

PC と 新 材 料

小 林 一 輔*

1. は し が き

建設分野において新素材や新材料が使用されるケースは比較的少ない。新素材を例にとると、当初から建設の分野への利用を考えて開発されたものは皆無に近く、他分野におけるニーズにこたえて新素材の利用方法を探すという受身の状態に置かれること、新素材と組み合わせるか、代替される既存の材料のコストが安すぎるなどがある理由として考えられる。

このような意味では既存の材料のコストも考慮しつつ異種の素材を組み合わせるユーザーの要求にこたえようとする複合材料の方が実用に結びつく可能性が大きい。

本文では PC の分野における新材料として繊維強化プラスチック (FRP) 製緊張材と連続繊維強化複合材料製防食パネルを取りあげるが、これらはいずれも上記の性格を有する複合材料であり、目的とするところは耐久性の改善である。近年、海岸などの海洋環境に設置されている PC 橋の緊張材の塩分腐食による劣化事例や水素脆性割れによる建物ドームの崩落事故¹⁾などが発生している。

そのような劣化を防止するとともに、大規模な海洋浮体構造物のような新分野への進出を狙ったものが、上記の複合材料の適用である。

2. FRP 製緊張材

2.1 概 要

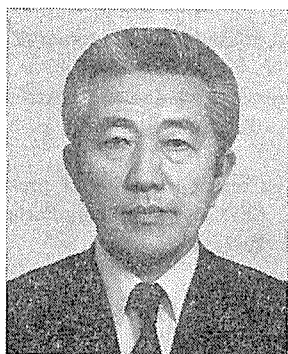
近年、宇宙・航空や自動車などの分野を対象として、続々と軽量で高張力の繊維素材が開発されており、これらの繊維の性能を効果的に活用するための FRP の成形

技術も格段の進歩をとげている。このために、重量は鋼材の 1/5~1/6 で引張材としては高張力鋼にまさるとも劣らない性能を有する FRP 材が得られるようになってきている。FRP は塩分環境下においても鋼材のように腐食を生ずる恐れがないので、これを PC 用緊張材として利用しようとする動きが内外において活発化しており、すでに西独ではガラス繊維を用いた FRP を緊張材とした橋長 46.8 m、幅 15 m の 2 径間の中空床版橋がデュッセルドルフ市内に建設されている²⁾。

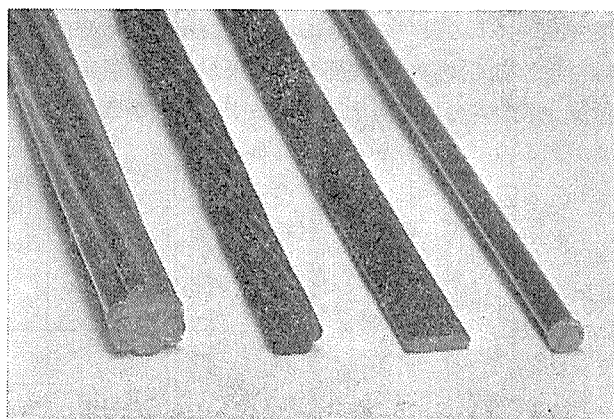
2.2 緊張材として FRP を用いる場合の問題点

緊張材として FRP を用いることを目的とした研究は 1950 年から 60 年代にわたり、米国、英国、ソ連、西独の各国において活発に行われている。これらの各国が、鋼材に代わる新しい PC 用緊張材として FRP をとりあげ、その開発研究に力を入れた最大の理由は、強化用繊維であるガラス繊維の高強度であった。ガラス繊維のモノフィラメント ($\phi 3 \mu\text{m}$) を真空中で試験したソ連の Aslanova は 1945 年に 3640 kg/mm^2 の引張強度が得られたことを報告しており、 1400 kg/mm^2 程度の引張強度のものは工業生産が可能であると考えられた。この場合、モノフィラメントを束にしてストランドやロービングの形態で使用しても 700 kg/mm^2 程度の引張強度が期待できそうであり、この値は冷間引抜鋼線で作られる 200 kg/mm^2 程度の値と比較した場合、極めて魅力のあるものであった。

しかし、以上の各国の開発研究は、1970 年代に入ってから FRP の新しい成形方法である Pultrusion 方法が開発されるまで足踏み状態になっていた。これは、一方向



