

[1109] ポリエスティル REC 硬化収縮と拘束応力

NGUYEN VAN LOI *¹ 内田 裕市*² 林 富士男 *³ 小柳 治*⁴

1. はじめに

レジンコンクリート（RECと略）は水密性、耐薬品性、早強性、耐摩耗性等の性状に優れた材料であり、また特に曲げ強度、引張強度が高く軽量化ができる。しかし、結合材に不飽和ポリエスティル樹脂を用いたRECでは、鋼材のような補強筋を用いると、RECの硬化時収縮が拘束されてRECに内部引張応力が発生し、従って曲げひび割れ耐力が減少することが知られている。RECの収縮特性についてもある程度の検討がされている¹⁾。ここでは、RECの硬化時の経時的な特性の変化の状況をより明確にすると共に、補強材比を変化させたRECはりを作成し、RECの硬化時の収縮によって補強材に導入されるひずみの発生状況に加え、補強RECはりの曲げひびわれ発生強度から、硬化収縮時の拘束の影響についての検討結果を述べる。

2. 実験概要

2-1. 使用材料と配合

結合材である樹脂には不飽和ポリエスティルを用いた。粗骨材(M.S.=10mm)、細骨材(F.M.=1.6)、充填材(炭酸カルシウム)は乾燥状態のものを用いた。なお、触媒にはMEKPOを、促進剤にはナフテン酸コバルトをそれぞれ2.4phr用いた。RECの配合を表-1に示す。

補強材には長さ1350mmで径の異なる3種類のPC鋼棒を用いた。

PC鋼棒は固定のため両端にネジ

切りを行った。練り混ぜは容量200lのミキサーを用い3分間行った。打設時の室温はほぼ10°Cであった。

2-2. 実験方法

RECの硬化収縮により鋼材に導入されるひずみを、図-1示すような角柱供試体で測定した。供試体寸法は12×10×130cmであり、断面の中央に1本のPC鋼材を配置した。PC鋼材はφ9.2、φ13およびφ15mmであり、それらの補強材比はそれぞれほぼ0.5、1.0および1.5%である。RECの温度をはりの中央に埋め込んだ熱電対で、RECの収縮に伴う鋼棒に導入される拘束応力を、鋼棒中央

表-1 RECの配合

材料	樹脂	砂利	砂	充填剤
質量比	1	: 4.44	: 1.8	: 1.8

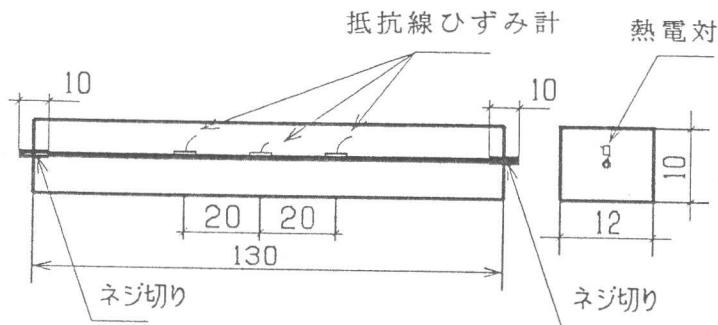


図-1 鋼材ひずみ及び温度測定 単位: cm

*1 岐阜大学大学院工学研究科、土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学助手、工学部土木工学科、工博 (正会員)

*3 (株)サンレック

*4 岐阜大学教授、工学部土木工学科、工博 (正会員)

と左右20cmの位置に貼り付けた3枚の抵抗線ひずみ計(ゲージ長2mm)により1ゲージ3線式法でRECの練り混ぜ開始後24時間にいたる迄自動的に計測した。供試体は各補強材比について2本ずつとした。

RECの収縮は角柱供試体($10 \times 10 \times 40\text{cm}$)を用いてコンタクトゲージにて検長200mmとして測定した。さらに、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体を用いて、共振法により動弾性係数および対数減衰率の経時変化を求めた。

各種強度試験はJIS A 1183～1185によって行った。供試体は、曲げ試験は $6 \times 6 \times 24\text{cm}$ 、圧縮強度はその折片、引張強度は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ であり、各3本を用いた。

補強RECはりの曲げ強度試験はスパン($40+10+40\text{cm}$)とし、容量100tonfの万能試験機を使用した。載荷は材令18日で、供試体に曲げひびわれが生ずるまで行った。

