

モルタル充填FRP部材の曲げ強度特性

Bending Property on the Quadrilateral Hollow Fiber Reinforced Plastics Beam Filled with Mortar

徳光 卓^{*}, 篠原 貴^{**}, 木嶋 健^{***}, 小宮 巖^{****}, 田澤 仁^{*****}

Suguru Tokumitsu, Takashi Shinohara, Takeshi Kishima, Iwao Komiya, Hitoshi Tazawa

ABSTRACT The Fiber Reinforced Plastics (FRP) material are characterized by high strength, light weight and corrosion resistance. However on static bending test, the bending strength of hollow FRP beam was far lower than calculation by beam theory from stress concentration under the loading plate. Thus, some kind of quadrilateral hollow FRP beams which was filled with mortar using three kinds of aggregate was tested. The result of tests, average bending strength of FRP beams which filled with mortar were 78.7kN. It was higher than 19.8kN of non-filling one, about four times. However, layers of FRP should reinforce against horizontal shear, even though hollow was filled with mortar.

Keywords : FRP梁、曲げ試験、モルタル、曲げ強度、層間せん断

FRP beam, Bending test, Mortar, Bending strength, Shear between layers

1. はじめに

FRPは軽量かつ高強度で、耐腐食性を有する材料である。諸外国ではこれらの特性を活かし橋梁をはじめとする種々の土木構造材料に適用されており^[1]、我が国においても沖縄で実橋の施工が行われた^[2]。しかし、FRP材料は鋼材と同等以上の引張強度を有する反面、せん断強度が小さい欠点がある。福田らによれば複合材料で通常用いられる3点曲げ、4点曲げ試験は負荷点での応力集中が大きく、時に異方性の強い材料では適切でないとしているが^[3]、土木分野で一般に用いられる梁において荷重の集中を避けるのは難しい。

そこで筆者らは、一般にFRP材料は高価であり、軽量性は多少犠牲にしても強度特性を十分に活かすことが経済的と考え、これまでに矩形中空FRP梁の内部に各種のモルタルを充填した供試体

の静的載荷試験およびFEM解析を実施して、モルタルの充填が曲げ耐力の向上に有効であることを確認した^{[4]~[5]}。

本研究では角形FRP管を構成する繊維の積層構成を2種類とし、3種類の充填モルタルを用いた供試体の静的曲げ載荷試験により、モルタル充填が曲げ補強効果と曲げ耐荷性状に与える影響を調査した。

2. 使用材料とその物理的特性

2. 1 FRP

供試体にはプルトリュージョン法により成形した外形100mm×100mm、厚さ5.6mmの中空角形FRP管を用いた。FRPの補強材にはガラス繊維を用い、マトリックス樹脂には不飽和ポリエステル樹脂を用いた。表-1にGFRPの積層構成と物理的特性を示す。GFRPの積層構成は2種類である。ここで通常品とは一般に市販されている積層構成のもので繊維の配置は軸方向の補強が重視されている。補強品とはせん断補強を重視し、バイアスニットファブリック(繊維を部材軸に対して45°方向に配置した織物)をコンティニュアスランドマット2層と置き換えたものである。

引張試験はJIS K 7054、曲げ試験はJIS K 7055に従い実施した。圧縮試験はJIS K 7181に準拠して実施したが、圧縮弾性率は切断した角材を鉛直載荷し、相対する面のひずみを平均して求めた。

* 博士(工)(株)富士ピー・エス技術本部

(〒810-0001 福岡市中央区天神2-12-1)

** (株)富士ピー・エス技術本部

(〒105-0004 東京都港区新橋4-24-8)

*** 建設省土木研究所化学研究室

(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

**** 工修(社)強化プラスチック協会

(〒104-0061 東京都中央区銀座2-11-8)

***** 工修(社)強化プラスチック協会

(〒104-0061 東京都中央区銀座2-11-8)

表－１ GFRPの積層構成と物理的特性

	ガラス含有率					積層構成*	樹 脂	圧縮特性		引張特性		曲げ特性			
	重量%				体 積 %			部材軸方向		部材軸方向		部材軸方向		直交方向	
	ガラス 全体	R	CSM	VF				強 度 (MPa)	弾性率 (GPa)	強 度 (MPa)	弾性率 (GPa)	強 度 (MPa)	弾性率 (GPa)	強 度 (MPa)	弾性率 (GPa)
通常品	47.2	32.8	14.4	－	32	SM+CSM+ R+CSM+R + CSM+SM	不飽和 ポリエ ステル	233	22.4	350	22.0	440	14.7	88	7.62
補強品	54.3	31.2	4.7	18.4	38	SM+VF+R +CSM+R+ VF+SM	不飽和 ポリエ ステル	235	22.4	376	22.0	472	17.0	110	8.75

※略号は、SM:不織布、CSM:コンティニュアストランドマット、R:ローピング、VF:バイアスニットファブリック

表－２ 充填モルタルの配合と物理的特性

	W/C (%)	示方配合(kg/m³)							物理的特性			
		早強セ メント	水	細骨材				高性能 AE減 水剤	比 重	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	終局圧縮 ひずみ ($\mu\text{m}/\text{m}$)
				砕砂	軽量骨 材	超軽量 骨材	ハー ライト					
普通モルタル	35.1	730	256	1,427	－	－	－	7.30	2.25	61.8	26.7	3,118
軽量モルタル	30.0	750	225	－	959	－	－	6.00	1.86	65.2	18.5	4,152
超軽量モルタル	35.1	630	221	－	－	251	354	7.56	1.49	44.2	15.2	2,990

