

論文

[2125] FRPC梁の曲げ性状に関する研究

正会員 ○鈴木 淳司 (奈良建設 土木技術研究所)  
 正会員 佐藤 貢一 (奈良建設 土木技術研究所)  
 正会員 小玉 克巳 (武蔵工業大学 土木工学科)

1 はじめに

新技術の開発に伴いコンクリート分野においても、新素材の活用が盛んに行われている。特に高強度で、耐腐食性の高いFRP (Fiber Reinforced plastic) のコンクリートへの応用は、大いに期待され多くの研究が行われている[1]。既往の研究では、FRPには弾性係数が低いものもありFRPを鉄筋のかわりに用いた場合、鉄筋コンクリートに比べひびわれ、たわみ性状などが劣ること、またFRPC梁 (FRPを鉄筋のかわりに軸方向補強材として用いた梁) の破壊形態がRC梁と異なることも認められている。

本研究では、引張剛性 (繊維断面積×弾性係数) を鉄筋D10と同程度にした各種のFRPを軸方向補強材として用いることにより、曲げ性状および破壊形態の改善を目的にFRPC梁の静的曲げ試験を行い検討した。

表-1 鉄筋・FRPの力学的性状

2 実験概要

2-1 FRPの力学的性状

各種FRP及び鉄筋の力学的性状を表-1に示す。繊維はガラス繊維、高弾性炭素繊維、アラミド繊維

(以下GFRP,CFRP,AFRPと記す。)を使用し、繊維の断面積は、引張剛性が鉄筋D10と同程度となる値とした。FRPは、上記連続繊維をビニルエステル樹脂をマトリックスとして格子状に成形したものを使用した(図-2~4供試体形状図)。

引張材の種類	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )		最大応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張剛性 (kgf)
		総断面積	繊維断面積		
鉄筋D10	1.85x10 <sup>6</sup>	0.7133		3600	1.50x10 <sup>6</sup>
CFRP	3.30x10 <sup>6</sup>	1.0714	0.4286	27000	1.41x10 <sup>6</sup>
GFRP	0.65x10 <sup>6</sup>	5.0676	2.027	14300	1.32x10 <sup>6</sup>
AFRP	0.86x10 <sup>6</sup>	5.2817	2.1126	31200	1.82x10 <sup>6</sup>

但し鉄筋は降伏点応力

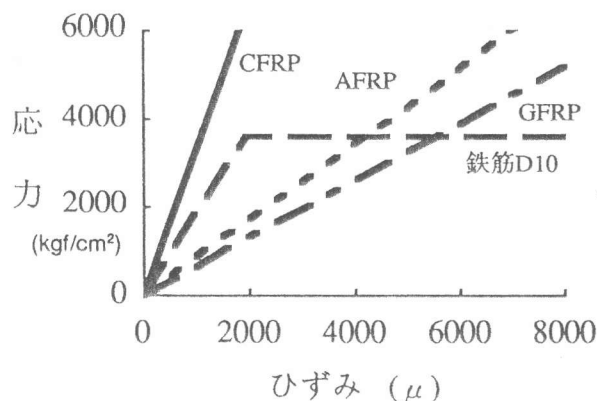


図-1 FRPの応力とひずみの関係

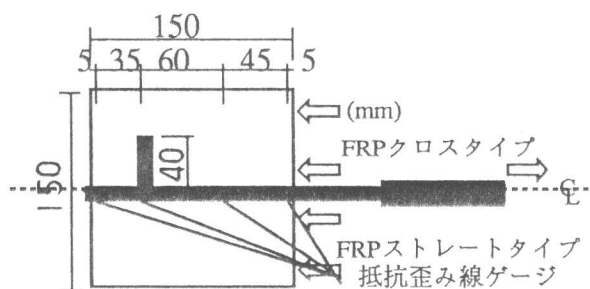


図-2 片引き試験状況

## 2-2 格子状FRPの付着性状試験

格子状FRPの付着性状を把握する目的で片引および両引き抜き試験を行った(図-2, 3)。片引試験では、各点におけるFRPのひずみ、供試体底面のFRPのずれ量および、引き抜き荷重を計測した。またFRPの形状が格子状であるため図-2に示すようにクロスタイプと横方向のFRPを取り除いたストレートタイプに分けて実験を行った。両引き試験では、各点におけるFRPとコンクリート表面のひずみおよび引張荷重を計測した。