3. 結果と考察

表-2 RECの力学的性質

強度 (kgf/cm ²)			動弾性係数 (kgf/cm ²)		対数減衰率	
圧縮	曲げ	引張	24h	9days	24h	9days
1080	231	99.3	2.99×10^5	3.18×10^5	0.078	0.049

表-3 RECはりのひずみと曲げ強度

記号	鋼材径 (mm)	鋼材比 (%)	最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
0905	9.2	0.55	1480	185
1310	13	1.10	1000	157
1515	15	1.47	890	152
REC	-	-	24h 2790 9d 2900	194

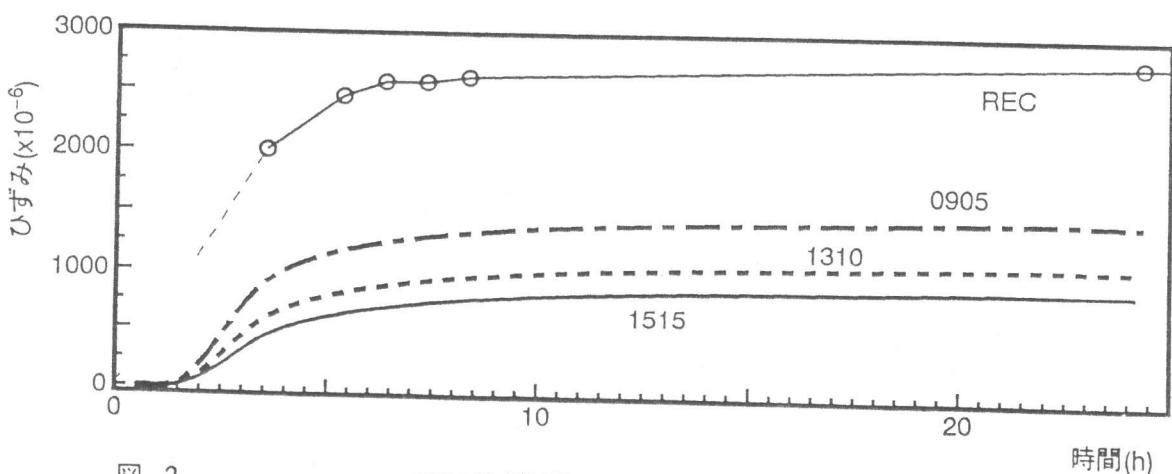


図-2 REC及び補強RECはりの鋼材ひずみの経時変化

RECの力学特性を表-2に示す。各種強度試験は材令18日の結果である。動弾性係数ならびに対数減衰率は、材令24時間に加えて材令9日のものを示す。これらより材令24時間以後も若干反応が進行していることがわかる。

補強材を用いたはりの試験結果を名称と共に表-3に示す。鋼材ひずみは24時間まで計測したが、21~22時間後に最大値を示し、それ以後は気温の変動の影響が現れた。ひずみの計測値にはばらつきが少なかったため、表の値は供試体2本の合計6点計測値の平均である。参考のため、コンタクトゲージで測ったRECの収縮ひずみを材令9日を加えて同時に示す。

RECのゲル化開始時間は練り混ぜ開始後約35分であった。まず無補強REC及び各補強RECはりの鋼材ひずみの経時変化を図-2に示す。これより、練り混ぜ開始後60分まではひずみはほとんど発生せず、70分程度から生じている。また、ひずみは鋼材量の増加につれて小さくなる。RECの収縮は初期に大きく、練り混ぜ開始後3時間で24時間収縮量の約70%に達した。

図-3に各補強RECはりの温度及び計測時の室温の経時変化を示す。早い時期から反応熱により温度が上昇し、3時間位で最大になり、その後は熱放散により温度が低下し、15時間程度で室温と同一となる。補強RECはりの最大温度は室温より10°C以上高かった。

図-4にRECの動弾性係数(Ed)の経時変化を示す。REC練り混ぜから1時間をすぎてからEdの計測が可能となり、その後急激にEdは増加し、24時間の値に対し2時間で約50%、4時間で約85%に達した。図-5にRECの対数減衰率(δ)の経時変化を示す。 δ はEdと逆に時間の経過と共に急速に減少し、4~5時間以降の減少は緩やかとなった。