※材料比重：セメント3.14、砕砂2.90、軽量骨材1.86、超軽量骨材0.90、ハーライト1.27

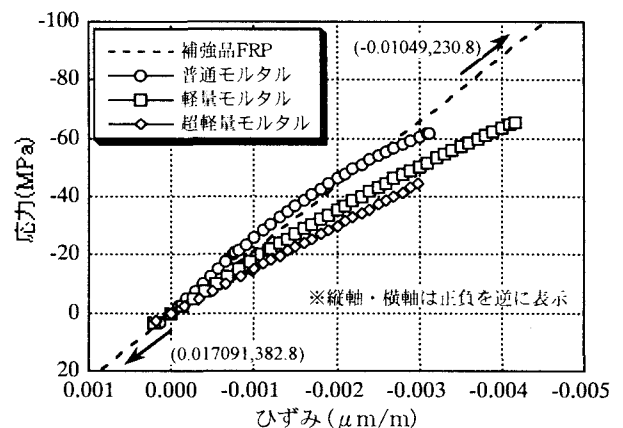
2. 2 モルタル

充填モルタルには普通モルタル、軽量モルタル、超軽量モルタルの3種類を用いた。充填モルタルの配合と物理的特性を表－2に示す。普通モルタル、軽量モルタル、超軽量モルタルの比重は順に2.25、1.86、1.49であり、圧縮強度は順に61.8、65.2、44.2MPaである。モルタルの圧縮応力とひずみの関係を図－1に示す。モルタルの圧縮応力に対するひずみは比重の低下と共に大きくなったが、非線形性は小さくなった。また、普通モルタルの応力とひずみの関係はFRPと同等程度であり、軽量モルタル、超軽量モルタルの応力とひずみの関係の勾配はFRPより小さくなった。モルタルの終局圧縮ひずみはいずれも-0.003～-0.004 $\mu\text{m}/\text{m}$ 程度であり、FRPの終局圧縮ひずみ約-0.01 $\mu\text{m}/\text{m}$ の半分以下であった。

3. 載荷試験

3. 1 供試体の製作

図－2に供試体と載荷試験の概要を示す。供試体の桁長は1,500mmであり、支間は1,300mmとした。モルタル充填供試体はあらかじめFRP内面をサンドペーパーにより軽く荒らした後、アセトンで拭き、油分を取り除いた。次に、FRP内面にコンクリート打継ぎ用のエポキシ樹脂接着剤を塗布

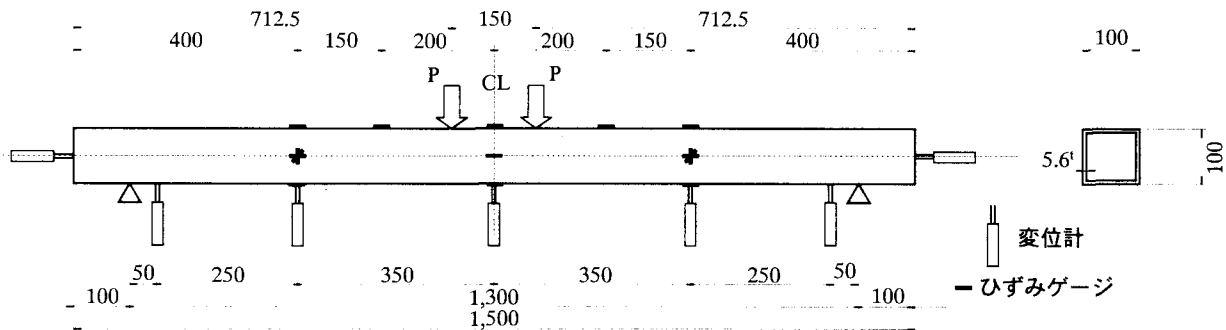


図－１ モルタルの圧縮応力とひずみの関係

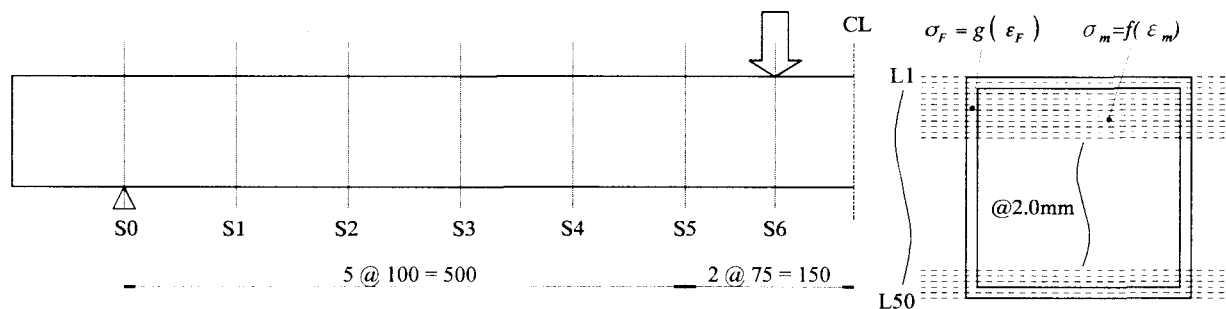
したのち、モルタルミキサーによりモルタルを練り混ぜ充填した。モルタル充填後の供試体は試験実施まで室温にて封かん養生した。