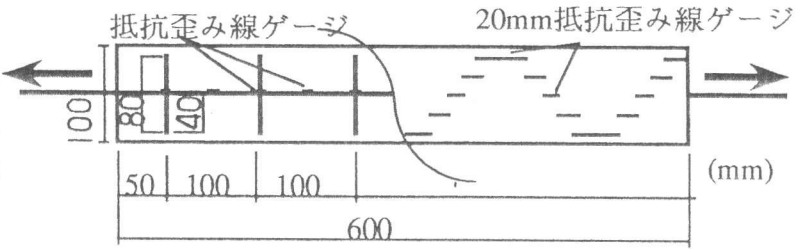


図-3 両引き試験状況

## 2-3 FRPC梁の静的曲げ試験

FRPC梁の曲げ性状を把握する目的で静的曲げ載荷試験を行った。

供試体の寸法は図-4に示すとおりで断面の高さは15cm、幅は20cm、長さは120cmである。格子状FRPは、軸方向補強材としてのみ引張側に2本相当配置した。さらに鉄筋D10をスターラップとして7cm間隔に配置した。材令28日におけるコンクリートの圧縮強度は240kgf/cm<sup>2</sup>であった。載荷にさいして載荷点幅20cm、支点間隔100cmとし、FRPおよびコンクリート面のひずみを抵抗ひずみ線ゲージより、梁中央部のたわみ量を変位計で、パイ型ゲージにより梁に発生したひびわれ幅を計測した。

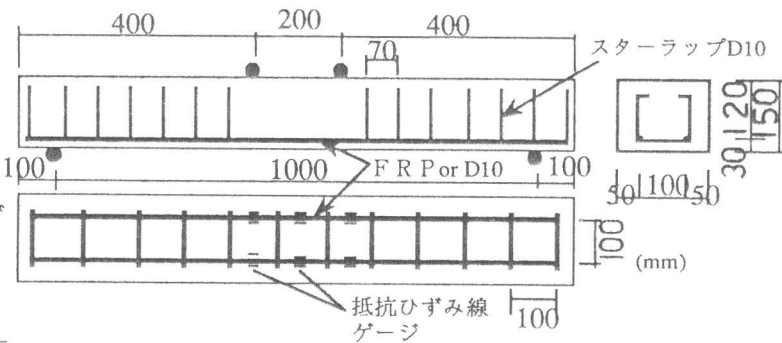


図-4 FRP梁形状図

## 3 FRPの付着性状

### 3-1 片引き試験

#### 1) FRPの付着応力とずれ量の関係

図-5にD10,CFRP,GFRPのクロス,ストレートタイプの片引き試験による付着応力とずれ量の関係を示す。鉄筋D10は付着応力40(kgf/cm<sup>2</sup>)程度でコンクリートが破壊したが最も良い付着性状を示した。格子状FRPの付着は付着応力初期段階(10kgf/cm<sup>2</sup>程度)まではクロス,ストレートともに同様な性状を示しFRPとコンクリートの付着が有効であると考えられる。その後CFRPのクロスタイプのずれ量がすくないことからFRPとコンクリートの付着が低下し、クロス部分でコンクリートとの付着を受け持つものと考えられる。FRPの付着性状は、鉄筋D10に劣るもののクロス部分に付着が移行した後、かなり大きな付着力を発揮するものと考えられる。

