphere size, grain distribution and filling ratio on compressive strength.

Filling ratio		Compressive strength σ_c (kg/mm ²)			
Particle size (mm)	Filler quantity ratio	2	4	6	8
0.06~0.07	1	8.9	1.4	—	—
0.25~0.35	1	7.8	1.5	—	—
0.07 0.35	0.5 1	—	3.0	1.1	0.4
Same as the above	0.4 1	—	3.6	1.1	0.6
Same as the above	0.3 1	7.9	3.1	1.3	0.8
0.07 0.35 1	0.25 0.5 1	—	3.4	1.7	0.8
Same as the above	0.16 0.4 1	7.6	2.8	1.0	0.6

Note: Sample size, 40mm ϕ ×80mm.

Fig. 2. Glass sphere size and flexural strength.

2・3 増量と圧縮弾性率

増量材の弾性率 E_A^{*1} は樹脂の弾性率 E_R^{*2} より、も

*1 E_A は増量材により異なり、また同種材間でもばらつきが多いが、石灰岩、3700kg/mm²、花コウ岩、3700kg/mm²、大理石、6400kg/mm²程度である

*2 E_R はほぼ 400kg/mm²

一般的には大きいので、Res. C の圧縮弾性率は E_R と E_A との中間にある。弾性率の異なる物質の混合物の弾性率については各種の報告があり、類似の関係から誘電率の異なる 2 物質の混合体の誘電率の解や、溶液粘度などからも弾性率は類推しうるが、これらによると増量材の粒径は弾性率に無関係である。

いま、樹脂 R と増量材 A とを充てん率 F で混合した M の模型 Fig. 3 を考えると、X 軸に軸が平行な微小底面積 ($\Delta Y \Delta Z$) の角柱は、いずれも充てん率は F にほぼ等しく、粒子が大きくなった極限 Fig. 3 (a) における M の弾性率 E は、

$$E' = \frac{E_R \cdot E_A}{E_R \cdot F + E_A(1-F)}$$

Fig. 3 (b) のように粒子が小さく、数が多くなった場合は、粒子相互間にできる橋渡し空隙や粒子の表面

Fig. 3. Elasticity model of mixture.

凹部にはいった樹脂は増量材 A の弾性率に支配されて変形し、あたかも充てん率が増加したような弾性率を示すであろう。したがって、見掛け充てん率を F' とすると、

$$F' = F \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right)^3$$

と補正できる¹⁾。ただし、増量材の平均粒径 $= 2r$ 、見掛けの平均粒径 $= 2r' = 2(r + \Delta r)$ 。

さて、さきに述べたように $E_A \gg E_R$ であるが、Fig. 1(c) のように樹脂の 1 部分を粒径の小さい増量材 B、C で置き換えると、A 以外の部分の弾性率は E_A に近づく。混合物全体の弾性率が等しいと、外力が加わったとき、特定点に応力の集中がなく、弱点を生じない。したがって弾性率の点からも、数段階の粒径の増量材の組合せや微粒子の使用が必要となる。

3 レジンコンクリートに使用する材料 および実用配合

3.1 材料

3.1.1 樹脂 結合材として不飽和ポリエステル樹脂・エポキシ樹脂、フラン樹脂などを使用する。これらはいずれも、硬化前は常温で液状で、容易に増量材と混合することができ、しかも、硬化後は熱や溶剤で軟化や膨潤をしない安定な固体になることを特徴としている、特に不飽和ポリエステル樹脂を用いると、

Res. C を作る上に次の利点がある。

- (1) 種々の粘度に調節できる。したがって増量比が任意に選べ、また成形が容易である。
- (2) 硬化方法が容易。したがって硬化時間を調節しやすい。

しかし、ポリエステル樹脂はエポキシ樹脂と比べ、硬化収縮率が大きく、製造時に成形品にき裂を生じやすい欠点があるので、配合系や成形方法を調節して収縮率を小さくし、あるいは収縮時の応力集中を避けるような形状を決める等、注意しなければならない。^{*3}