次に補強RECはりの初期性状の変化を見るため、練り混ぜ後5時間までの状況をみる。まず図-6に温度の上昇速

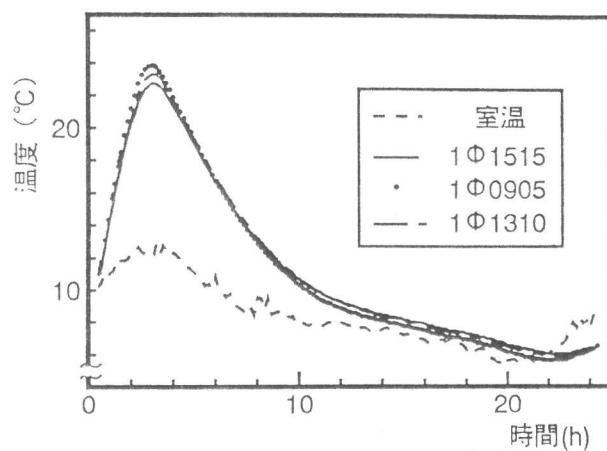


図-3 補強RECはりの温度変化

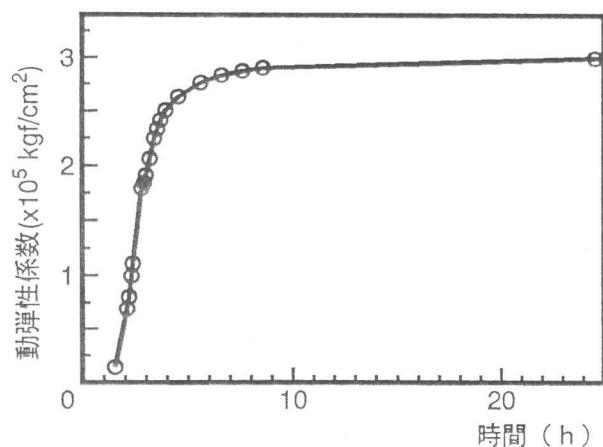


図-4 RECの動弾性係数の経時変化

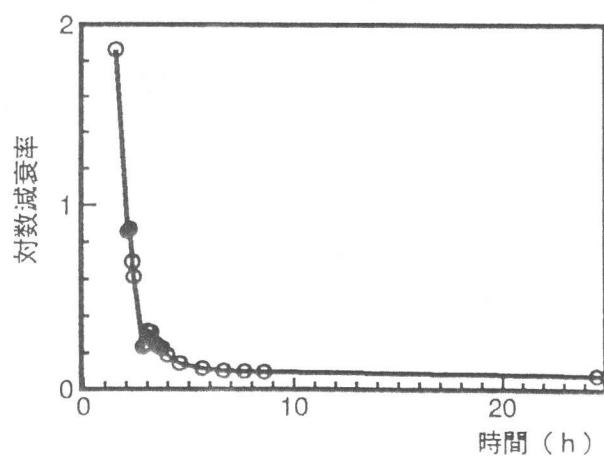


図-5 RECの対数減衰率の経時変化

度を示す。これより、発熱は早期から始まり1時間後までほぼ一定値で推移する。発熱のピークは30分程度とみられる。その後室温が低いため熱放散により温度は徐々に下がり、3時間で温度上昇速度は0になっている。

図-7に各補強RECはりの鋼材のひずみの増加速度の経時変化を、また図-8に動弾性係数の増加速度の経時変化を示す。鋼材のひずみの増加速度はREC練り混ぜ開始後70分程度から急速に増加し、約3時間後に最大となる。鋼材のひずみの増加速度は鋼材比が低い方が大である。しかし、鋼材比にかかわらず増加速度が最大値を示す時間には顕著な差は見られない。一方、動弾性係数の増加速度の傾向を見ると、連続的に測定されていないため鋼材ひずみのものに比べると図示された結果が滑らかではなく計測値の出現する時間も遅れるが、両者の曲線は類似している。動弾性係数の増加速度の最大値を示す時間は鋼材ひずみの増加速度のものとほぼ同程度であろう。

以上より、RECの初期性状の発現には時間差がみられ、まず温度が上昇しついでRECの収縮が生じはじめ、その後に動弾性係数と共に鋼材ひずみが増大する。

表-3に各補強RECはりの曲げ強度試験結果およびRECの曲げ強度を示す。ここで、RECの曲げ強度は補強RECはりと同じはり高さの供試体($10 \times 10 \times 40\text{cm}$)の3等分点載荷から求めたものである。はり試験時平均温度は 10°C である。