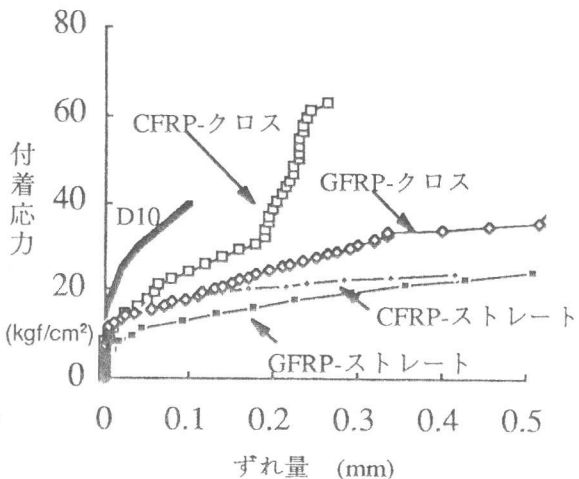


図-5 付着応力とずれ量の関係

2) コンクリートとFRPの応力

片引き試験においてコンクリートとFRPの応力及び付着応力の間に以下の(1)~(3)式の関係が成立する[2]。

$$\sigma_{sx} \times A_s = \sigma_{cx} \times A_c \quad (1)$$

$$P = \sigma_s 150 \times A_s = \sigma_c 150 \times A_c \quad (2)$$

$$\sigma_{cx} = \mu \times \int_0^L \tau_x dx \quad (3)$$

$$\sigma_{sx} = P \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi X}{2L} \right) \right] / A_s \quad (4)$$

$$\sigma_{cx} = -P \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi X}{2L} \right) \right] / A_c \quad (5)$$

$$\tau_x = \left( \frac{P\pi}{2L \times \mu} \right) \sin \left( \frac{\pi X}{2L} \right) \quad (6)$$

$$\sigma'_{sx} = P \sin \left( \frac{\pi X}{2L} \right) / A_s \quad (7)$$

$$\sigma'_{cx} = -P \sin \left( \frac{\pi X}{2L} \right) / A_c \quad (8)$$

$$\tau_{xx} = P \left[ \sin \left( \frac{\pi X}{2L} \right) - 1 + \cos \left( \frac{\pi X}{2L} \right) \right] \quad (9)$$

$\mu$  : FRP周長

$\tau_x$  : 付着応力

$\tau_{xx}$  : 拘束応力

このことからCFRPストレートタイプのコンクリート供試体及びCFRPの各位置に作用する応力式(4),(5)を実測値より求めた。さらにこのコンクリートの応力式を微分して付着応力の式(6)が求まる。CFRPクロスタイプについても同様にしてコンクリート及びCFRPの式(7),(8)を得た。これらの関係を図-6-a,bに示す(CFRP応力3500kgf/cm<sup>2</sup>作用時)。図-6-bのコンクリートおよびCFRPの応力の斜線部はストレートタイプとの差で、この応力がCFRP格子の横方向筋に

