

論文 水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の補強効果に関する研究

芦野 孝行*1・川瀬 義行*2・呉 智深*3・岩下 健太郎*4

要旨：本研究は、水中適用型 FRP グリッド補強工法の開発を目的としている。今回、水中適用型 FRP グリッド補強工法のコンクリート部材への接着補強工法としての有効性・実用性を評価するため、せん断付着力試験及び三点曲げ試験を実施し、標準気中施工材の炭素繊維シート（以下CFS）とも比較した。この結果、水中適用型 FRP グリッド補強工法は、コンクリート部材への接着補強工法として十分な効果が確認された。又、水中適用型炭素繊維グリッド（以下CFG）1枚は、CFS 1枚の2/3の炭素繊維量にも関わらず、優れたひび割れ分散効果により同等の曲げ耐力を発現する事が判った。

キーワード：炭素繊維，グリッド，水中硬化エポキシ樹脂，せん断付着，曲げ補強

1. はじめに

橋、高架道路、トンネル、煙突等のコンクリート構造物は、経時的な劣化や耐震基準の見直し等の為に、補強・補修が必要となっている物が多い。陸上や地中のコンクリート構造物に関しては、従来から種々の補強・補修の方法が実用化され、特に高い耐久性及び性能を有する連続繊維補強材（以下FRP）を用いた補強方法が多用されている。一方、水中環境にあるコンクリート構造物では、補強対象物の周囲に止水矢板を打設し、その内側を排水する事により、陸上と同じ作業空間を形成して補強施工を行う手法が取られている。更に、作業空間を形成する事無く既設構造物の脚部の補強を行う為、脚部の周囲に所定の間隙を設けて鋼製補強板を配し、この間隙に水中接着性接着材を注入する工法¹⁾等が提案されており、今後水中環境の補強施工に関する研究開発が一層求められて来ている。

そこで筆者らは、水環境（水中及び湿潤部）におけるコンクリート構造物の補強を想定し、排水による作業空間の形成等が不要で、且つ施工性が容易な FRP 接着工法を検討した。当初、

CFS と水中硬化エポキシ樹脂との組合せを検討したが、CFS と被補強物間に過剰な水や空気が偏在する事により、均一な補強層形成が出来なかった。ここで、上記 CFS を炭素繊維が格子状に束ねてある CFG に変更する事により、上記課題を解決し、均一な補強層を形成する事が出来た。本研究では、水中適用型 FRP グリッド補強工法の補強効果に関し、コンクリート部材を用い、せん断付着力試験及び三点曲げ試験を実施した。又、標準気中施工材の CFS とも比較した。

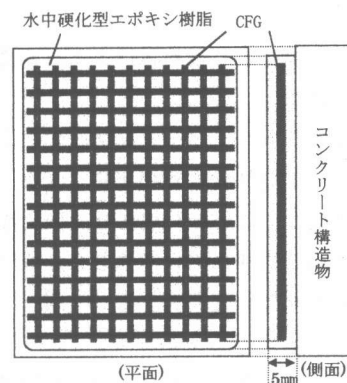


図-1. 補強仕様

* 1 日鉄防蝕(株)防食技術センター技術商品開発室（正会員）

* 2 日鉄防蝕(株)防食技術センター技術商品開発室課長

* 3 茨城大学工学部助教授 都市システム工学科 工博（正会員）

* 4 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻

2. 実験概要

今回、コンクリートとCFG補強層との接着性能及びそれによる構造部材の曲げ補強効果の確認・検証には、片引きせん断付着力試験及びコンクリート梁による三点曲げ試験を実施した。尚、本仕様のCFGの配置は、水中硬化エポキシ樹脂層（5mm厚）中央に配置した（図-1）。