3.1.2 増量材 増量材は CC と同様、砂、砂利、軽量骨材等のほかに、炭酸カルシウム、石粉等の微粉末を使用する。CC の場合は、セメント粒子自体が微粒子の働きをもっており、充てんや作業性に寄与しているが、Res. C は、結合材である樹脂が液状であるために、微粉末を使用して、同効果や特性向上を図る。

なお、Res. C は脂合材として疎水性の樹脂を使うので、増量材に水分を含まないことが必要である。含水率と強度の関係を Fig. 4 (a) に示す。塩分、重油などの不純物の影響は Fig. 4(b) および(c) に示すように少なく、CC の挙動とは異なる。

3.2 配合と特性

Res. C の配合設計はさきに述べた増量の概念に基づくが、実用配合は、製品の使用目的、要求特性、作業性およびコスト等により決定される。

ポリエステル樹脂・炭酸カルシウム・砂・砂利（最大骨材寸法 20mm）混合系における配合と特性とは次の関係にある。

3.2.1 樹脂含有率と特性 樹脂を 8～12% の範囲に変えると、Fig. 5 に示すように樹脂量の増大に伴って強度が向上した。樹脂の量が増すと、Res. C の成形性がよくなり、充てん不良や気泡などが減少して強度向上するが、さらに樹脂が 12% 以上に増すと分離、収縮、そりなどが顕著になる。したがって強度、作業性等を全部考えると樹脂は 9～11% の範囲がよい。

3.2.2 微粒子の量と特性 微粒子として炭酸カルシウムを使用し、50～150 PHR (Parts per hundred resin) の範囲に添加量を変えたとき、炭酸カルシウム量の増大に伴って強度は Fig. 6 のように向上した。炭酸カルシウムの増加とともに粘性や流動性が大きくなって作業性が変わるが、この配合系では 120 PHR 前後がよかった。

3.2.3 砂、砂利の粒度分布と特性 細砂 (0.8mm 以下)、粗砂 (5 mm 以下)・砂利 (最大寸法 20 mm)

*3 CC では増量材を一般に骨材と呼ぶが、本文ではさきの増量の項と統一するために、増量材と言う

Fig. 4. Effects of impurities involved in resin concrete on mechanical properties (Resin concrete is Type C in Table II).

Fig. 5. Resin content and mechanical strength of resin concrete.

Fig. 6. Filler (Calcium carbonate) content and mechanical strength of resin concrete.

Fig. 7. 0.8mm dia. fine sand content and mechanical strength of resin concrete.

Fig. 8. Ratio of coarse sand to gravel and mechanical strength of resin concrete having the constant fine sand content.

細砂の量が25~30%付近で強度最大と推定できた。また、細砂の量を一定にして粗砂と砂利の比率を3/1, 1/1, 1/3と変えると強度は Fig. 8 のようになり、1/1 近くで最大となった。

これらは、統計的手法を用いて実験したものであるが、以上を全体に対する百分率としてまとめた結果、次の実用配合を得た。

樹脂	9~11%
微粉末	10~13%
細砂	20~24%
粗砂+砂利	52~60%

4 ポリエステルレジコンクリートの特性

4.1 硬化特生

の3骨材混合系の中で細砂が占める割合を変えると、強度は Fig. 7 のように変化し、特に総骨材に対する

Res. C は Fig. 9 に示すように、温度範囲が $-5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ に変わっても、触媒・促進剤の量によって比較的任意に硬化時間を調節することができる。

また、ポリエステル樹脂の硬化反応はすみやかであるので、生コンクリートが硬化し、最終性能が得られるまでの時間が短い。Fig. 10 は曲げ強度と材令（室温養生時間）との関係を示す例で、CC が 4°C 以下では作業が阻害されることや、最終性能を得る時間が長いことに比べてすぐれている。

なお、ポリエステル樹脂は硬化収縮が約3%（線収縮）あり、 $S=S_r(1-F)$ とすると、樹脂含有率が10%の Res. C ($F=0.8$) では、収縮率は0.6%となる。すなわち、実際には、増量材や補強鉄筋により、あるいは構造上各種の拘束を受けて、収縮が妨げられる。この場合、Res. C には残留応力が発生するが、筆者らの測定では約 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ の応力が発生していた^{*4}。