3. 2 載荷試験方法

載荷試験はモルタルの材令28日経過後に実施した。4点曲げの載荷点ローラーの直下には鉄板とゴムを敷き、ローラーによる局部応力を緩和した。載荷試験時の測定項目はひずみおよび変位とし、ひずみは軸方向ならびにせん断支間中央のせん断ひずみを測定した。変位は鉛直変位ならびに桁端部におけるモルタルとFRPの相対変位を測定



図－2 GFRP供試体と静的曲げ载荷試験の概要



図－3 ファイバーモデルによる非線形解析方法の概念図

した。FRP内部モルタルの状態は外部から確認できないため、荷重の载荷は推定最大荷重の約1/4まで载荷後除荷、約1/2まで载荷後除荷、破壊までの3サイクルとした。なお、モルタル充填FRP梁の破壊はFRPが破壊したときとした。

4. 破壊荷重の計算

4. 1 はり理論による線形計算

FRPの軸応力とひずみの関係は終局まではほぼ線形関係で表されることが知られているが⁶⁾、FRPは積層材料であり、異方性を有するため、曲げの計算においては層間のせん断変形を考慮する必要がある。しかし、設計上せん断変形を考慮するのは面倒であり、実用的とは言いがたい。そこで、モルタルを充填しないFRP梁については梁理論で計算を行うものとした。

表－1で示したようにFRPの弾性率は圧縮、引張、曲げで異なり、理論計算にどの弾性率を適用するかが問題になる。ここでJIS K 7055による曲げ弾性率は製品から切り出した供試体により求めるため、グラスファイバーの層間変形の影響が強く表れるため、図－2の供試体におけるウェブのせん断変形はJIS K 7055の曲げ試験による変形と状態が異なる。よって、計算上の弾性係数は中立軸から上では圧縮弾性率、中立軸から下では引張

弾性率を使用した。

4. 2 ファイバーモデルによる非線形計算

モルタルを充填したFRP梁の初期変形性状の計算は鉄筋コンクリートと同等の計算により求めることができる。しかし、前述のようにモルタルとFRPの終局圧縮ひずみには大きな差があるため、モルタルとFRPが一体に変形する場合は、理論上、FRPが圧縮破壊する前にモルタルが先に圧縮破壊する。このような場合の曲げ破壊荷重はモルタルの変形特性の非線形性を加味して算出することが必要である。

そこで、モルタルを充填したFRP梁についてはファイバーモデルを用いてモルタルの変形の非線形性を考慮するものとした。図－3にファイバーモデルによる非線形解析方法の概念図を示す。解析は梁の対称性を利用した半解析とした。支間方向の検討断面は7断面、各断面のレイヤー数は鉛直方向に50層(2mmピッチ)として、各層に応力ひずみ関数を設定した。モルタルの応力～ひずみ関数は図－1の回帰曲線を用いた。圧縮強度到達以降の応力ひずみ挙動は不明のため、便宜的に圧縮強度相当の応力を維持したままひずみが増加するものと仮定した。また、計算上、モルタルとFRPのずれは無いものとし、断面ひずみの線形性は保たれるものと仮定した。

表－３ 全供試体の破壊荷重と破壊形態

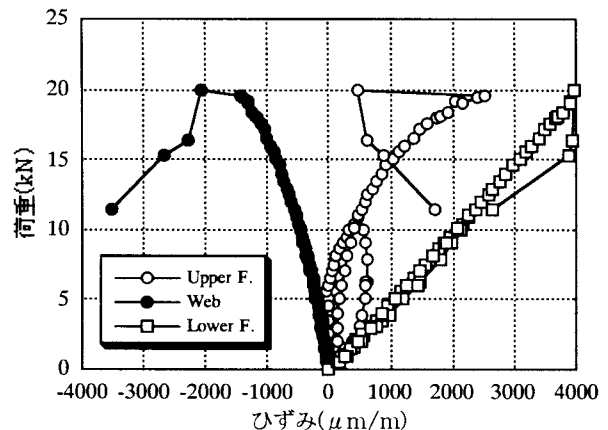
供試体種別		供試体 番号	最大荷重(kN)					破壊形態	
FRP種別	充填材種別		実験値	③平均	②/①	④ 計算値	③/④	実験時*	計算上
①通常品	なし	O-1	21.5	20.3	—	51.4	0.39	圧縮破壊	圧縮破壊
		O-2	19.5					圧縮破壊	
		O-3	19.9					圧縮破壊	
	普通モルタル	OR-1	73.2	71.9	—	78.8	0.91	角部せん断破壊	引張破壊
		OR-2	75.9					圧縮破壊	
		OR-3	66.7					圧縮破壊	
	軽量モルタル	OL-1	71.7	71.2	—	79.2	0.90	圧縮破壊	引張破壊
		OL-2	70.6					圧縮破壊	
	超軽量モルタル	OS-1	79.3	78.2	—	75.7	1.03	圧縮破壊	圧縮破壊
		OS-2	77.1					圧縮破壊	
②補強品	なし	K-1	21.1	20.3	1.00	51.8	0.39	圧縮破壊	圧縮破壊
		K-2	20.2					圧縮破壊	
		K-3	19.6					圧縮破壊	
	普通モルタル	KR-1	83.8	85.2	1.18	83.9	1.02	引張破壊	圧縮破壊
		KR-2	86.6					引張破壊	
	軽量モルタル	KL-1	78.5	79.8	1.12	84.3	0.95	圧縮破壊	圧縮破壊
		KL-2	81.0					圧縮破壊	
	超軽量モルタル	KS-1	88.0	86.8	1.11	76.3	1.14	引張破壊	圧縮破壊
		KS-2	85.5					引張破壊	