* Kazusuke KOBAYASHI
東京大学生産技術研究所



写真—1 各種の一方向強化 FRP 材

強化 FRP に引張荷重を持続して加えた場合、断面内の個々の繊維には必ずしも一様な引張応力が生じないために、時間の経過とともに引張荷重が低下する現象、すなわち、“静的疲労”の壁にさえぎられていたからである。

繊維に一定の張力を与えつつ集束して樹脂含浸を行い、金型を通して成形・硬化させて等断面の FRP 製品を得る Pultrusion の開発は、上記の静的疲労による荷重低下の問題を基本的には解消し、これによって FRP 緊張材の開発は大幅に進展した。1980 年に西独最大手の建設会社である Strabag 社と著名な化学会社である Bayer 社が政府の援助の下に史上最初の実験橋（スパン 7.5 m）をデュッセルドルフ 郊外に架設し、その 5 年後に前述の道路橋を建設している。

さて、FRP 緊張材の実用化の前に立ちはだかるもう一つの基本的な問題は緊張と定着の問題である。FRP は鉄鋼のような均質な材料ではなく、所要の方向に強化用繊維を配置している異方性材料であって、断面に占める強化用繊維の容積百分率は 50~70% 程度、残りは合成樹脂である。また、両者のヤング率には 2 桁の相違がある。このような複合材料は強化方向に直交する面内から作用する力に対しては非常に脆い。緊張材として使用される棒状の FRP 材に引張力を与える治具として、鋼材を対象としたものを用いても、いわゆる“チャック破断”を生ずるので、FRP 材の引張試験を実施することすらもできないのである。筆者の研究室ではこのような治具の開発に 2 年を要したが、これを知ったある大手の材料試験機メーカーの部長から、“FRP 材の引張試験機の製作依頼があるが、チャックが問題なので引き受けることができない。できればそのチャックを使用させてもらえないか”と打診されたことがある。このことは、FRP 緊張材の実用化における最大の課題は緊張および定着装置の開発であることを物語っている。

2.3 緊張材として用いられる FRP の特性

(1) 強化用繊維の種類と FRP の引張特性

一方向強化 FRP の特性は強化用繊維の種類とその容積混入率によって決まる。図-1 は FRP に使用される代表的な強化用繊維の引張応力-ひずみ曲線を示したものであって、いずれの繊維も破断時まではほぼ直線であり、塑性は殆んど示さない。この図から炭素繊維のヤング率は一般的に高く、小さい方でも鋼材と同程度の値を有するが、破断時伸びが 1.7~1.9% と小さいこと、アラミド繊維とガラス繊維はともにヤング率が鋼材の 1/3 程度で小さいが、破断時伸びが 3.5~4.4% であって炭素繊維に比べて大きいことがわかる。引張強度は 250~320 kg/mm² 程度のものが多く使用されるが、これらの繊維を用いてつくった一方向強化 FRP ($\phi 6 \sim \phi 7.5$

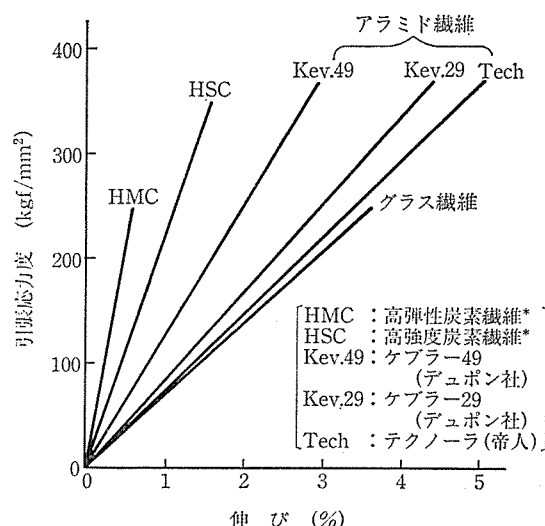


図-1 各種強化用繊維の引張応力-ひずみ曲線
(* 炭素繊維には多くの種類のものがある)