図-9に鋼材ひずみの最大値と鋼材比との関係を示す。この図から鋼材比が増加すると最大ひずみが低下すると共に、補強材の有無によってひずみが大きく異なることがわかる。

ここで平面保持を仮定して、鋼材によってRECの硬化収縮が拘束されることによる引張応力を求めてみる。鋼材ひずみ(ε_s)と補強RECはりのひずみ(ε_R)が等しいとすると、力のつり合

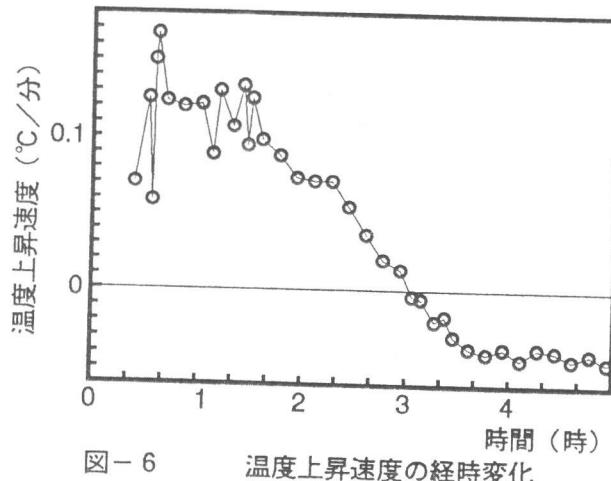


図-6 温度上昇速度の経時変化

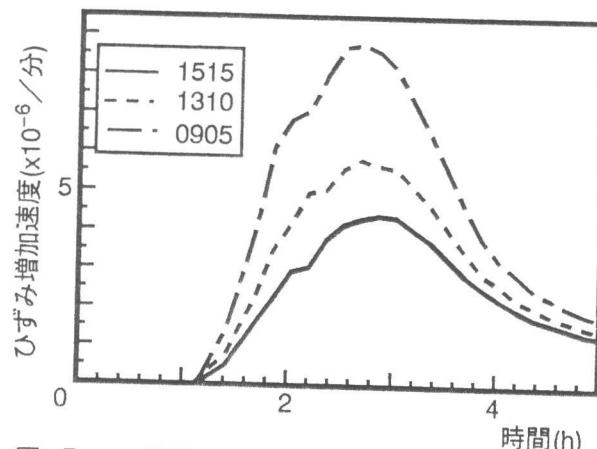


図-7 鋼材ひずみの増加速度の経時変化

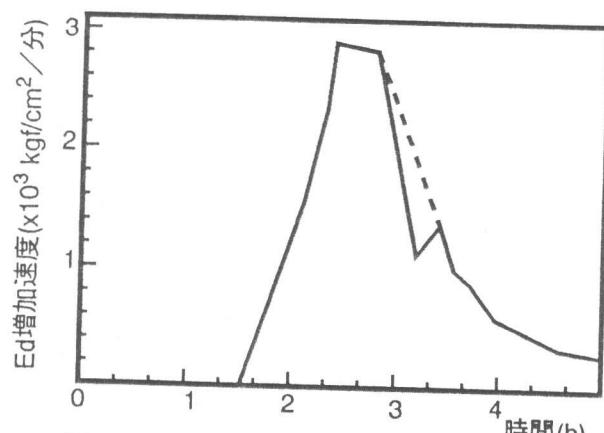


図-8 動弾性係数增加速度経時変化

いからRECに導入された引張応力 σ_R は

$$\sigma_R = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s / A_R \quad (1)$$

ここに

E_s 、 ε_s は鋼材の弾性係数及びひずみ
 A_s 、 A_R は鋼材およびRECの断面積

図-10に、上式で算定されたはりに導入される引張応力と鋼材比の関係を平均値と範囲で示す。鋼材比とRECの導入応力には線形関係がみられる。この導入応力が補強RECの曲げ強度に影響すると考えられる。

