

論文

[2117] FRP を用いた合成梁の力学性状

鹿籠 雅純 (沿岸開発技術研究所)

正会員 清宮 理 (運輸省港湾技術研究所)

正会員 山田 昌郎 (運輸省港湾技術研究所)

正会員○末岡 英二 (東洋建設技術研究所)

1. まえがき

コンクリート製の港湾・海洋構造物は、厳しい腐食環境下に置かれ材料の劣化対策が重要な技術課題となっている。鋼材と比較して耐食性に優れている繊維強化プラスチック (FRP) を用いることにより耐久性に優れた構造部材を作製することが可能である。また海上での工事は、気象海象など陸上工事と比較して相当な制約を受ける。そこで現地での工事期間を短縮し、かつ容易な施工とするためプレキャスト化が求められている。そこでFRPを格子状に成形して凹形のプレキャスト型枠を製作し、現地でこの型枠を利用して鉄筋コンクリート部材を作製する。型枠と鉄筋コンクリートとは、力学的に合成して両者で外力に抵抗させる。この合成梁の基本的な力学性状の把握と設計法の整備を目的として、曲げおよびせん断載荷試験を行った。本論文では、これらの載荷試験結果と既往設計法の合成梁への適用性について述べる。

2. 実験の概要

2.1 試験体

実験ケースを表-1に試験体の形状寸法および配筋

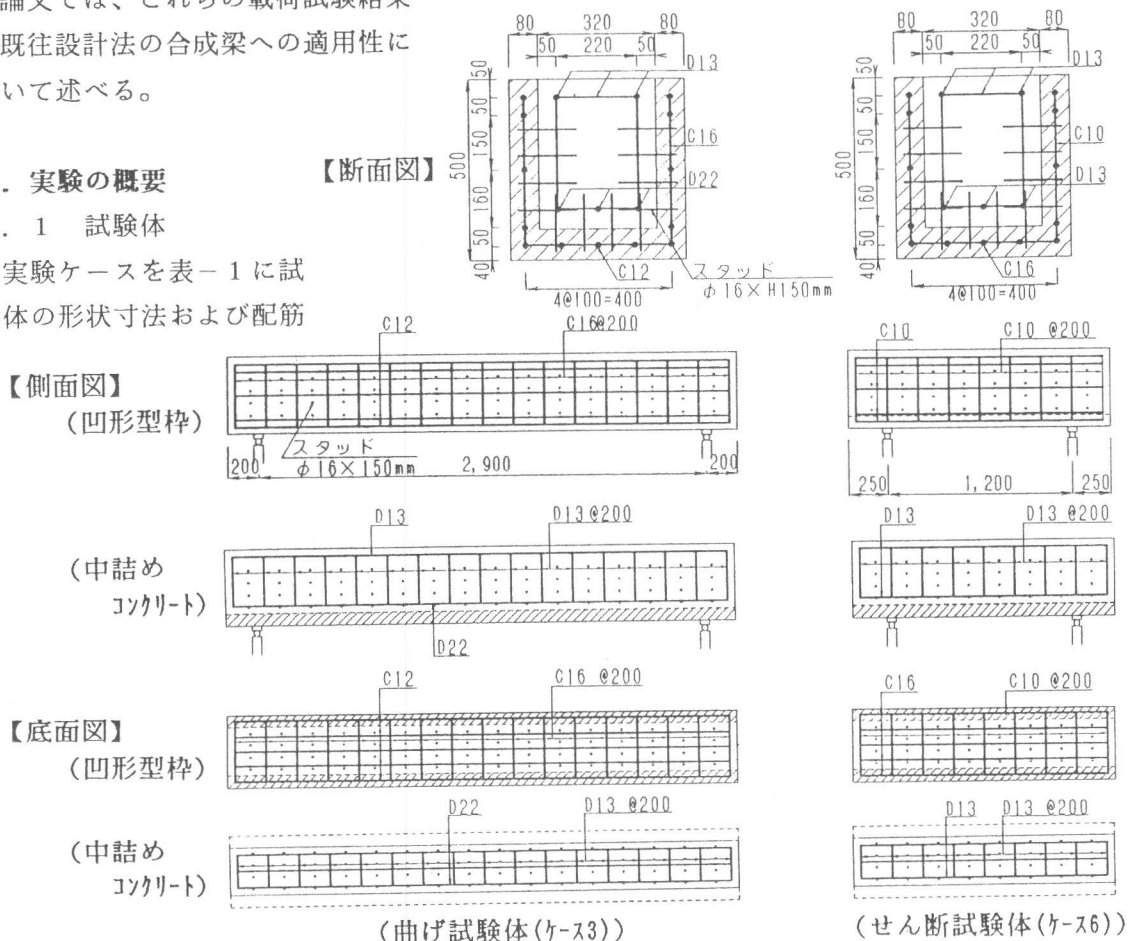


図-1 試験体の概要