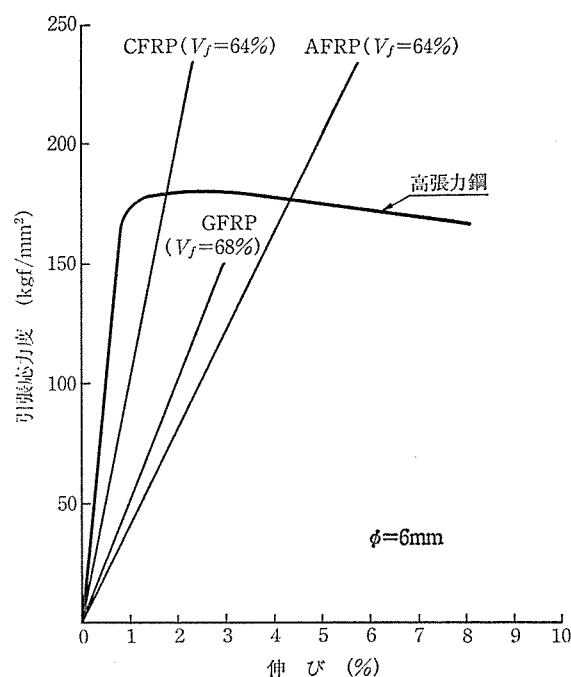


図-2 各種一方向強度 FRP 材の引張応力-ひずみ曲線

mm) の引張応力-ひずみ曲線を PC 用鋼材と比較して示したものが 図-2 である。この図をみると、ガラス繊維やアラミド繊維を用いた FRP 材のヤング率は鋼材の値の 1/4~1/5 であってかなり小さいが、炭素繊維を用いたものは鋼材の値と大差がない。しかし、破壊時伸びは前者のグループが 3~5% であるのに対して、後者のそれは 2% 以下であって素材である強化用繊維の特性を反映している。さて、以上のような強化用繊維の種類による FRP 材の特性の相違を、緊張材として利用する観点に立って検討してみることにしよう。

まずヤング率が鋼材に比べて小さいことは以下のように

な結果をもたらす。その一つは緊張時における緊張材の部材端からの引出し量が多いことであり、図-2 において 100 kg/mm^2 の引張応力を生じさせるような引張力を加えた場合のアラムド繊維 FRP (AFRP) の場合の伸びは鋼材の約 3.5 倍になる。このことは油圧ジャッキによる緊張作業を複雑にする。緊張材のヤング率が小さいということは反面においてプレストレス導入後におけるコンクリートの塑性変形による応力損失を小さくできる可能性があることを示しているが、実際に応力損失を減じ得るのか否かは FRP 材のリラクセーション試験の結果いかんにかかわっている。

さて、一方向強化 FRP 材のように破断時まで殆んど塑性を示さない材料では、破断時伸びの大小は部材の靱性の大小に直接かかわる問題であるだけに非常に重要な意味をもつ。この点を考慮すると、炭素繊維を用いた FRP (CFRP) よりも GFRP や AFRP の方が緊張材に適しているといえよう。

図-3 は AFRP ならびに CFRP の -10°C から 60°C の間における引張強度の温度依存性を示したものである。AFRP では 20°C から 60°C に温度が上昇すると、引張強度は約 10% 低下するが、 20°C から -10°C に低下すると引張強度は約 20% 上昇している。このような引張強度の温度依存性はマトリックスである合成樹脂の温度依存性よりは繊維素材の温度依存性により生ずるものと考えられる。

一方、CFRP の場合も 20°C から温度が上昇した場合の傾向は AFRP と同様であるが、これより低温にすると強度はむしろ減少している。この原因は炭素繊維の脆性が低温域において顕著にあらわれたためと考えられ