5. 載荷試験結果

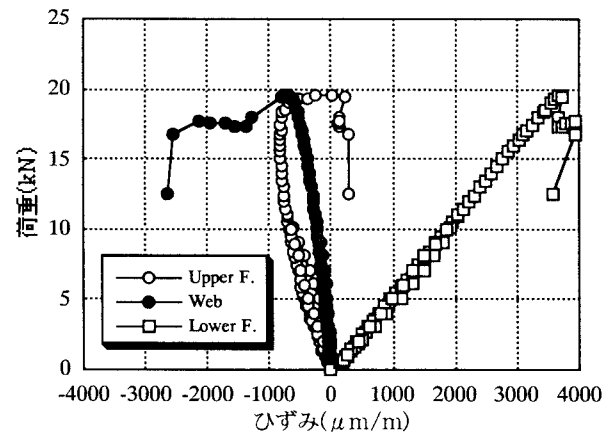
5. 1 中空FRP梁の最大荷重と破壊形態

表－３に全供試体の破壊荷重と破壊形態を示す。最大荷重は標準品、補強品共に平均20.3kNであり、はり理論による最大荷重の計算値51.4kN、51.8kNの40%程度にとどまった。全供試体の破壊は上フランジの圧縮破壊であり、目視ではウェブの層間剥離は確認できなかった。

図－４に通常品供試体の支間中央におけるひずみ変化、図－５に補強品供試体の支間中央におけるひずみ変化の例を示す。両図とも下フランジのひずみは線形変化し、引張ひずみを示しているが、上フランジのひずみは非線形となった。特に、通常品供試体の場合は中立軸位置に貼付したウェブのひずみが圧縮側に、圧縮ひずみを示すべき上フランジのひずみが引張ひずみを示した。補強品供試体の上フランジのひずみは圧縮を示したが、引張ひずみに比べて絶対値が小さくなった。これらは載荷点間でFRPが局部的な変形を生じたことを示すものと考えられる。また、破壊時のひずみはFRPの終局圧縮ひずみ、終局引張ひずみの推定値である $-10,490\mu\text{m/m}$ 、 $17,091\mu\text{m/m}$ より大幅に小さいことから、破壊は上フランジの層間がせん断破壊したか、フランジの座屈により生じたものと考えられる。本実験のように中空FRP梁に