図を図-1に示す。試験体はFRPを格子状にして補強材に用いたプレキャストの凹形型枠(コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{28}=240\text{kgf/cm}^2$ )、および凹形型枠と中詰め鉄筋コンクリート(以下中詰めRC)からなる矩形断面の合成梁である。また、合成梁では凹形型枠と中詰めRCの付着の程度が、力学性状に及ぼす影響を把握する目的で、境界面において骨材の洗い出しのみを行ったものと、さらに鋼製のスタッド( $\phi 16 \times H150\text{mm}$ )を境界面に20cm間隔で配置し、付着補強を施したものの2種類を作製した。実験で用いたFRP(CFRP:炭素繊維+エポキシ樹脂)およびコンクリートの実験時の強度特性をそれぞれ表-2、3に示す。

## 2.2 実験方法

曲げ載荷試験は2点載荷( $a/d=3.15$ )、せん断載荷試験は1点載荷( $a/d=1.30$ )で行い、いずれもひびわれ発生時および破壊予想荷重の1/2程度で一端除荷した後、破壊まで静的載荷した。載荷は載荷容量200tfの油圧ポンプを用いて行い、計測は図-2

に示す位置での変位、FRPのひずみ、鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみ、ひびわれ幅、凹形型枠と中詰めRCのズレと剝離について測定した。なお、ズレと剝離の測定は、梁上部境界面に設置した二軸型亀裂変位計を用いて行った。