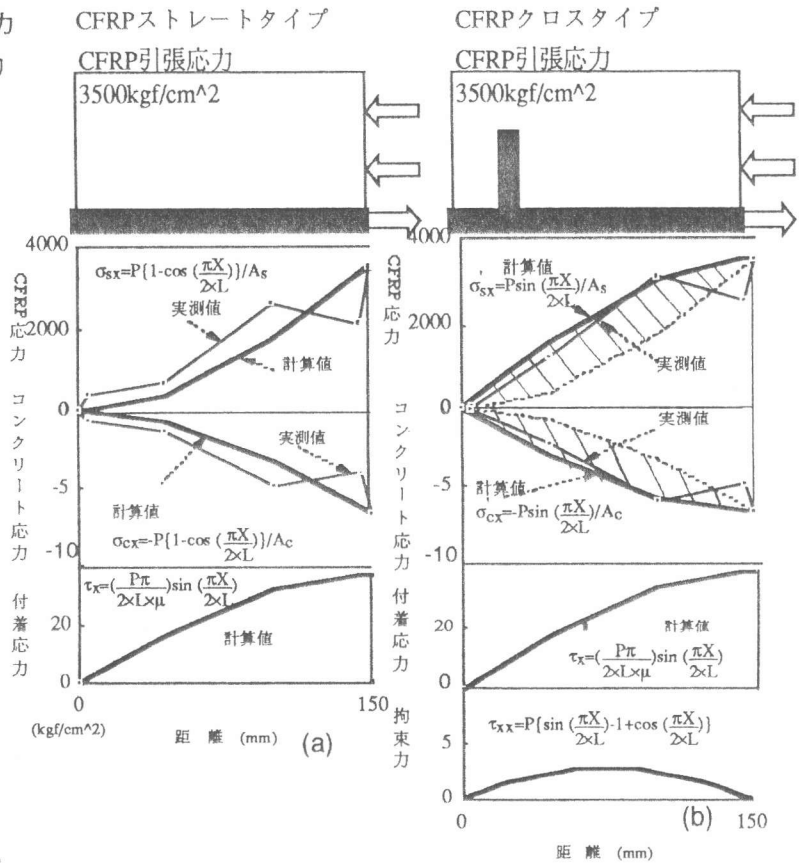


図-6 片引き試験における応力状況図

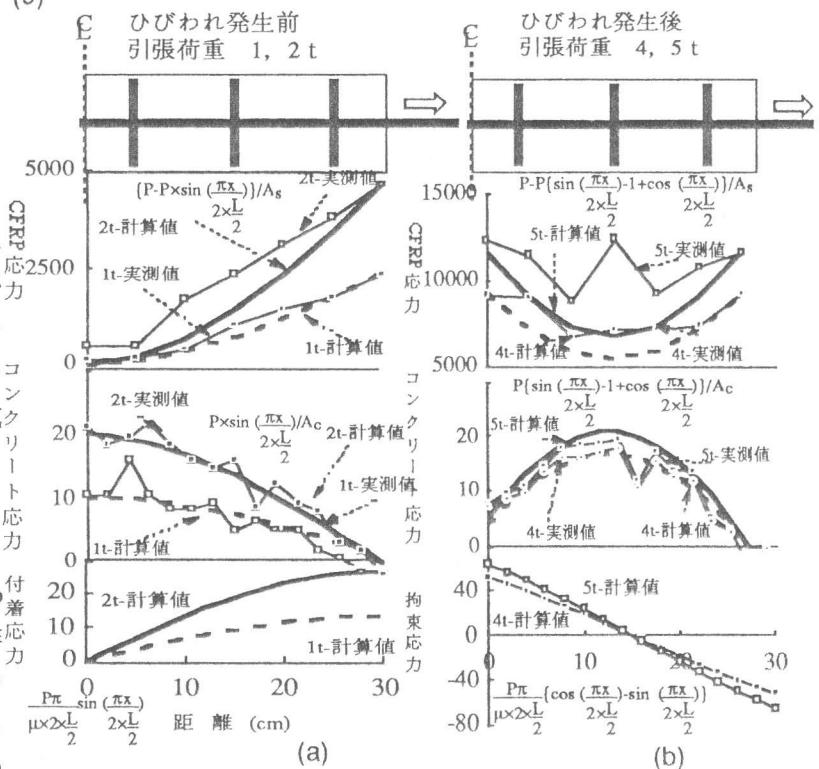


図-7 両引き試験における応力状況図

よる拘束力であると考えられる(式(9))。

### 3-2 両引き試験

片引き試験から得られたCFRP格子の付着式(6),および拘束力式(9)から求めた各引張荷重作用時におけるコンクリートとCFRPの応力の計算値と実測値との比較を図-7a,bに示す。両引きにおける引張荷重1tおよび2tのひびわれ発生前は,CFRPの付着応力式(6)から求めたコンクリート,FRPの応力計算値が実測値と良く一致している(図-7-a)。このことからひびわれ発生前(付着応力20kgf/cm<sup>2</sup>程度まで)は,CFRPとコンクリートとの付着が有効であることがわかる。さらに引張荷重4tおよび5tの初期ひびわれ発生後においてはCFRPの横方向筋の拘束力式(9)を用いて求めたコンクリート,FRPの応力計算値が実測値と一致した(図-7-b)。このことからひびわれ発生後は,CFRP格子の横方向筋の拘束力により応力伝達がなされると考えられる。