図－４ 通常品中空梁供試体の支間中央ひずみ



図－５ 補強品中空梁供試体の支間中央ひずみ

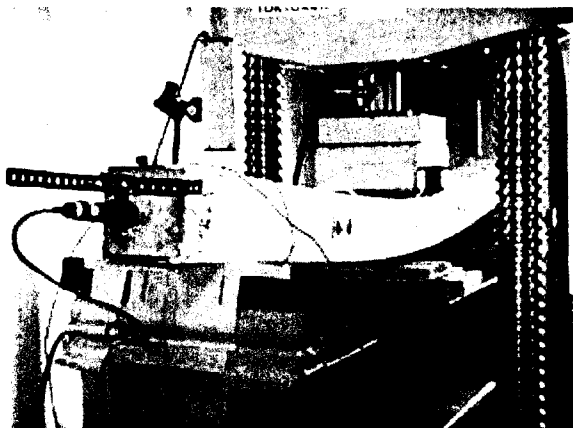


写真-1 モルタル充填FRP梁の荷重状況

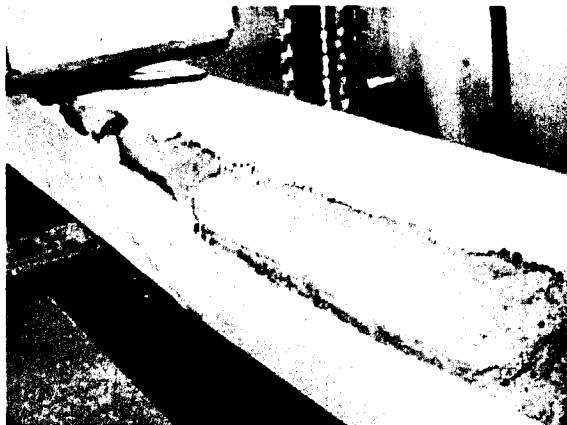


写真-2 通常品FRP梁の角部せん断破壊

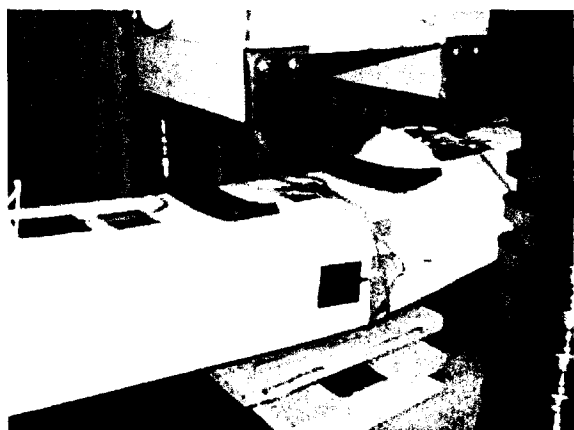


写真-3 通常品FRP梁の圧縮破壊



写真-4 補強品FRP梁の圧縮破壊

集中荷重が作用する場合、はり理論による計算は危険側であり、設計では局部応力を考慮する必要がある。また、その場合でもFRPはバイアスニットファブリックなどで十分な補強を行うことが必要と考えられる。

5. 2 モルタル充填FRP梁の最大荷重と破壊形態

写真-1に荷重試験状況を示す。モルタル充填FRP梁の最大荷重はモルタルを充填しない場合に比べて3.5～4.5倍程度まで増加した。また、破壊荷重の実験値と計算値との差は0.90～1.14倍となり、ほぼ計算上の耐荷力に一致した。写真-2に通常品FRP梁の角部せん断破壊状況を示す。本実験でこのような破壊形態を示したのは、普通モルタルを充填した通常品FRP梁のみであった。写真-3に通常品FRP梁の圧縮破壊状況を示す。通常品FRP梁の圧縮破壊の破壊面はFRPの層間せん断破壊を伴うものとなった。このように全ての通常品FRP供試体で写真に見られるようなウェブ軸方向の割れが見られた。写真-4に補強品FRP梁の

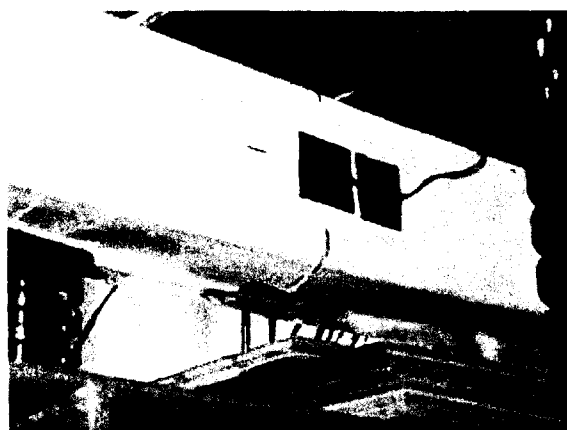
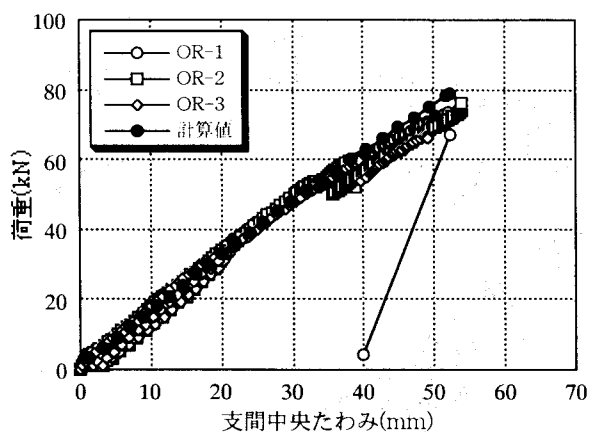
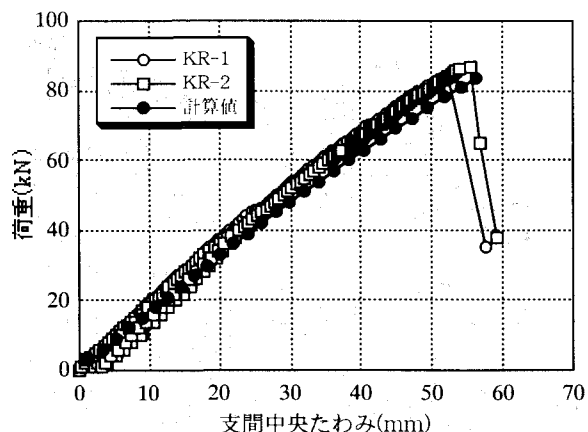


写真-5 補強品FRP梁の引張破壊

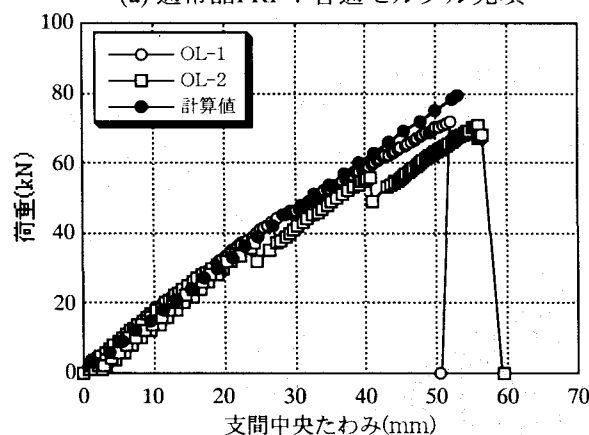
圧縮破壊状況を示す。補強品の場合、通常品で見られたようなFRPの層間せん断破壊や割れは見られなかった。写真-5に補強品FRP梁の引張破壊状況を示す。角部せん断破壊や圧縮破壊の場合、破壊は大きな破壊音と共に生じる脆性的なものであったが、引張破壊は脆性的でなく、徐々に繊維が切れながら、下フランジの数力所で鉛直のひび割れが拡大した。