図-11にははりの曲げ強度と鋼材比との関係を示す。また、図-12に曲げ強度と導入応力の関係を示す。曲げ強度にはばらつきはあるが鋼材比の増加につれてある程度線形的に低下している。一方、導入応力が増加すると曲げ強度が低下するが、両者のばらつきを考慮してもその間には線形関係はみられない。

ここで、補強筋による収縮拘束の影響を検討する上で、補強RECはりの曲げ強度 (A) とRECの曲げ強度 (B) の差すなわち (B-A) を曲げ強度低下量とする。

図-13に曲げ強度低下量と鋼材比の関係を、また図-14に曲げ強度低下量と導入応力との関係を示す。これらの図より、鋼材径が小さくなるに従って、鋼材比が低く導入応力が小さい場合には、曲げ強度の低下量が相対的にも小さいことを示している。これは、補強材による拘束収縮を3次元的に取り扱う必要があることを示唆していると考えられる。なお、図-14において、導入応力よりも曲げ強度低下量が大である理由は、ここで用いた導入応力が練り混ぜ後24時間の値を用いて算定したものであり、はり試験時までになお収縮が増進し鋼材ひずみが大きくなっていたことが挙げられる。

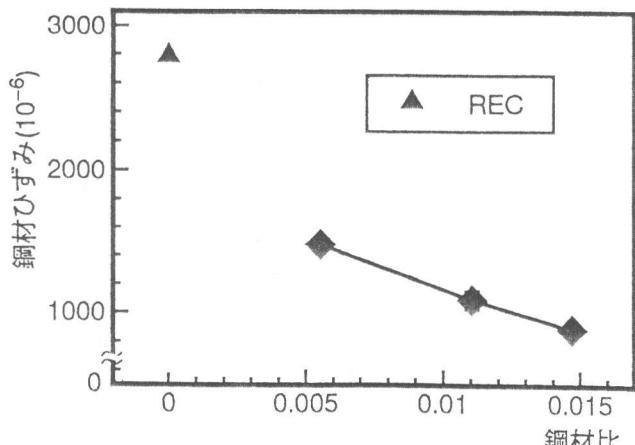


図-9 最大鋼材ひずみ-鋼材比の関係

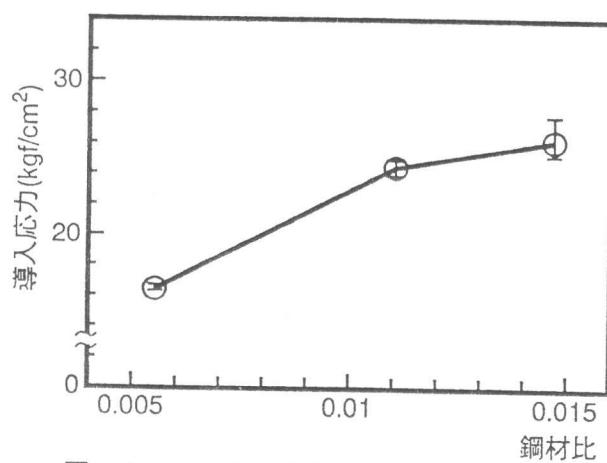


図-10 導入応力-鋼材比の関係

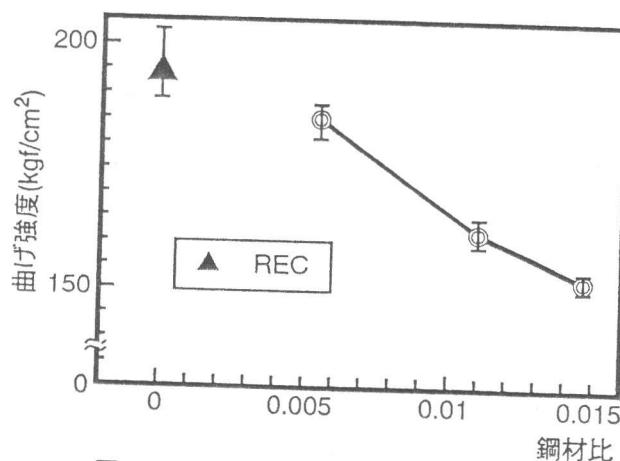


図-11 曲げ強度-鋼材比の関係

4. 結論

RECの硬化時の収縮によって補強材に導入されるひずみの発生状況に加え、硬化収縮時の拘束の影響についての実験的検討を行った。得られた主な結論を以下に述べる。