4・2 Res. C の諸特性

4・2・1 機械的性質 Table II に4種類の Res. C の曲げ強度、圧縮強度を示す。Type A,B,C は、ポリエステル系、D はエポキシ系で、AおよびBはレジンモルタル、Cは増量材の最大粒径が20mmのRes. Cである。Type C の配合は前項の実験結果に基づいて

Fig. 9. Gel-time properties of resin concrete.

Fig. 10. Change of flexural strength with ages.

Table II. Flexural and compressive strength of typical four resin concretes.

Type	A (Resin mortar)	B (Resin mortar)	C (Resin concrete)	D (Resin concrete)
Resin	Polyester	Polyester	Polyester	Epoxide
Max. size of aggregate (mm)	0.8	5	20	20
Combination (%)				
Resin	20	12	10	10
Filler (CaCO_3 powder)	30	12	12	12
Aggregate (Sand, gravel etc)	50	76	78	78
Flexural strength (kg/cm^2)	350~400	250~300	170~210	170~220
Compressive strength (kg/cm^2)	1300~1500	1000~1500	800~1200	800~1200

*4 下記略図のようなブロックを成形し、室温で1ヶ月間放置後、図A-A'部分のRes. Cを切断したところ、鉄筋に 588×10^{-6} のひずみが発生した。鉄筋の弾性率を $2.1 \times 10^6 \text{kg}/\text{cm}^2$ とすると、鉄筋の残留応力は、 $1240 \text{kg}/\text{cm}^2$ したがってRes. Cが一様に引張りを受けているとすれば残留応力は $10.9 \text{kg}/\text{cm}^2$ になる。

Table III. Mechanical properties of polyester resin concrete.

Resin concrete is Type C in Table II

Properties	Strength (kg/cm^2)
Compressive strength (JIS A 1114)	800~1200
Tensile strength (JIS A 1113)	100~120
Flexural strength (JIS A 1106)	170~210
Flexural Young's modulus (Initial tam.)	$3.0 \sim 3.5 \times 10^6$
Dynamic Young's modulus	$3.5 \sim 3.7 \times 10^6$
Shear strength	100~120
Bonding strength to steel wire	100~120

いる。Type A, B, C を比べると、樹脂含有率が多いものほど曲げ強度、圧縮強度が大きいが、製造時の寸法安定性、劣化特性、経済性などから、Type C が大型構造材用として適している。

Table III に Type C の機械的強度を示す。曲げ強度、約180kg/cm²、圧縮強度、約1000kg/cm²、引張強度、約100kg/cm²と CC の3～5倍程度の強度がある。

なお、強度試験片の破壊断面 Fig. 11 をみると、

Fig. 11. Failure surface of resin concrete (Resin concrete is Type C in Table II).

増量材と結合材の界面はく離でなく、増量材が破壊しているのが認められる。Res. C は合成樹脂の増量材に対する結合力がセメントと比べ大きいので、Res. C の強度は増量材の破壊強度に左右されることがわかる。

4・2・2 透水性、吸水性 Fig.12(a)および(b)に円筒供試体の外周から圧力水をかけて、透水量を測る方法および円板供試体の厚さ方向に圧力水をかけて測る方法をそれぞれ示す。Type C の Res. C について測定した結果、方法(a)では10kg/cm²および20kg/cm²水压で、おのおの48時間測定後も透水量は0ccであった。さらに試料を割裂して水の浸透深さを調べても、透水は認められなかった。方法(b)の測定でも透水はなかった。

また、100×100×380 mm ブロック (約8 kg) を煮沸して重量増加を測定したところ、吸水率は200時間

Fig. 12. Measurement principle of permeability of water.

Table IV. Resistance of concrete specimens* to rapid freezing and thawing in water.