2.1 片引きせん断付着力試験方法

コンクリート平板供試体（300x300x60t）を、サンダーベルトにてケレンを行い、一昼夜海水に浸漬した。当該コンクリート供試体表面に水中硬化エポキシ樹脂（下塗）を塗布した後、CFGを貼付け、該CFGを埋込む様に水中硬化エポキシ樹脂（上塗）を塗布する事により、CFG補強層（膜厚5mm、幅50mm）を形成させた。又、貼付長水準を100mm、200mm、300mm（N=3）とした。尚、CFG2枚による補強層は、貼付長100mm（N=3）とした（図-2）。

試験方法²⁾は、コンクリート平板供試体を引張試験機に接着面が鉛直になる様に固定した後、CFG補強層端部（90mm）を金属製引張治具で挟み込み、せん断付着力試験（引張速度：1mm/min）を実施した（図-3）。ここで、エポキシ樹脂層のひび割れ荷重及びコンクリート界面剥離荷重を測定すると共に、最終破壊形態も観察した。

2.2 コンクリート梁部材による三点曲げ試験方法

まず、2種類のコンクリート梁供試体として鉄筋コンクリート梁供試体及び無筋コンクリート供試体を準備し、前述の片引きせん断付着力試験の製作手順と同様にCFG補強層を形成させた。尚、供試体寸法及び補強寸法は、図-4に示した。

試験方法³⁾⁴⁾は、支点間隔を鉄筋入り供試体は1800mm、無筋供試体は800mmとし、荷重増加速度は1kN/min（载荷制御）で実施した。ここで、初期ひび割れ発生荷重、初期剥離発生荷重、鉄筋降伏荷重、破壊荷重を測定し、同時に荷重に伴う歪みを検長5mmのストレインゲージ