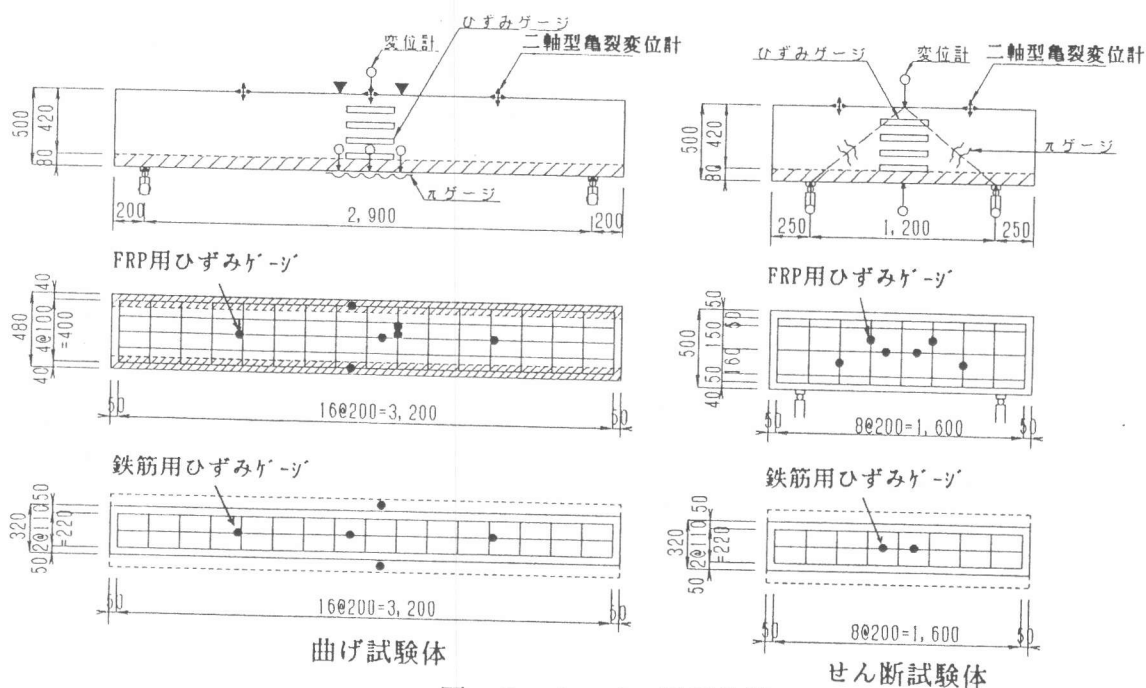


図-2 センサー設置位置

表-1 実験ケース

ケースNO.	試験体仕様		予定破壊形式
	中詰め鉄筋コンクリート	スタッド	
1	無	無	曲げ
2	有	無	曲げ
3	有	有	曲げ
4	無	無	せん断
5	有	無	せん断
6	有	有	せん断

表-2 FRPの特性

FRP筋の呼び名	1本当りの断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\times 10^4$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)	弾性係数 $\times 10^5$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
C-10	39.6	1.68	1.8	9.82
C-12	55.4	1.58	1.9	8.24
C-16	102.8	1.59	1.8	9.14

表-3 コンクリートの強度特性

ケースNO.	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	凹形型枠	中詰め	凹形型枠	中詰め
1	435	-	50.0	-
2	442	293	52.4	44.5
3	442	293	52.4	44.5
4	465	-	52.1	-
5	438	278	47.1	47.4
6	438	278	47.1	47.4

### 3. 実験結果

#### 3. 1 曲げ載荷試験結果

曲げひびわれ発生状況を図-3に、荷重-変位曲線を図-4に示す。曲げひびわれの発生間隔はほぼ20cm程度で格子状に配置した水平筋の位置と合致し、試験後ののはつり結果からいずれのひびわれも凹形型枠から中詰め部分に達していたことがわかった。コンクリー

トのひびわれ発生後、剛性が低下し、鉄筋降伏後も鉄筋、FRPのひずみの増大に伴い変位は大きくなるが、FRPの破断はみられず、最終的には載荷点付近のコンクリートが圧壊した。合成梁の靱性率を、破壊時の変位と鉄筋降伏時の変位の比により計算すると、スタッドを設置したもので5.4、設置しないもので6.0であり、いずれも鉄筋とFRPを併用することにより、靱性的な破壊となった。また、合成梁での変位の実測値と、コンクリート標準示方書[1]に式(1)で示され

るひびわれを考慮した換算断面二次モーメントを用いた鉄筋降伏時までの変位の計算値を比較すると、実験値の方が若干大きめであった。

$$I_e = \left[ \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 I_g + \left( 1 - \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \right) I_{cr} \right] \leq I_g \quad (1)$$