(a) Test results of dynamic modulus of elasticity (Fundamental transverse frequency)

E_p before test ($\times 10^3 \text{kg/cm}^2$)	Relative modulus of elasticity (%)									
	30 $\sim$	60 $\sim$	90 $\sim$	120 $\sim$	150 $\sim$	180 $\sim$	210 $\sim$	240 $\sim$	270 $\sim$	300 $\sim$
337 343 322 347	101 101 101 102	101 102 101 102	101 102 101 102	101 102 101 102	101 102 101 102	101 102 101 102	101 102 101 102	102 102 101 102	102 102 102 102	102 102 102 103

(b) Test results of dynamic modulus of elasticity (Fundamental longitudinal frequency)

E_p before test ($\times 10^3 \text{kg/cm}^2$)	Relative modulus of elasticity (%)									
	30 $\sim$	60 $\sim$	90 $\sim$	120 $\sim$	150 $\sim$	180 $\sim$	210 $\sim$	240 $\sim$	270 $\sim$	300 $\sim$
339 344 328 348	102 102 103 100	104 103 104 101	105 105 104 101	105 106 104 102	105 106 105 102	105 106 105 102	105 106 105 102	105 106 105 102	105 106 105 102	106 106 105 103

(c) Test results of reduction in weight

Weight before test (kg)	Reduction in weight (%)									
	30 $\sim$	60 $\sim$	90 $\sim$	120 $\sim$	150 $\sim$	180 $\sim$	210 $\sim$	240 $\sim$	270 $\sim$	300 $\sim$
8.438 8.570 8.410 8.626	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0.1 0 0 0	0.1 0 0 0.1	0.1 0 0 0.1	0.1 0 0 0.1	0.1 0 0 0.1

* Size of test specimens: 10×10×40cm

で0.17%, 400時間で0.31%であった。

4・2・3 凍結融解性 ASTM C 290-63T (水中における急速凍結融解に対するコンクリート供試体の抵抗試験方法) に準じて、凍結融解試験を行ない、動弾性係数(たわみ振動, たて振動)および重量減を測定した。

試験結果は Table IV (a),(b),(c) にそれぞれのたわみ振動, たて振動による動弾性係数ならびに重量減を示したが, 300 サイクル終了後も動弾性係数の減衰および重量減は認められなかった。

また, 供試体表面の状態は凍結融解180サイクル頃, 部分的な離れがわずかにあったのみで試験前と大差なく, すぐれた防食効果を示した。

4・2・4 耐水性 土木構造材料では特に耐水性が必要であるが, セメントが水に対して無反応であるのに対し, Res. C は結合材が水と加水分解, その他の反応を起こして劣化することが考えられる。

耐水性を判定する方法は, 通常の水中に浸漬する方法のほか, 促進実験として温度を上げるとか, pH を変える等がある。Res. C は樹脂と増量材とから成る複合体であり, 特性は各使用材料の性能と, 両者の結合に帰因するので, ポリエステル系の場合およそ 120℃以下では, 同じ反応機構で劣化が進行すると考えられ, 煮沸促進実験によって長期耐久性を判定した。

Type C の Res. C を沸騰水に1000時間浸漬し, 曲げ強度の経時変化を調べた結果を Fig. 13 に示す。1000時間後において, 約150kg/cm²の強度を維持(保持率, 約75%以上)し, 従来と比べるとかなり長期に寿命を延長できた。

Fig. 13. Flexural strength retained after boiling test.

4・2・5 耐薬品性 3% H₂SO₄, 1% NaOH 水溶液に3ヶ月間 Res. C を浸漬したときの強度変化をFig. 14に示す。

Fig. 14. Chemical resistance of resin concrete.

Fig. 15. Change in flexural strength with time in air oven at 100°C.

(Resin mortar is Type B in Table II)
Test specimen is heated in oil bath for 40min. Test is conducted immediately after its removal from oil bath

Fig. 16. Deterioration of mechanical properties of resin concrete at elevated temperature.