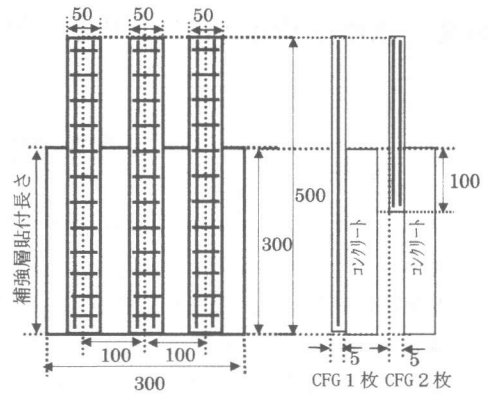


図-2. 補強層貼付寸法

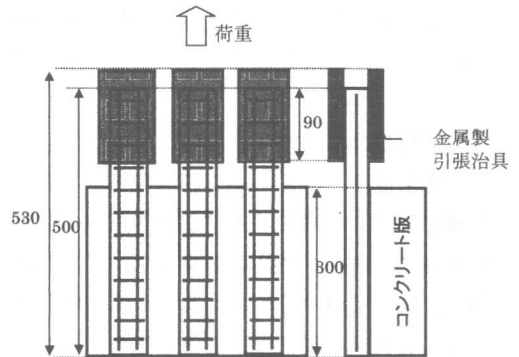


図-3. 片引きせん断付着力試験方法

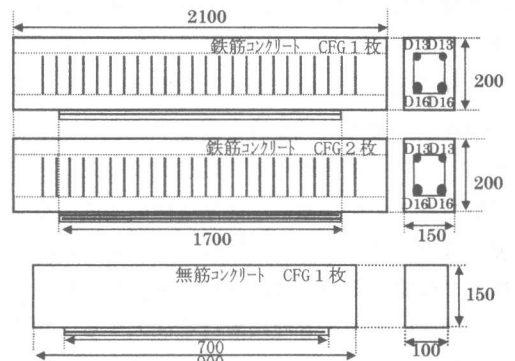


図-4. 補強層貼付寸法

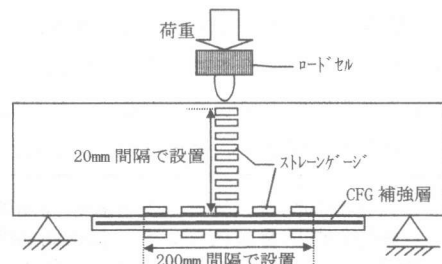


図-5. 三点曲げ試験方法

を用い、供試体側面のコンクリート表面に13ヶ所、CFG 補強層表面に5ヶ所取り付け測定した(図-5)。

2.3 構成材料の特性

供試体作製に用いたコンクリート、CFG 及び水中硬化エポキシ樹脂の基本特性を、表-1に示した。

3. 試験結果及び考察

3.1 せん断付着力及び剥離エネルギー

表-2にエポキシ樹脂層のひび割れ時の荷重及びコンクリート界面剥離時の荷重を示した。ここで、CFG 1枚の300mm 貼付時に1点だけ、最終破壊形態がCFG 破断した以外は、全て、①引張標線間のエポキシ樹脂層のひび割れ、②コンクリートとの界面剥離の順で破壊が進行していった。この破壊形態別の各々の荷重は、CFG 1枚の場合、①は4.12kN~10.39kN、②は8.23kN~14.11kN (14.11kN はCFG 破断) であった。尚、今回の水準では、補強層のコンクリート貼付長とせん断付着力には、相関性は無かった。従って、CFG 1枚の有効付着長は水準NO.1-1の100mm よりも短い事が唆された。

この結果を用い、CFG 接着工法としての実効性を評価する為に、CFG 補強層の剛性(ヤング率×厚み)を基にコンクリート剥離エネルギーを算出した。尚、CFG 補強層の剛性を算出する際には、前述の通り、せん断付着力試験時の破壊順序(エポキシ樹脂層のひび割れ後、せん断付着力が発現)を考慮し、CFG 単体の炭素繊維の厚み(炭素繊維量換算厚:0.076mm/1枚)を用いて算出した。

CFG 1枚の補強層の剛性(Et1)、CFG 2枚の補強層の剛性(Et2)及び単位幅当のせん断付着力最大荷重(表-2より、平均最大破壊荷重を用いた)との関係を表-3、図-6に示した。尚、CFS²⁾における同関係(下地処理水準による平均値)も併記した。これより、CFG 1枚及び2枚は、何れもCFSの剛性に対するせん断付着力最大荷重と同等である事が判った。

表-1. 供試体材料特性

材料	特性	特性値	備考
コンクリート G _{max} =20mm	コンクリート	圧縮強度MPa	21.4
	平板	ヤク ¹⁾ 係数 kN/mm ²	22.0
	鉄筋	圧縮強度MPa	30.2
	コンクリート梁	ヤク ¹⁾ 係数 kN/mm ²	36.7
	無筋	圧縮強度MPa	30.2
水中硬化 エポキシ樹脂	引張強度 N/mm ²	30.0	断面積 4.4mm ² 炭素繊維含有率: 43% 30mm 格子の連続体 *CFGのヤク ¹⁾ 率は 230kN/mm ² ×0.43
	ヤク ¹⁾ 係数 kN/mm ²	7.28	
CFG	引張強度 kN/mm ²	1.40	断面積 4.4mm ² 炭素繊維含有率: 43% 30mm 格子の連続体 *CFGのヤク ¹⁾ 率は 230kN/mm ² ×0.43
	ヤク ¹⁾ 係数 kN/mm ²	100*	
	繊維目付 g/m ²	137	

表-2. 片引きせん断付着力試験結果

NO	貼付長さ (mm)	エポキシ樹脂層ひび割れ時の荷重 (kN)	最大破壊荷重 (kN)	最終破壊形態
1-1	100	7.25~8.04	8.82	コンクリート界面剥離
		6.27~7.45	8.23	コンクリート界面剥離
		建研式接着力試験に使用 (1.86~3.14MPa)		
1-2	200	5.29	9.21	コンクリート界面剥離
		4.12~5.49	10.00	コンクリート界面剥離
		6.27~7.06	12.64	コンクリート界面剥離
1-3	300	6.66~10.39	14.11	CFG 破断
		6.08~7.94	8.72	コンクリート界面剥離
		5.29~6.47	9.31	コンクリート界面剥離
1-4	100(2枚貼付)	10.2	11.56	コンクリート界面剥離
		7.84~8.62	9.70	コンクリート界面剥離
		9.02~11.17	13.43	コンクリート界面剥離