$I_e$  : 換算断面2次モーメント

$M_{crd}$  : 断面にひびわれが発生する限界の曲げモーメント

$M_{dmax}$  : 変位・変形量計算時の設計曲げモーメントの最大値

$I_g$  : 全断面の断面2次モーメント

$I_{cr}$  : 引張部コンクリートを除いた断面2次モーメント

曲げひびわれ幅とFRPのひずみの関係を図-5に、曲げひびわれ幅と鉄筋のひずみの関係を図-6に示し、合わせてコン

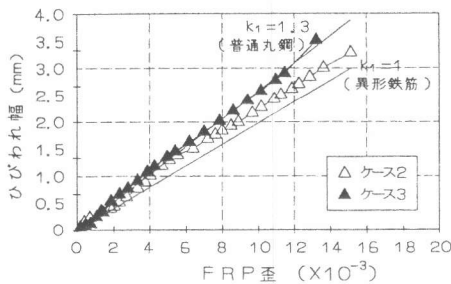


図-5 曲げひびわれ幅とFRPのひずみの関係

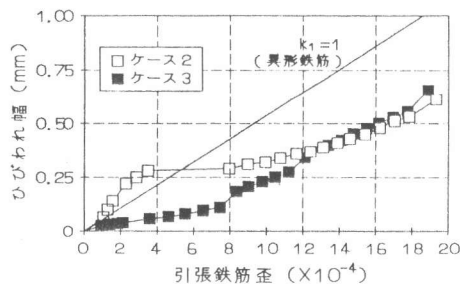


図-6 曲げひびわれ幅と鉄筋のひずみの関係

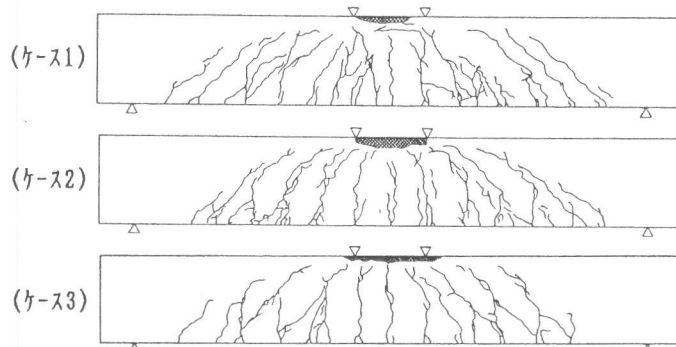


図-3 曲げ試験体のひびわれ発生状況

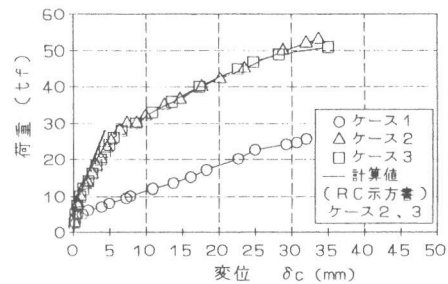


図-4 曲げ試験体の荷重-変位曲線

クリート標準示方書における曲げひびわれ幅算

定式も図示し

た。ただし、

コンクリート

の乾燥収縮お

よびクリープ

による影響は

考慮しなかつ

た。合成梁に

おける曲げひ

びわれ幅の測

定値は、FRP

のひずみ量

やかぶり等か

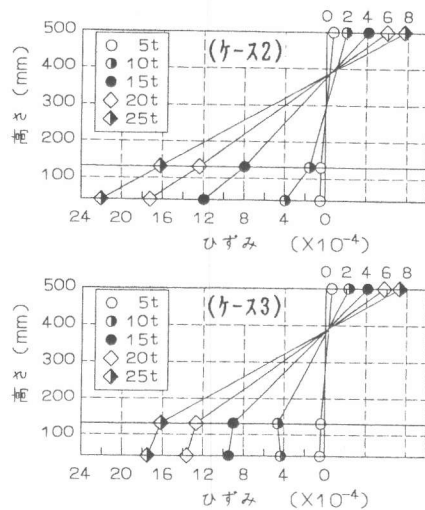


図-7 断面内ひずみ分布

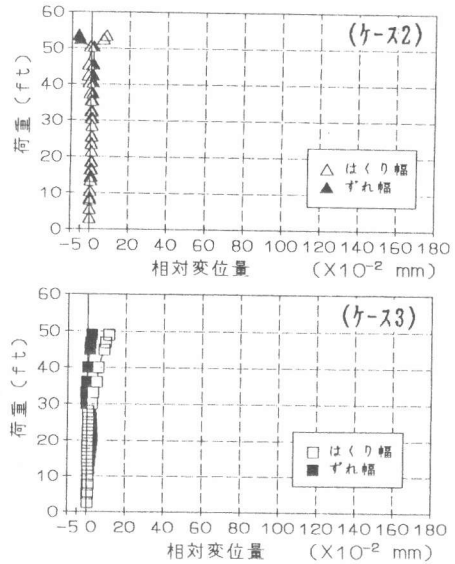


図-8 曲げ試験体境界部の相対変位