3ヶ月後も強度低下は認められない。耐酸性の面でCCが使用できない構造物でも, Res. C では条件しだいで使用できるであろう。

4・2・6 耐熱性 100℃ 恒温槽に1000時間放置したときの曲げ強度の経時変化を Fig. 15 に, また温度特性(熱間強度)を Fig. 16 に示す。

4・2・7 耐火性 Res. C は結合材として樹脂を使用するので, 耐火性は本質的な問題であり, 火災などによって, 全面を長時間加熱した場合は結合材が燃焼して, 全体が崩壊する危険がある。トーチランプ等で部分加熱された場合でも, 長時間では炎によって表面が劣化することがあるが, その危険が大きい場合には,

*5 従来, 20mm 骨材混合系の場合, 約100時間で 150kg/cm², 1000時間煮沸後は 50kg/cm² 程度に低下した。煮沸促進条件と常温浸漬の関係は, 現在実験中であるが, MIL-Spec^② では, FRP の wet condition として2時間煮沸を1ヶ月浸水に相当させている例がある

Fig. 17. Compressive strength of resin concrete after accelerated weathering by weatherometer.

Fig. 18. Procedure of fatigue test.

Fig. 19. S-N curve of resin concrete.

Fig. 20. S-S curve of resin concrete after fatigue test.

Fig. 21. Cross section of resin concrete block man-hole.

Fig. 22. Resin concrete block man-hole.

Fig. 23. Resin concrete segment for water pipe.

Fig. 24. Resin concrete pipe.

Left, solid type using resin concrete
Right, air insulated type

Fig. 25. Bus ducts (600Amp).

Fig. 26. Distance mark.

簡単なしゃへい板で防護することにより実用に供しうる。

4・2・8 耐候性 Fig. 17に Res. C をウエザオメー 2 000 時間照射したときの強度変化を示す。

ポリエステル樹脂が紫外線によって黄変するので、白色系の Res. C では変色が目だつ。

4・2・9 疲労特性 Fig. 18 の方法で Type C の Res. C の曲げ繰返し疲労実験を行ない、Fig. 19を得た。S-N曲線は静的曲げ強度の90, 80, 72, 57%応力度で測定した結果であるが、図によると耐久限応力度は初期応力の60~70%であることがわかった。また、Fig. 20は72%と57% 応力度で200万回繰返しを行なった試料の S-S 曲線を示したもので、弾性率の低下や、大きな永久ひずみは認められない。

5 ポリエステルレジンコンクリートの応用例

以上述べたように Res. C は機械的強度、耐薬品性、電気絶縁性、硬化方法などにすぐれた特徴を有しており、以下のような製品を開発中である。

Fig. 21, 22 にブロックマンホールの形状と写真を示す。また、Fig. 23~26 に示すセグメント、送水管、充実型バスダクト、標識類などがある。

6 結 言

Res. C の特性について、筆者らが検討した結果を中心に述べたが、構造材料として検討の日も浅く、特性向上について引き続き研究中である。

Res. C には CC にみられない特徴があり、しかも耐久性も初期のものより著しく改良されている。高分子化学工業の発達に伴って、原料コストも低減の機運にあり、今後構造材料としての利用を検討するに値する材料と言えよう。

最後に Res. C の研究、開発にあたり、ご指導賜わった日本電信電話公社技術局伊藤和五郎調査役、および開発に種々ご協力賜わった熊谷組松下邦治郎取締役をはじめ社内外の諸氏に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 村井信夫, 接着, **7**, 509 (1963).
- 2) 竹下春見, 岩間 滋, “道路舗装の設計”, p. 28 (1960) オーム社
- 3) Hirsch, T.J., J. Am. Concrete Inst., **59**, 427 (1962).
- 4) Hashin, Z., ASME paper, 62-WA-39, 1 (1961).
- 5) 村井信夫, 接着, **7**, 594 (1963).
- 6) MIL-SPEC, F-9084A, Fabrics, woven glass, finished, for plastic laminates.
- 7) 伊藤和五郎, 山田恵男, 坂村晃, 土木学会第22回年次学術講演会講演概要集, 第4部, No. 57 (1967).