表-3. 代入数値及び算出結果

	CFG 1枚の補強層	CFG 2枚の補強層
E _f	炭素繊維: 230kN/mm ²	
t _{cf}	0.076mm	0.152mm
b _{cf}	5cm	
P _{max}	10.13kN(平均値)	11.56kN(平均値)
E _t	Et1: 17.5kN/mm	Et2: 35.0kN/mm
P	P1: 1.91kN/cm	P2: 2.31kN/cm

次に剥離エネルギーG_fを次式²⁾⁵⁾により算出した。

$$P_{max} = b_{cf} \sqrt{(2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot t_{cf})} \quad (1)$$

ここでP_{max}はせん断付着最大耐力(N)、b_{cf}は付着幅(mm)、G_fは剥離エネルギー(N/mm)、E_fはFRPシートのヤング率(N/mm²)、t_{cf}は補強層の厚み(CFSはFRPシートの厚み、CFGは補強層の炭素繊維量換算厚)(mm)である。

この結果(表-4)、G_fの平均値は、CFG1枚で1.17N/mm、2枚では0.76N/mmとなり、CFSのG_f(平均値0.60~1.40N/mm)の範囲内に収まる。従って、CFGは、CFSと同等の剥離耐力があると考えられ、同時にFRP接着工法としてのG_f≥0.5N/mmと定められている⁵⁾事も考慮すると、当該CFG補強工法は、コンクリート部材に関する接着補強工法として十分に適用可能である事が判った。

3.2 設計曲げ剥離エネルギーから見た剥離時のシート応力最大値

次に、3.1で示した剥離エネルギー G_f を用い、剥離時のシート応力最大値を次式⁵⁾にて算出し、CFSのそれと比較した。

$$\sigma f \leq \sqrt{(2 \cdot G_f \cdot E_f / n_f / t_f)} = \sigma f_{\max} \quad (2)$$

ここで、 σf は最大曲げモーメントによる曲げひび割れ位置での応力(N/mm²)、 E_f はFRPシートのヤング率(N/mm²)、 n_f はFRPシートの積層数(枚)、 t_f はFRPシート一枚の炭素繊維の厚み(CFSはFRPシート1枚の厚み、CFGは補強層の炭素繊維量換算厚)(mm)とし、 σf_{\max} は剥離時のシート応力最大値である。

表-4より、 σf_{\max} に関し、CFS1枚の2/3の炭素繊維量であるCFG1枚及び炭素繊維量が4/3のCFG2枚では、CFSとほぼ同等の平均値を示すと推定した。更に、何れの σf_{\max} 平均値も、炭素繊維引張許容応力2.8kN/mm²より小さいことから、全て剥離破壊モードになるとも推定した。これらのCFGのせん断曲げ補強効果に関する解析結果を検証する為に、三点曲げ試験を行った。

3.3 コンクリート梁部材による三点曲げ試験並びに計算値との比較検証

鉄筋コンクリート及び無筋コンクリートを用いた曲げ試験時の変位と荷重の関係を図-7・図-8に示した。尚、CFS試験結果⁴⁾も同様に併記した。図-7より、鉄筋コンクリートの供試体は、CFG1枚では約9kNで初期ひび割れが発生し、鉄筋降伏点強度に到達以後も更に15mm変位し、最大77kNで供試体中央部付近におけるCFGの破断破壊となった。又、CFG2枚では12.5kNで初期ひび割れが発生し、同様に鉄筋降伏点強度に到達以後も更に23mm変位し、最大92kN時(変位19mm時)に供試体中央部付近で剥離ひび割れ発生後、中央から端部へ約35cm剥離進展した。この間、荷重の増加はほとんど見られず、変位は19mmから28mmまで変化した。またこの時、CFG補強層の剥離進展に伴いコンクリートの圧壊が生じ始め、供試体は大きく撓んだ