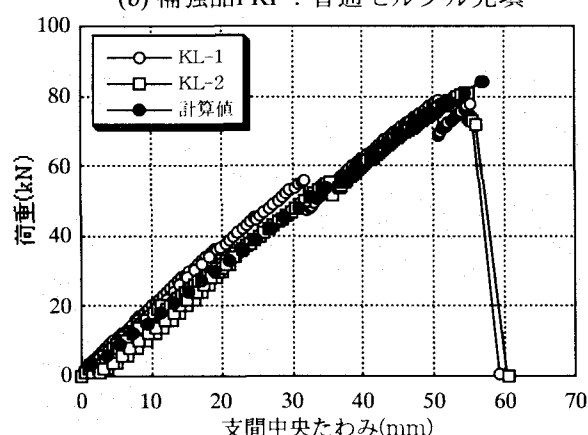
(a) 通常品FRP：普通モルタル充填



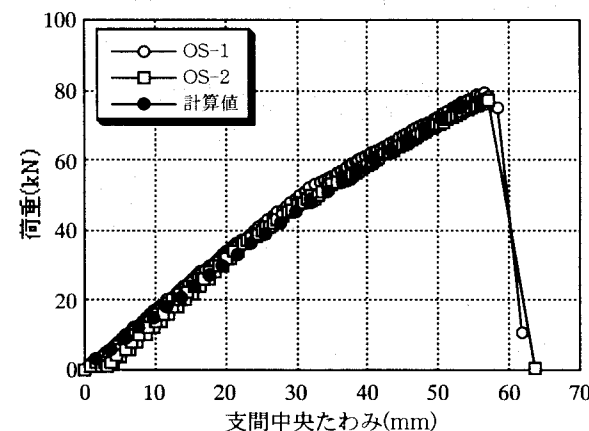
(b) 補強品FRP：普通モルタル充填



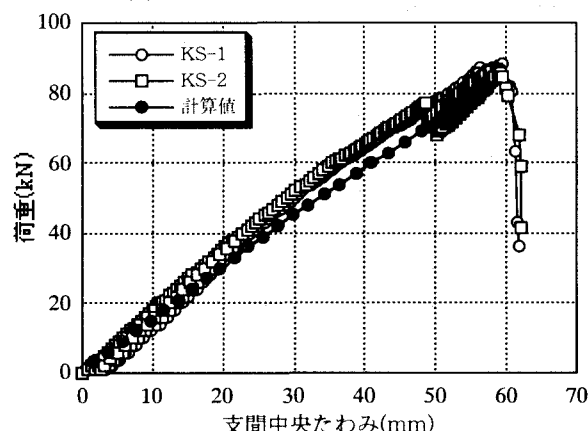
(c) 通常品FRP：軽量モルタル充填



(d) 補強品FRP：軽量モルタル充填



(e) 通常品FRP：超軽量モルタル充填



(f) 補強品FRP：超軽量モルタル充填

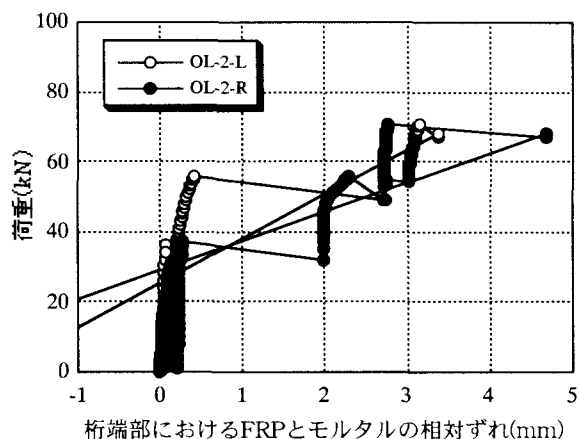
図－6 モルタル充填FRP供試体の支間中央たわみ

本実験の範囲内から判断すれば、実構造物の設計においてはパイアスニットファブリック補強したFRPを用い、破壊設計は引張破壊を先行させるのが最も好ましく、圧縮破壊はやむを得ない場合にのみ選択すべきと思われる。