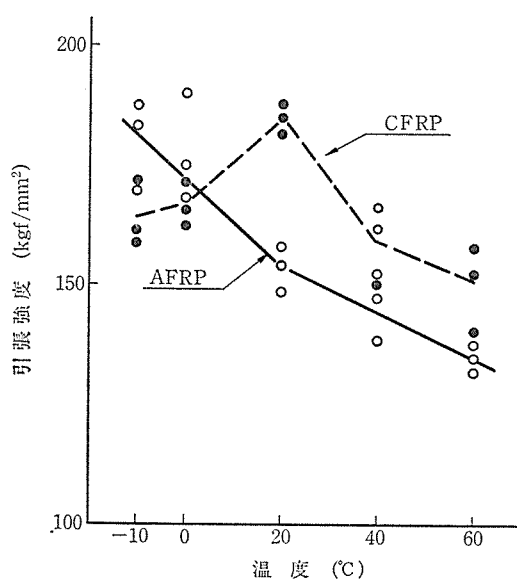


図-3 一方向強化 FRP 材の引張強度の温度依存性³⁾

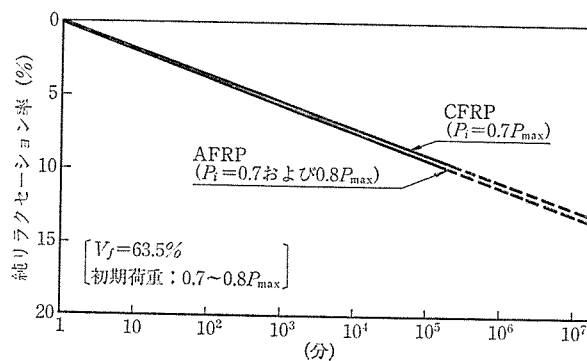


図-4 AFRP と CFRP 材の純リラクセーション率と経過時間との関係³⁾

る。

(2) FRP 緊張材のリラクセーション特性

図-4 は AFRP のリラクセーション試験 (7 200 時間) の結果を示したものである。この図より FRP 緊張材の純リラクセーション率と時間 (対数表示) との関係は直線関係となることが明らかであり、この関係が 30 年後まで拡張して適用できるものと仮定した場合のリラクセーション率の値は AFRP, CFRP のいずれの場合も約 14% 程度となることがわかる。一方、表-1 は AFRP 材および PC 鋼線を用いて応力導入を行った小型ボステン部材による実験結果に基づいてとりまとめたもので、AFRP 材の場合にも PC 鋼線と同等の有効比となることを確かめている。表-1 の結果と次式に基づいて見掛けのリラクセーション率を求めると、AFRP 材の場合 13.3% となり、純リラクセーション率と大差のない結果が得られている⁴⁾。

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{pc} + \gamma \cdot \sigma_{pt}$$

ここに、 $\Delta\sigma_p$: 緊張材引張力の減少量

$\Delta\sigma_{pc}$: コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による緊張材引張応力の減少量

γ : 緊張材の見掛けのリラクセーション率

σ_{pt} : プレストレス直後の緊張材の引張応力度

以上の結果は PC 鋼線に比べてヤング率の著しく小さい AFRP や GFRP 材を用いる場合には、コンクリートのクリープや乾燥収縮を殆んど考慮する必要がなく、見掛けのリラクセーション率を純リラクセーション率と

表-1 有効リラクセーション試験の結果から求めた緊張材とコンクリートの応力度⁴⁾

種 別	緊張材引張応力度 (kg/mm^2)		コンクリートプレストレス (kg/cm^2)		
	初 期	30 年後	初 期	30 年後	有効比
PC 鋼 線	144	121	74.5	62.3	0.84
AFRP ロッド	119	100	74.3	62.3	0.84

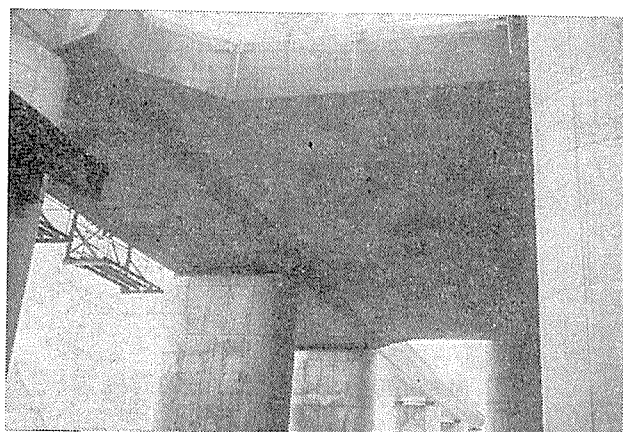


写真-2 防食パネルを施工した北陸自動車道親不知海岸高架橋ランプ橋の上部工

でなければならないが、実際には養生不足や締固め不良、局所的な収縮ひびわれなどにより品質が内部より劣っているケースが多い。ここでとりあげる劣化防止パネルは、腐食因子の遮へい性の格段にすぐれた材料によって構成されている工場生産の薄板状のもので、これを永久型枠として用い、部材の最外層を形成せしめて上記の問題の解決を図ったものである。