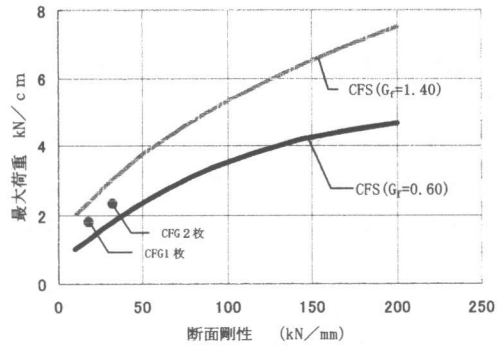


図-6. 最大荷重-剛性の関係

表-4. 代入数値及び算出結果

	CFS	CFG 1枚	CFG 2枚
G_f	平均値 0.60~1.40N/mm	平均値 1.17N/mm (0.77~2.28N/mm)	平均値 0.76N/mm (0.54~1.03N/mm)
E_f	230kN/mm ²	230kN/mm ²	230kN/mm ²
n_f	1	1	2
t_f	0.111mm		0.076mm
σf_{\max}	平均値 1.58~2.41kN/mm ²	平均値 2.66kN/mm ² (2.16~3.71kN/mm ²)	平均値 1.52kN/mm ² (1.28~1.77kN/mm ²)

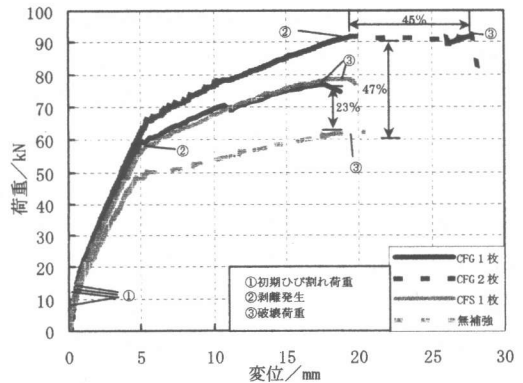


図-7. 鉄筋コンクリート供試体荷重変位曲線

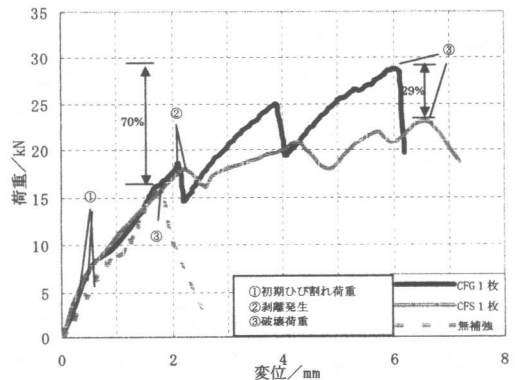


図-8. 無筋コンクリート供試体荷重変位曲線

中，剥離進展の停止も観察された。大きく撓んだ事により接着界面の応力分布が変化し，剥離がしにくくなったと考えられ，理論的な究明が今後期待される。又この事から，変位に伴う CFG 補強層の引張応力が増加した事で，最終的には CFG の破断となった。ここで，CFG 補強層を形成した場合には，バランス破壊を起こした無補強の供試体に比べ，CFG 1 枚では 23% の曲げ耐力が向上し，CFG 2 枚に於いては曲げ耐力で 47%，靱性で 45% それぞれ向上する事が認められた。更に，CFS との比較から，CFG 1 枚の供試体曲げ耐力は，CFS 1 枚のそれとほぼ同等の値を示したが，前項で推察した破壊モード（剥離破壊⇒破断破壊）とは差異が生じた。