## 4 FRPC梁の曲げ性状

### 4-1 FRPC梁の破壊荷重と破壊形態

表-2 FRPC梁静的試験結果

梁種類	ひびわれ発生モーメント		破壊荷重 (kgf)			破壊形態
	実測値	計算値	実測値	計算値	比率 (%)	
D10梁 NO.1	20000 (0.80)	24970	3999	3816**	0.95	曲げ引張破壊
D10梁 NO.2	16000 (0.64)	24970	3972	3816**	0.96	曲げ引張破壊
CFRP梁NO.1	14000 (0.48)	28914	7802	6293*	0.81	圧縮先行型曲げ引張破壊
CFRP梁NO.2	18000 (0.62)	28914	9511	6293*	0.66	圧縮先行型せん断破壊
CFRP梁NO.3	14000 (0.50)	27879	6989	6925*	0.99	圧縮先行型曲げ引張破壊
GFRP梁NO.1	18000 (0.63)	28728	9204	5650*	0.61	圧縮破壊
GFRP梁NO.2	16000 (0.56)	28728	6797	5112*	0.75	圧縮先行型曲げ引張破壊
GFRP梁NO.3	14000 (0.52)	26884	8007	5591*	0.70	圧縮破壊
AFRP梁NO.1	18000 (0.72)	24970	8103	5849*	0.72	圧縮破壊
AFRP梁NO.2	14000 (0.56)	24970	7994	4625*	0.58	圧縮破壊

※ ( )は計算値との比率

ひびわれ発生モーメント(kgf cm)

\*\* 曲げ引張破壊計算値

\* 圧縮破壊計算値

主鉄筋にD10を用いたRC梁の破壊形態は曲げ破壊であったが,各種FRPC梁の破壊形態は圧縮破壊先行型破壊形態を示した。これはFRPの引張剛性をD10鉄筋と同程度にしたためFRP筋の引張強さが強くなり破壊形態が圧縮破壊型に移行したのである。その結果FRPC梁の脆性的な破壊を防ぐことができた。圧縮破壊荷重の算定に関しては従来の弾性理論値から求めた値より高い荷重で破壊した。これは弾性理論値ほど中立軸が上昇しなかったためで,本実験では,コンクリート表面のひずみゲージより求めた中立軸の実測値を用いて破壊荷重を算定した(表-2)。

FRPC梁のひびわれ発生モーメント実測値は計算値の0.5-0.6程度の値となった。これは格子状FRPの横方向筋の拘束力でコンクリートに応力伝達する付着性状から,格子部に応力集中しD10梁より低荷重でひびわれが発生したものと考えられる。この初ひびわれは等曲げモーメント区間のFRP格子部に最初に発生し,その後梁全般の格子部にひびわれが進展する。各種FRPC梁の破壊時におけるひびわれ性状を図-8に示す。

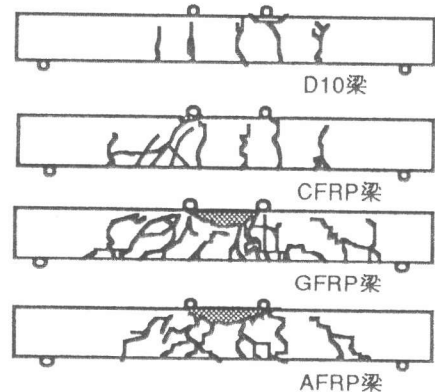


図-8 破壊時におけるひびわれ状況

#### 4-2 FRPC梁の最大ひびわれ幅

FRPC梁の最大ひびわれ幅は、FRPの引張剛性をほぼ同等にしたことで同一荷重においてはほぼ同程度の最大ひびわれ幅となった(図-9-a~d)。また図中における実線は土木学会ひびわれ算定式(10)[3]より求めた計算値である。各梁ともひびわれ発生前は全断面有効とした場合、またひびわれ発生後は引張側コンクリートを無視した各補強筋応力値を入力した。FRPC梁の付着係数 $k_1$ はD10梁と同様に1.0を入力した。これは図-5に示されるようにFRPの付着性状は異形鉄筋に劣るが、FRPC梁にひびわれが発生した後はクロス部分(横方向筋)の付着力が期待できるためである。付着力の大きなD10梁に関しては破壊まで計算値が実測値を上回り安全側の値を示した。各種FRPC梁に関してはD10梁と同様にひびわれ発生後の梁の軟化が少なく荷重初期では計算値が実測値を上回り安全側の値を示し、破壊点近傍で計算値と一致し軟化傾向が認められた。

$$\omega = K_1 \{4C + 0.7(C_S - \phi)\} \times \left( \frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon_{CS}' \right) \quad (10)$$