このパネルは筆者の研究室が日本道路公団の委託を受けて開発したものであって、北陸自動車道の親不知海岸高架橋の一部に試用された（写真-2）。このパネルを用いることによって得られる利点は ① 塩害のみならず、アルカリ骨材反応や凍結融解作用に対する劣化防止にも有効であること、② コンクリート打設後における湿潤養生と型枠の取り外し仕様が不要なこと、③ 変形追随性が大きいために、躯体のコンクリートにひびわれを生じても、これを被覆することができること、などである。

3.2 防食パネルの構成と機能

（1）防食パネルの構成

このパネルは母材（マトリックス）と強化用繊維から構成されている厚さ 10 mm の薄板状の複合材である。母材にはポリマーセメントモルタルを使用した、その理由は以下のとおりである。

- ① セメント系であるので躯体コンクリートとの親和性がすぐれ、耐候性も保証済みである。また、これを用いてつくったパネルの外観は入念に施工されたコンクリート面に類似している。
- ② ポリマーディスパージョンの混入により、セメント硬化体組織中にポリマーフィルムが形成されているので（写真-3）、酸素や塩素イオンの遮へい性能が格段にすぐれている。
- ③ 価格が比較的安い。

一方、強化用繊維としてはメッシュ状の有機質繊維を

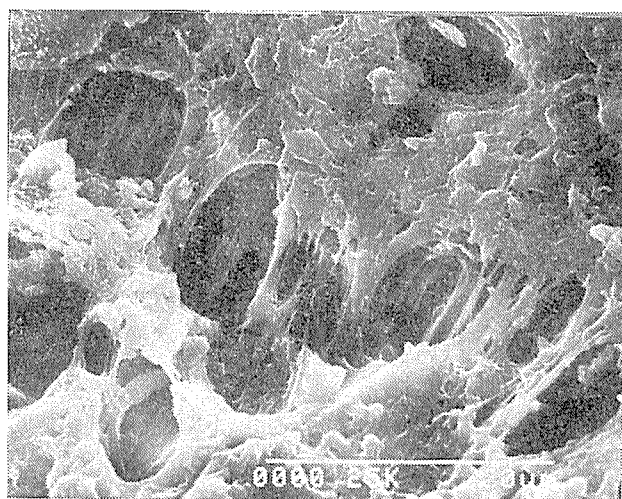


写真-3 ポリマーセメントモルタル中に形成されているポリマーフィルムの走査電子顕微鏡像（セメント硬化体と微砂を弗酸処理により除去した状態）

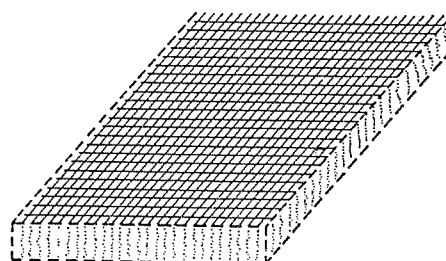


図-8 連続繊維強化複合板の概念図

10 枚積層して使用した（図-8）。このような繊維強化を行った理由は以下のとおりである。

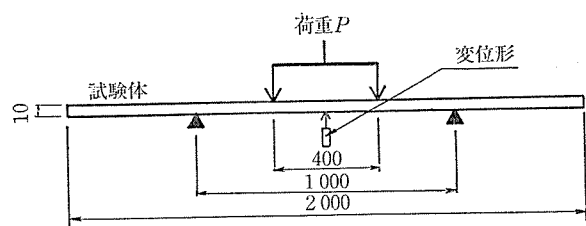
- ① パネルの製造・運搬・取付けおよびコンクリート打設工事のさいの荷重などに耐えるだけの補強が必要である。
- ② メッシュ状の有機質繊維を積層して用いると、セメント系の薄板が木質合板のような加工性のすぐれた材料となり、切断・切削・穿孔などが容易となり、型枠材としての条件を満足する。
- ③ 耐食性がすぐれている。
- ④ パネルの量産と品質管理が容易である。