図-8 の無筋コンクリートにおける無補強供試体では，曲げ耐力に対する抵抗はコンクリートのみである為，最大荷重直後の耐力は急激に低下するのに対し，CFG 補強層による供試体では，曲げ補強耐力が 70% 向上し，CFS 1 枚と比較しても，同耐力が 29% 向上する事が判った。又両者とも，剥離破壊であった。

今回の三点曲げ試験結果で，3.2 で推定した剥離モードの予想とは一致しなかった事を鑑み，コンクリート梁供試体の剥離発生に伴う G_f の査定⁵⁾（今回の補強供試体層数が 3 枚以下の為，ひび割れ間隔を 150mm とし，従来の鉄筋コンクリート部材の曲げ理論に基づき算出した）を行い，表-5 にせん断付着力試験時の G_f の計算値も併記した。CFG 1 枚では，破断破壊となっている事から， G_f が 0.78N/mm 以上で有る事が判った。又，CFG 2 枚では，剥離限界として評価すると， G_f が計算値より向上している事（0.76 ⇒ 1.84N/mm）も判明した。又，CFS に於ける G_f は，代表値のバラツキ範囲内で有った。上記結果から，CFG が推察した剥離破壊とはならなかった原因は，曲げ応力の補強層に掛かるせん断応力を発生させる CFG 補強層の軸差応力にひび割れ挙動が影響していると推定される為，曲げ試験供試体の曲げひび割れ挙動を解析し次項で考察を行った。

表-5. G_f の曲げ試験結果からの査定値とせん断付着力試験結果からの計算値

	査定値 G_f (N/mm)	計算値 G_f (N/mm)
CFG1 枚補強梁 (破断破壊)	>0.78	1.17
CFG2 枚補強梁 (剥離・破断破壊)	1.84	0.76
CFS1 枚補強梁 (剥離破壊)	1.10	0.60~1.40

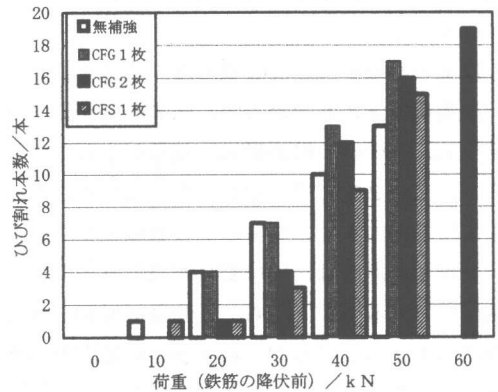


図-9. ひび割れ本数 - 荷重

表-6. ひび割れ間隔一覧
(鉄筋降伏直前)

	最大ひび割れ間隔 (mm)	平均ひび割れ間隔 (mm)
無補強	165	93
CFS 1 枚	100	72
CFG 1 枚	95	59
CFG2 枚	110	66

3.4 コンクリート引張部におけるひび割れの分散・抑制効果

3.3 に示した鉄筋コンクリート供試体における曲げ補強効果の発現要因を解析する為，当該供試体に発生したひび割れ本数及びコンクリートひび割れ幅を測定し，その結果を図-9・図-10に示した。

図-9 より，鉄筋降伏前の CFG 補強時のひび割れ本数は，無補強材及び CFS 補強時に比べ多い。従って，CFG 補強では，ひび割れ間隔の縮小による曲げ応力の分散効果が発現する事が認められた。表-6 より，鉄筋降伏直前の CFG の平均ひび割れ間隔は，CFS と比べ小さく，CFG 格子の交差部近傍で多く発生している事（写真-1）から，CFG の交差部の存在により，ひび割れが容易に発生するひび割れ促進効果があると推察出来る。又，CFG 1 枚と CFG 2 枚の鉄筋降