$\omega$  : ひびわれ幅     $C_S$  : 引張材中心間隔  
 $k_1$  : 付着係数1.0     $\sigma_s$  : 作用応力  
 $C$  : かぶり     $E_s$  : 引張材弾性係数  
 $\phi$  : 引張材径     $\epsilon_{CS}'$  : クリープ等  $\epsilon_{CS}' = 0$

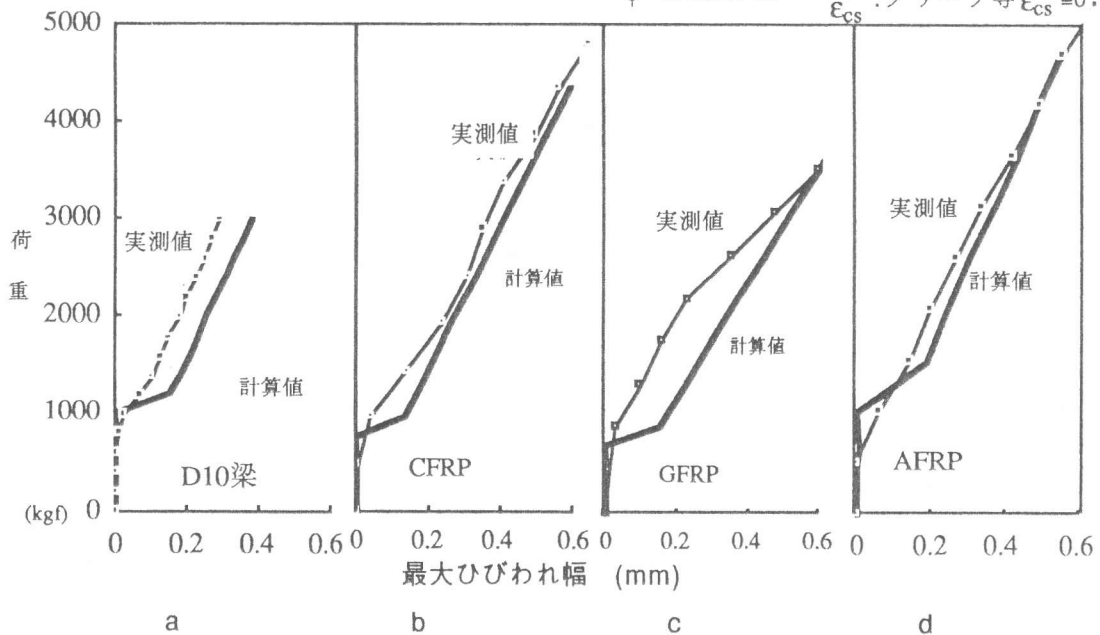


図-9 荷重と最大ひびわれ幅の関係

#### 4-3 FRPC梁のたわみ量

FRPC梁の中央点のたわみ量と荷重の関係を図-9-a~dに示す。たわみ量もひびわれ幅と同様に、各FRPC梁ともに同一の荷重に対して同程度のたわみ量となった。さらに各梁ともにひびわれ発生後においてBransonの式(11)[4]を用いて断面二次モーメントを求め、たわみ量を算出し図中に実線で示した。各種FRPC梁はD10梁同様に計算値と実測値がほぼ一致し計算により算定が可能である。こ

$$I_e = \left[ \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \times I_g + \left\{ 1 - \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \right\} \times I_{cr} \right] \leq I_g \quad (11)$$

$I_e$  : 換算断面二次モーメント     $M_{dmax}$  : 作用モーメント  
 $I_g$  : 全断面有効断面二次モーメント     $M_{crd}$  : ひびわれ発生モーメント  
 $I_{cr}$  : 引張側コンクリート無視断面二次モーメント