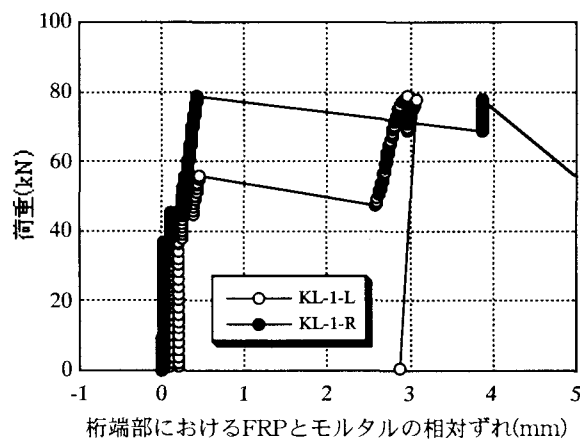
5. 3 モルタル充填FRP梁の曲げ変形状

図－6にモルタル充填FRP梁供試体の支間中央たわみを示す。一部の供試体の荷重とたわみの関係は階段状となり、不連続性を示した。図－7に

OL-2供試体、KL-1供試体の桁端部におけるモルタルとFRPの相対ずれを示す。図－6(c)、(d)のたわみの不連続を生じた荷重とずれを生じた荷重は一致しており、たわみの不連続はFRPとモルタルのずれの影響を受けたものであることがわかる。ずれを生じなかった供試体の荷重とたわみの関係はおおよそ計算値と一致しており、モルタルとFRPの間にずれを生じない場合はファイバーモデルによる非線形解析が適用可能と考えられる。

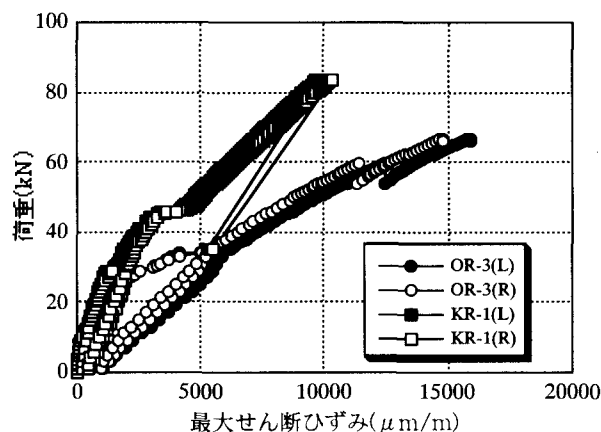


(a) OL-2供試体

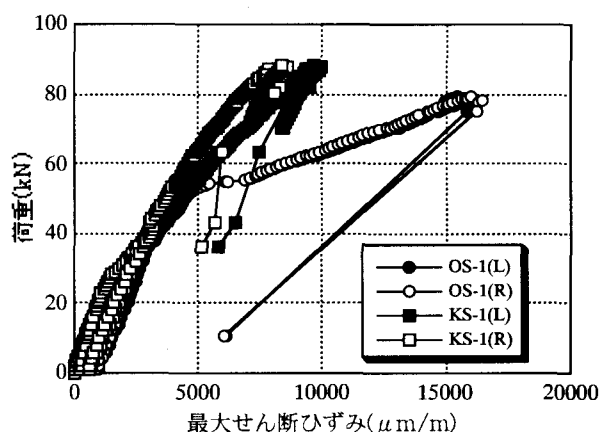


(b) KL-1供試体

図-7 モルタル充填FRP供試体の桁端部におけるモルタルとFRPの相対ずれ



(a) 普通モルタル充填供試体



(b) 超軽量モルタル充填供試体

図-8 モルタル充填FRP供試体の最大せん断ひずみの変化

5. 4 最大せん断ひずみ

図-8に普通モルタル充填、超軽量モルタル充填供試体のせん断支間中央における荷重と最大せん断ひずみを示す。(a)の普通モルタル充填供試体における桁端部でのずれは、OR-3供試体において荷重60kNで確認されたが、KR-1供試体では確認されなかった。また、(b)の超軽量モルタル充填供試体では両者とも桁端部でのずれは認められなかった。しかし、通常品FRPを用いたOR-3供試体では25kN付近、OS-1供試体では50kN付近で明らかな勾配の変化点が認められ、両者とも終局時の最大せん断ひずみは15,000 $\mu\text{m/m}$ 以上に達した。これに対して、補強品FRPを用いたKR-1供試体では荷重45kN付近で勾配の変化が見られるものの、KS-1供試体では終局付近で乱れを生じたのみであり、終局時のひずみも10,000 $\mu\text{m/m}$ 程度に留まった。

実験後の供試体内部を確認した結果、内部モルタルのせん断破壊は確認されなかったことから、

これらの勾配変化は計測位置でのFRPとモルタルの付着切れが原因と考えられる。変化点以降のひずみ変化の違いはバイアスニットファブリック補強の効果を示すものと考えられる。

5. 5 モルタル充填梁の破壊過程に関する考察

図-9に通常品FRP普通モルタル充填供試体内部モルタルのひびわれ進展過程の計算値を示す。計算上、内部モルタルは載荷初期よりひびわれが発生し、荷重15kN付近でひびわれ高さが65mmに達して、荷重32kNでモルタル上縁が圧壊した後、荷重78.8kNでFRP上縁が圧壊し梁の終局に至る。内部モルタルの圧縮強度到達は梁の最大荷重の半分以下であり、表-3に示したように、モルタルの圧縮強度が計算上の梁の耐力力に与える影響は小さい。むしろ梁の破壊荷重の実験値は圧縮強度が小さな超軽量モルタルの場合が最も大きくなった。