ら算定式で求めた値にほぼ合致した。すなわち、今回のように鉄筋を内側に、FRPを外側に配置した合成梁においてひびわれ幅の算定する際、その両者が十分離れていれば(今回の実験では13cm)、FRPのみでひびわれ幅を算定すれば良いことがわかる。今回、鉄筋を考慮するとひびわれ幅の算定値と実験値は一致せず、算定値の方がかなり大きくなった。梁中央部の断面内ひずみ分布を図-7に、凹形型枠と中詰め部分とのズレおよび剝離を図-8に示す。両図からスタッド配置の有無にかかわらず、ほぼ平面ひずみの仮定を満足した。凹形型枠と中詰めRCの境界部でのズレや剝離は鉄筋の降伏時まで見られず、降伏後も部分的な細かなひびわれ発生のみにとどまった。以上のことから設計荷重レベルでは、骨材の洗い出しにより、凹形型枠と中詰めRCとの合成度がほぼ確保できることがわかった。

### 3.2 セン断載荷試験

図-9にひびわれ発生状況、図-10に荷重-変位曲線を示す。載荷重が小さいときは供試体中央に曲げひびわれが生じ、せん断ひびわれ発生後、タイドアーチによるせん断耐荷機構となり、最終的にはアーチ部分のコンクリートが圧壊したが、FRPの破断、鉄筋スターラップの降伏はみられなかった。凹形型枠と中詰めコンクリートのズレおよび剝離を図-11に示す。スタッドを配置した試験体は、明瞭なズレや剝離はなく、一体となって挙動した。一方、スタッドを配置しない試験体は、終局前から徐々に剝離し、破壊時には2mm程度の大きな剝離を生じた。しかし、載荷重80tfまでは十分な合成度を保っており、剝離した時のせん断応力度(=S/bjd)は22kgf/cm<sup>2</sup>あり、底面だけにプレキャスト型枠を設けた実験[2]での値(10kgf/cm<sup>2</sup>以下)に比べ、かなり大きなものであった。すなわち、せん断に対する凹形型枠と中詰め部分との合成度は