防食パネルの寸法は 2.0 m × 1.0 m × 0.01 m とし、重量を 45 kg とした。これは現場において 2 名の作業員が容易に取り扱うことができる重量である。

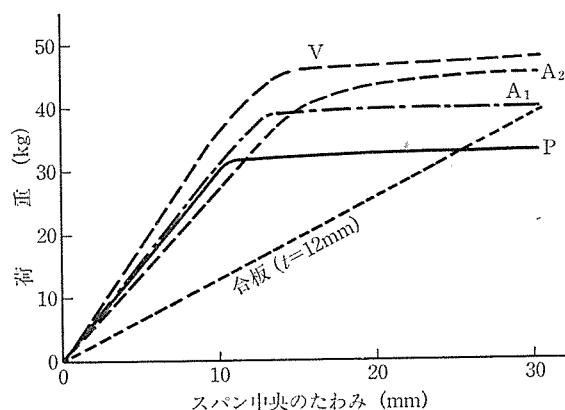
（2）防食パネルの機能

防食パネルの主要な機能は酸素や塩素イオンなどの腐食因子の遮へい性能である。これをコンクリート（水セメント比：40%，スランプ：10 cm）と比較すると、酸素拡散係数は 1/40、塩素イオン拡散係数は 1/3～1/5 となる。

このようなパネルによってかぶり厚が 5 cm のコンクリ



図—9 曲げ試験の方法



P: ポリエチレン繊維 10 層配置
 A₁: ポリエチレン繊維 9 層+アラミド繊維 1 層
 A₂: ポリエチレン繊維 8 層+アラミド繊維 2 層
 V: ビニロン繊維 10 層配置

図—10 複合板の曲げ荷重-たわみの関係

ート構造物ではかぶりを 17 cm に増した場合と同等の効果の効果が得られる。複合板の変形特性を 図—9 に示すような曲げ試験を行って、合板と比較すると、同一荷重時のたわみ量は、荷重が小さい段階では合板の方が大きくなっている (図—10)。

これは、合板の弾性係数がポリマーセメントモルタルよりも小さいからである。合板を用いたせき板の設計は通常、変形量によって行われており、コンクリートの側圧などによる変形が許容値の範囲内におさまるよう、支保工の剛性や間隔を定めている。防食パネルをせき板としての観点から評価すると、剛性が大いいために変形面では合板よりも有利となり、設計は強度によって決まってくる。防食パネルの強度を支配するのは強化用繊維のヤング率であり、この値は少なくとも母材のヤング率よ

りも高い値のものが望ましい。

3.3 防食パネルの製造とコスト

防食パネル 1 m² 当りの製造価格は量産することにより輸送費込みで 1 万円程度にすることは可能であると思われる。

防食パネルはメンテナンスフリーであることを考慮すると、この価格は定期的に塗り替えを必要とする防食塗装に比べて十分に採算のとれるものである。なお、防食パネルは日本道路公団が工業所有権の出願を行っているため、その製造と使用に際しては同公団と連絡をとる必要がある。

4. および

FRP 製緊張材も連続繊維強化複合材料製防食パネルのいずれも技術面では実用化を阻む障害は殆ど取り除かれたと考えてよい。今後これらを実用化するために必要なことは、実際の構造物を対象とした実証試験であって、このためには建設関連の官公庁のバックアップが必要である。

参考文献

- 1) Isecke, B.: Failure Analysis of the Collapse of the Berlin Congress Hall, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, pp. 79~90, Ellis Horwood Ltd. (1983)
- 2) Waaser, Eu., Wolff, R.: Ein neuer Werkstoff für Spannbeton, beton, 7. (1986)
- 3) 小林, 趙: 繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究 (その 1), 生産研究, Vol. 36, No. 8 (1985)
- 4) 小林, 趙, 西村: 繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究 (その 2), 生産研究, Vol. 37, No. 6 (1985)
- 5) Rojstaczer, D., Cohn, D. and Marom, G.: Thermal Expansion of Aramid Fibres, Jour. Materials Science Letter, 3. (1984)
- 6) FRP 製プレストレストコンクリート緊張材用定着装置, 生研リーフレット, No. 158, S. 62.6.1
- 7) 小林, 出頭: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学・論文, No. 86-12-1 (1986)

【昭和 62 年 9 月 21 日受付】