伏直前のひび割れ本数及びひび割れ間隔の有意差はほとんど見られなかった。更に、図-10より、CFG 1枚のひび割れ幅は、CFS 1枚の2/3の炭素繊維量にも関わらず、無補強材のそれに比して大幅に小さい。即ち、ひび割れ抑制効果も十分にある事が判った。残念ながらCFG 2枚に付いては、データ採取しなかった為、炭素繊維量によるひび割れ幅と荷重の相関性の確認は出来なかった。

以上の結果から、CFG1枚では、CFS1枚の2/3の炭素繊維量にも関わらず、同等の曲げ耐力が発現し、その時の破壊形態に差異が生じた原因及び、CFG 2枚では、CFS 1枚の4/3の炭素繊維量にも関わらず、同等以上の剥離エネルギーが発現した原因は、ひび割れ間隔の縮小による曲げ応力分散効果、即ち、補強層に掛かるせん断応力を発生させるCFG補強層の軸差応力が低下した事に起因した為と考えられる。

4. 結論

水中適用型CFG補強層を用いた場合のせん断剥離及び、曲げ補強効果等を本研究で検証した結果、以下の事が明らかとなった。

- (1) 水中適用型CFG接着工法は、標準気中施工のCFS接着工法と比較した結果、コンクリート部材への補修・補強方法として十分な効果が確認された。
- (2) コンクリート曲げ試験結果から、無補強の供試体よりもCFG補強層を形成させた供試体は、曲げ補強耐力が大幅に向上し、CFG 1枚の供試体と炭素繊維量が2/3のCFG 1枚の供試体は、概ね同等の耐力値を発現する事が判った。
- (3) CFG接着工法は、CFS接着工法と比べ、優れたひび割れ分散効果が発現する事が判った。

今後、曲げ補強に関するCFGのひび割れ促進メカニズム、及びCFG補強層の軸差応力に関するひび割れ分散効果の影響について確認する。

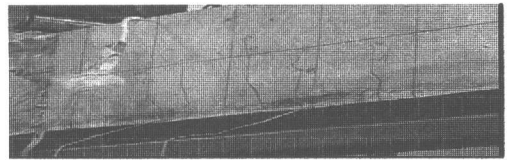


写真-1. 破断状況

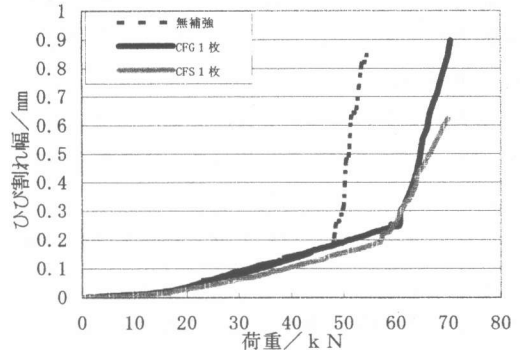


図-10. ひび割れ幅-荷重

謝辞：本研究に際し御助力を得た、日鉄コンポジット㈱の皆様には、感謝致します。

参考文献

- 1) 近藤，池田他：鋼板接着後27年が経過したRC床版の鋼合成サンドウィッチ工法による再補修，第55回土木学会講演会講演概要集，vol. 2, 2000
- 2) 吉澤，呉他：連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討，土木学会論文集，No. 662, Vol. 5-49, pp. 105-119, 2000.
- 3) 呉，松崎他：CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol. 641 / V-46, pp. 153-165, 2000. 2
- 4) 呉，黒川他：梁部材におけるFRP面状補強材の界面接着・剥離メカニズムに関する研究，構造工学論文集，Vol. 46A / pp. 1469-1478, 2000. 3
- 5) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，土木学会，コンクリートライブラリー101, 2000. 7
- 6) 黒川徹二：FRP面状補強材の界面接着・剥離メカニズムおよび補強効果の解明，茨城大学修士論文，2000. 3