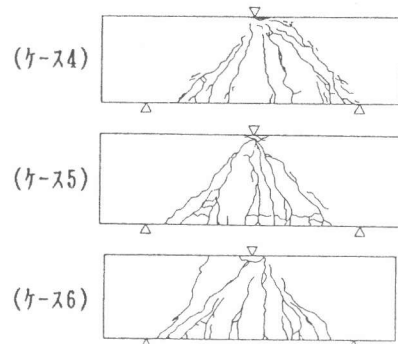


図-9 セン断試験体のひびわれ発生状況

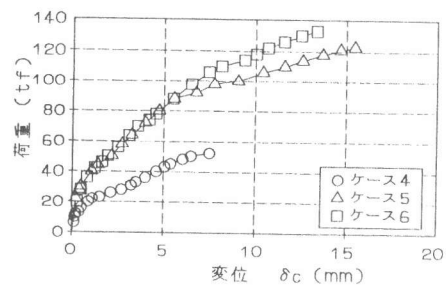


図-10 セン断試験体の荷重-変位曲線

骨材の洗い出しではほぼ確保できるが、スタッドを配置することによりさらに確実になると思われる。

### 3.3 実験値と計算値の比較

表-4に曲げ供試体における実験値と計算値の比較表を示す。計算値では各材料の特性値を用いている。ひびわれ発生荷重は全断面を有効として凹形型枠コンクリートの曲げ強度の実測値から求めた。実験値は計算値の約1/2であり、その原因は辻らの実験[3]と同様、主にFRP格子点への応力集中によるものと思われる。耐荷力および終局時のFRPのひずみは、コンクリート標準示方書に示される等価応力ブロックを用いた釣合式から計算し、コンクリートの圧縮縁ひずみが0.0035になった時を破壊荷重とした。鉄筋の降伏荷重は平面保持の仮定より中立軸を求め、鉄筋の降伏応力度から求めた。ここで、凹形型枠と中詰めRCは一体なものと仮定し、コンクリート強度は各々の面積比換算から求めた。耐荷力の実験値と計算値は良く一致した。表-5にせん断供試体における実験値と計算値の比較表を示す。耐荷力および終

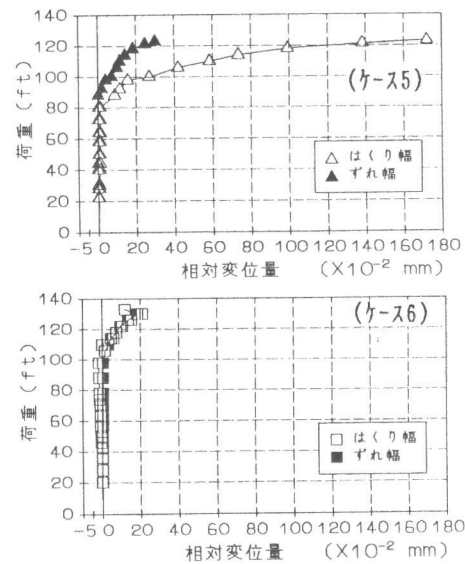


図-1.1 せん断試験体境界部の相対変位

表-4 曲げ供試体における実験値と計算値の比較

実験 ケース	ひびわれ発生 荷重 (tonf)		耐荷力 (tonf)		終局時FRP主筋 の歪 ( $\times 10^{-6}$ )		主鉄筋降伏荷重 (tonf)		破壊形式
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	
1	4.6	9.2	25.7	27.9	17400	14100	-	-	曲げ圧縮破壊
2	8.0	15.7	53.8	52.8	15100	17100	28.0	22.3	"
3	7.5	15.7	51.6	52.8	13200	17100	28.0	22.3	"

局時のFRPのひずみはせん断耐荷機構をタイドアーチと仮定して、それぞれ式(2)、(3)に示す二羽式[4]のコンクリートのせん断耐荷力(V)および主筋に作用する引張

表-5 せん断供試体における実験値と計算値の比較

実験 ケース	耐荷力 (tonf)		終局時FRP主筋 の歪 ( $\times 10^{-6}$ )		破壊形式
	実測値	計算値	実測値	計算値	
4	52.2	44.7	6000	6100	せん断破壊
5	123.0	101.8	12000	11500	"
6	131.0	101.8	13500	11500	"

り力(T)から求めた。ここで、せん断補強筋については、せん断スパン比が小さい梁においてその効果が少ないと考え、また、実験でのせん断補強筋のひずみ量が小さかったことから、今回は考慮しなかった。耐荷力は実験値が計算値よりやや大きく、鉄筋とFRPを使用したせん断スパン比の小さい合成梁において、タイドアーチ理論による設計手法を適用すれば20~30%程度安全側に設計出来ることことがわかった。主筋の引張りひずみの実験値は計算値と比

$$V = K f_c'^{2/3} b_w d (1 + 3.33 r / d) \cdot (1 + \sqrt{p_w}) / [1 + (a / d)^2] \quad (2)$$

$$T = V / \tan \alpha \quad (3)$$

ここに K : 定数 (=0.53)