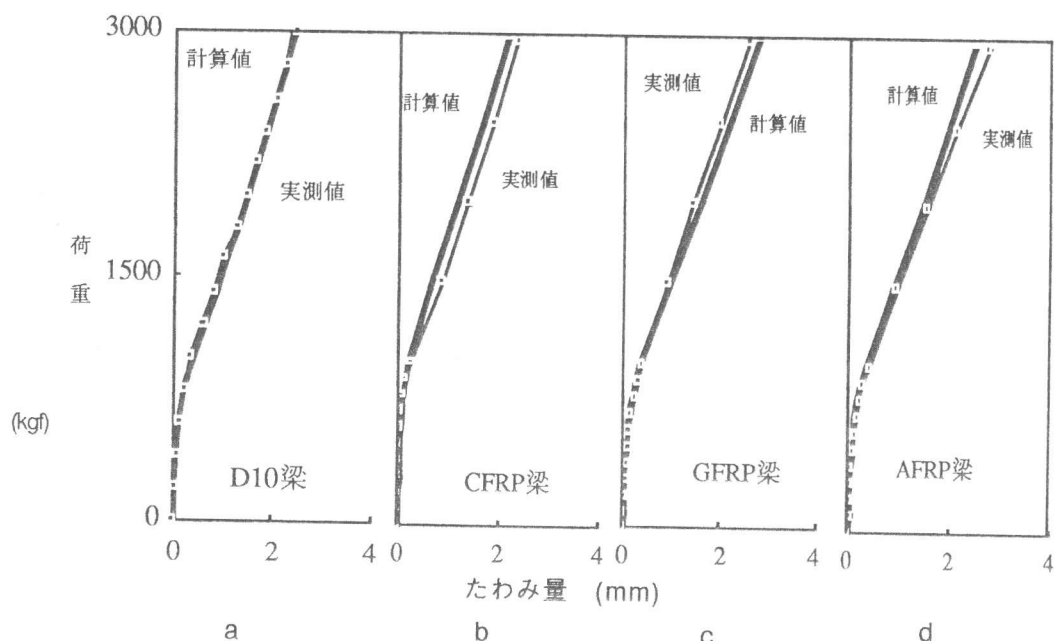


図-10 荷重とたわみ量の関係

ここで計算に用いたひびわれ発生モーメントは表-2に示す実測値を入力した。このひびわれ発生モーメント実測値は計算値に対し0.5以上の値であった。格子状FRPを用いたFRPC梁の設計時には、ひびわれ発生モーメント計算値に係数0.5を乗ずることにより、たわみ量の計算値を実測値に対し安全側の値とする必要がある。

## 5 まとめ

- 1) 格子状FRPの付着性状は、付着応力初期段階(付着応力 $20\text{kgf/cm}^2$ 程度)までFRPとコンクリートの付着が有効であり、その後横方向筋の拘束力に付着が依存される。その結果FRPC梁に発生するひびわれは格子部に発生しやすい。
- 2) FRPC梁のたわみ、ひびわれ性状は、繊維断面積と弾性係数から求めた引張剛性値を鉄筋と同等にすることでRC梁と同様の性状を呈することが分かった。このことから、ひびわれ及び変形の使用限界状態を先に考慮し繊維断面積を決定することが有効である。
- 3) 土木学会ひびわれ算定式より最大ひびわれ幅を算定することができ、さらにFRPC梁のたわみ量をBransonの式から求めた断面二次モーメントを用いて算出する場合、ひびわれ発生モーメントの計算値を半分程度にする必要がある。

## 参考文献

- [1] 辻 幸和・関島謙蔵他：格子状FRP補強したコンクリートはりの力学的性状とケミカルプレ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, P85~P93, 1991
- [2] 森田 司郎：鉄筋とコンクリートとの付着性状，コンクリート工学，Vol. 16, No. 10, Oct 1978
- [3] コンクリート標準示方書（昭和61年制定），土木学会
- [4] 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，第384号，V-7, 1987-8