- 1) RECの初期性状の発現には時間差がみられ、まず温度が上昇しついでRECの収縮が生じはじめ、その後に動弾性係数と共に鋼材ひずみが増大する。
- 2) REC練り混ぜ開始後60分以内では鋼材にはひずみはほとんど発生せず70分以後から生じた。また、ひずみは鋼材量の増加につれて小さくなる。
- 3) RECの発熱は早期から始まり3時間後に温度は最大となった。
- 4) REC練り混ぜ開始後1時間をすぎてから動弾性係数の計測が可能となり、24時間の値に対し2時間で約50%、4時間で約85%に達した。対数減衰率は動弾性係数と逆に急速に減少し4~5時間で一定値に近づく。
- 5) 鋼材ひずみの増加速度は約3時間後が最大であり、また鋼材比が低い方が大である。
- 6) 鋼材比とRECの導入応力には線形関係がみられた。鋼材比あるいは導入応力が増加すると曲げ強度は低下するが、曲げ強度低下量は鋼材比あるいは導入応力が小さい場合には相対的に小さく、収縮拘束の2次元的な解析の限界が考えられる。

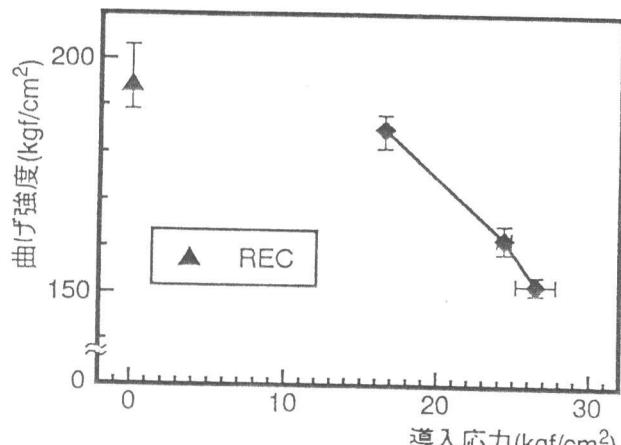


図-12 REC導入応力-曲げ強度の関係

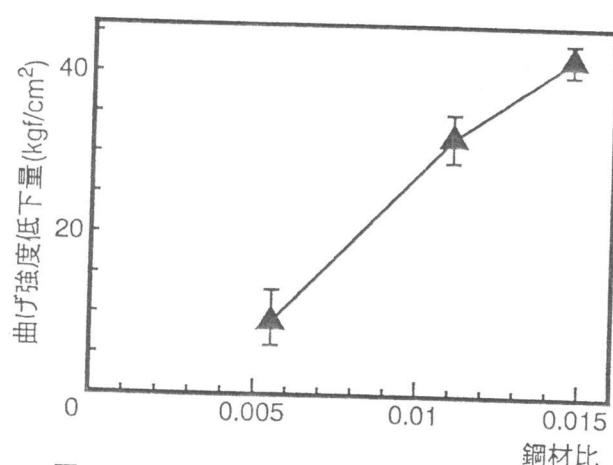


図-13 曲げ強度低下量-鋼材比の関係

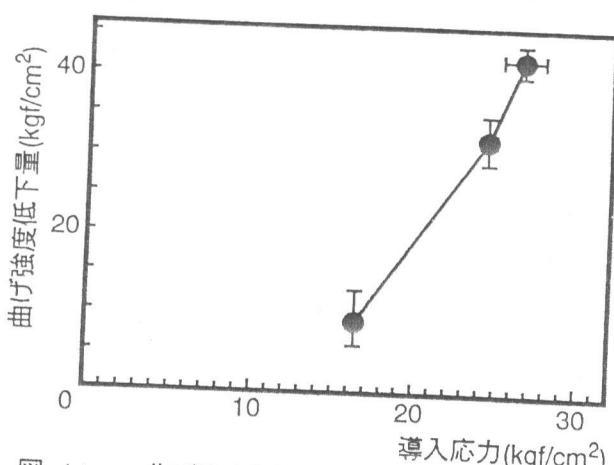


図-14 曲げ強度低下量-REC導入応力の関係

参考文献

- 1) 小柳 治、大野 定俊、村井 信夫、林 富士男；RECの収縮性状と補強筋による拘束応力の発現、コンクリート工学年次講演論文集、pp. 241-244, (1980)