図-10は補強品FRPの材料試験における引張強度と圧縮強度を正規確率紙上に表し、回帰直線

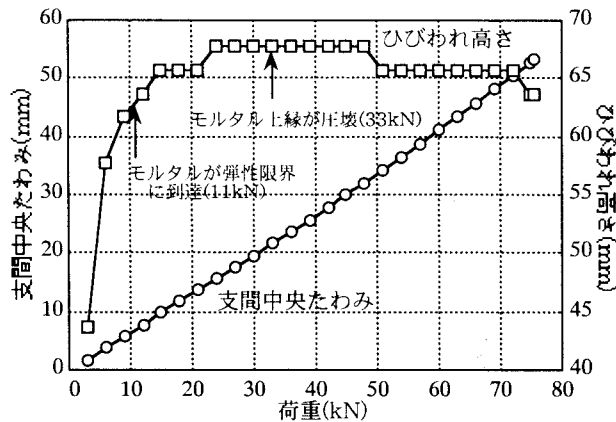


図-9 通常品FRP普通モルタル充填供試体内部モルタルのひびわれ進展(計算値)

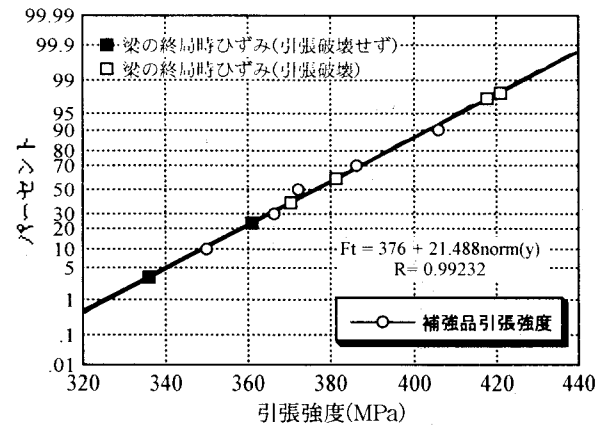
を軸極限まで外挿して、この回帰直線上に梁の終局直前のFRPひずみから計算した応力をプロットしたものである。梁の引張破壊は引張強度の確率50%程度以上の応力で生じているが、確率50%以上の圧縮応力を生じたケースの内、圧縮破壊を生じたのは5体中1体であった。

この原因として材料のばらつきの可能性は否定できない。しかし、材料試験に用いた材料が同一ロットから採取されたこと、試験結果のばらつきは引張試験より圧縮試験の方がはるかに大きいことを考えれば、圧縮破壊は座屈や層間せん断破壊の影響を強く受けたものであり、真の圧縮強度は材料試験結果より大きい可能性がある。また、超軽量モルタル充填供試体の破壊荷重が大きくなった原因は、弾性係数が小さいためFRPの応力の流れがスムーズとなり、圧縮縁の座屈や層間せん断破壊を生じなかったためと推察される。

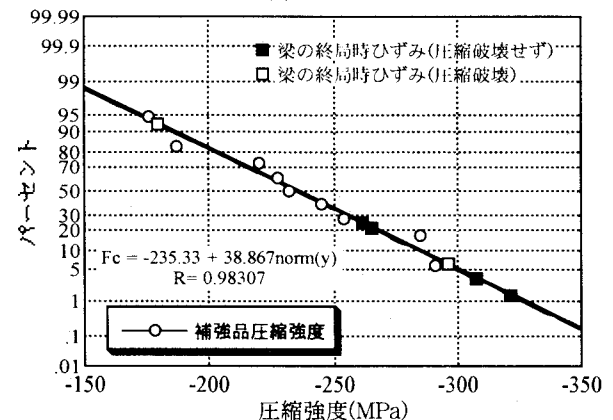
6. まとめ

本研究ではモルタル充填による中空FRP梁の曲げ耐力特性の改善に関する試験を実施した。主な研究結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 静的4点曲げに対する中空FRP梁の耐力は梁理論による計算結果より大幅に小さくなった。
- (2) 静的4点曲げに対するモルタル充填FRP梁の曲げ耐力は、モルタルを充填しない場合に比べて3.5～4.5倍程度増加した。
- (3) ファイバーモデルを用いたモルタル充填FRP梁の曲げ挙動の非線形解析結果は、実験結果とおおそ一致した。
- (4) モルタル充填FRP梁の設計においては、せん断補強したFRPを用いると共に、破壊設計は引張破壊を先行させるのが好ましい。



(a) 引張強度



(b) 圧縮強度

図-10 補強品FRPの材料試験における引張強度・圧縮強度のばらつきと梁のひずみから計算した応力の関係

なお、本研究は建設省公募型共同研究、繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究の一環として行われたものである。

参考文献

- [1] 建設省土木研究所ほか：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(I)、1998.10
- [2] 山本尚樹ほか：FRP製歩道橋の主桁継手構造に関するFEM解析、45th FRP CON-EX2000、pp.129～130、2000.10
- [3] 福田博ほか：CFRPパイプの圧縮曲げ試験、45th FRP CON-EX2000、pp.160～161、2000.10
- [4] 木嶋健ほか：モルタル充填GFRP梁部材の力学特性に関する数値計算、第55回土木学会年次学術講演会、I-A209、2000.9
- [5] 徳光卓ほか：モルタル充填GFRP梁の静的曲げ耐力性状、第55回土木学会年次学術講演会、I-A206、2000.9
- [6] (社)強化プラスチック協会、FRP構造設計便覧