$p_w$  : 主筋(鉄筋+FRP)比

$f_c'$  : コンクリート圧縮強度

$a / d$  : せん断スパン比 (=  $\alpha$ )

$b_w$  : 供試体の幅

r : 支圧板長さ

d : 有効高さ

較的良く合ったが、耐力の実測値から算出した値(約 $15000 \times 10^{-6}$ )に比べると小さかった。これは主に格子状に配置したFRPのくさび効果[5]によるものと思われる。

#### 4. 結論

(1) 今回対象とした合成梁の曲げ試験では、鉄筋の降伏後コンクリートの圧壊に至り終局を迎えた。FRPの破断は認められなかった。この時の載荷荷重は従来の梁の曲げ耐力の計算法で得られた計算値と良く一致した。

(2) せん断試験では載荷点付近のコンクリートの圧壊で終局を迎えた。曲げ試験と同様にFRPの破断は認められなかった。この時タイドアーチ機構でもって二羽式によってせん断耐力を計算すれば、今回20~30%せん断耐力を安全側に算定できた。

(3) 凹形型枠と中詰め鉄筋コンクリートとは、設計荷重レベルではズレや剝離がほとんど発生せず、一体となって挙動し、骨材の洗い出しによる合成方法で十分であることが確認できた。ただしスタッドを用いない試験体(骨材の洗い出しのみ)では、せん断応力度が $22 \text{ kgf/cm}^2$ 以上で両者間にズレや剝離を生じた。

(4) 曲げひびわれは、主に試験体下端のFRPの格子点から生じ、その発生荷重は全断面有効としてコンクリートの曲げ強度から求めた計算値の約1/2であった。凹形型枠のひびわれ幅の算定はコンクリート標準示方書に示す方法で、FRPを等価な断面積の丸鋼に置き換えて、中詰め鉄筋コンクリートの主鉄筋を無視して計算すれば、安全側に算定できる。

(5) 今回用いたFRPの破断までの伸びは、約1.8%ある。従来の伸びの小さいFRP材料(約1%)を用いると今回の載荷試験での力学性状とは異なる現象を得ることがひずみ測定の結果から予想される。FRPの力学特性、特に伸びに対する注意が必要である。

#### あとがき

本研究は「繊維系素材(FRP)を用いた港湾構造物の研究開発に関する研究会」(運輸省港湾技術研究所、運輸省第四港湾建設局、(財)沿岸開発技術センター、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)、リソナル建設(株)、ト・ビ・建設(株)、(株)ビ・・・エス、(株)富士ビ・・・エス)の共同研究の一環として行ったものであり、FRPの付着性状、施工方法などいくつかの技術課題に関して分担して開発研究を実施している。これらの成果をもとに港湾構造物への新素材の適用に関する設計施工法を取りまとめていく予定である。最後に本研究を行うにあたり多大の御協力と御指導を賜った関教授(早稲田大学)、大即助教授(東工大)および関係者の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 土木学会:コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編
- [2] 廣田孝夫・大即信明・守分敦郎・羽瀨貴士:CFRPで補強されたフレキシブル版を永久型枠として用いた梁の曲げ特性,コンクリート工学年次論文報告集13-2, pp. 789~794, 1991
- [3] 辻幸和・関島謙蔵・中島規道・斎藤等:格子状FRPで補強したコンクリートはりの力学的性状とケミカルストレスによる改善効果,コンクリート工学論文集, Vol. 2, No. 1, pp. 85~94, 1991
- [4] 二羽淳一郎:FEM解析に基づくティンビーMのせん断耐力算定式, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコンクリート論文集, pp. 119~126, 1983. 10
- [5] 廣田孝夫・大即信明・内藤英晴・浜崎勝利:格子状FRPを用いたRC梁の曲げ特性に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集13-2, pp. 795~800, 1991