

論文

[1146] CFRC 合成部材の耐荷性能と寸法変化に関する実験的研究

正会員 ○片平富二夫 (住友金属工業)

正会員 白川 潔 (住友金属工業)

1. まえがき

コンクリートと鋼材とを複合化した部材が各種の用途に用いられている。これは引張に弱いというコンクリートの欠点を鋼材により補った合理的な構造部材であり、RCやSRC等の大型構造部材の他にも、高速道路の橋桁の補修工法として鋼板をコンクリートの周りに接着したものや、鋼板とセメント板とを複合化した二重床用パネル等多種に渡っている。一方、コンクリートやモルタルそのものの強度向上を図ったものとして繊維補強があり、鋼繊維、ガラス繊維、炭素繊維等が実用化されている。

既報¹⁾では、炭素繊維補強セメント(CFRC)と鋼板とを機械的アンカーにより一体化させた合成梁の強度特性を調査し、ほぼ全塑性モーメントまで耐力を発揮させられることを示した。ここでは、このCFRCと鋼板とからなる合成部材(パネル)の耐荷力におよぼすCFRC物性、機械的アンカーの形状、間隔の影響およびCFRCの乾燥収縮による合成部材の寸法変化について明らかにしたのでその結果につき報告する。

2. 中央集中荷重による強度特性

2-1 試験方法

図1に示す2種類の形状・寸法のアンカーについてAを標準、Bを比較材として、アンカーの間隔を2種類変化させて、薄鋼板の型枠(600×600×0.6mm)に加工した。この型枠に厚さが25mmとなるようCFRCを流し込み成形し硬化させた。CFRCの配合を表1に示す。シラスバルーンを主骨材とし、CFを2vol%混入したS2を標準配合とし、CF混入量を1vol%、0としたS1、S0およびマトリックス強度を高めるため微粉硅砂を主骨材としたK2についても比較検討した。なお、供試したCFはピッチを原料としたもので、直径が18μm、引張強度が60kgf/mm²、弾性係数が3tf/mm²、長さが10mmである。打設後は60℃×5hrの蒸気養生を行い、その後自然乾燥して供試した。これらCFRCの強度特性を表2に、鋼板の機械的性質を表3に示す。また供試パネルの形状・寸法を図2に、諸元を表4に示す。供試パネルは比較のためエポキシ樹脂でCFRCと鋼板とを接着した1種を含む7種類である。

これらパネルの強度特性は以下の試験方法により評価した。まず、40mm^φ支持台上にパネルの

表1 CFRCの配合

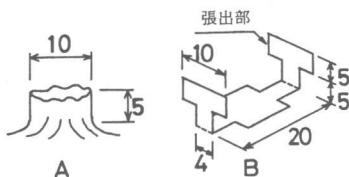


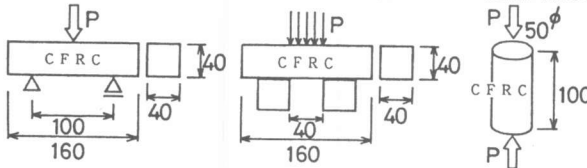
図1 アンカーの形状・寸法

記号	W/C (%)	S/C (%)		増粘剤 MC/C (%)	消泡剤 Af/C (%)	CF Vf V01%
		シラスバルーン	微粉硅砂			
S2						2
S1	6.0	1.5	7.5	0.25	0.025	1
S0						0
K2	5.0	—	5.0	0.5	0.1	2

表2 C F R Cの物性

記号	曲げ強度*1 (kgf/cm ²)	せん断強度*2 (kgf/cm ²)	圧縮強度*3 (kgf/cm ²)	弾性係数*3 (kgf/cm ²)
S 2	9 7	7 0	2 5 3	8.8 × 1 0 ⁴
S 1	6 7	6 8	2 9 6	9.4 × 1 0 ⁴
S 0	5 6	5 2	3 3 0	9.2 × 1 0 ⁴
K 2	1 0 0	1 0 8	3 6 1	1 2.1 × 1 0 ⁴

* 1 曲げ試験方法 * 2 せん断試験方法 * 3 圧縮試験方法



4隅部を載せ、中央に50mmφの丸鋼にて単調載荷し、破壊に至らしめた。

測定は載荷点直下のたわみについて行い、剛性の指標とした。供試パネル数は同一条件につき2体とし、それらの平均値により評価した。試験方法の概略を図3に、試験状況を写真1に示す。

2-2 結果および考察

2-2-1 アンカー形状の影響

荷重～たわみ曲線の代表例を図4に、剛性の指標として荷重とたわみが直線関係にある300kgf載荷時のたわみ、最大荷重および破壊形式を表5にとりまとめ示す。なお、エポキシ樹脂による接着パネルCS2との比較のため、表中にたわみの逆数比および最大荷重の比を示すが、エポキシ樹脂接着の場合はほぼ完全合成板と見なせる。

アンカー形状の影響を、たわみの逆数比となる剛性の比で評価すると、A50S2、B50S2はそれぞれCS2の0.86、0.81であり、ア

ンカー形状による剛性の差異は小さいことが判る。また、これらは完全合成板の80%以上の剛性を有する。最大荷重はA50S2が1430kgf、B50S2が1480kgfであり、CS2の0.75、0.78となり、アンカー形状による最大荷重の差異は小さい。しかし、破壊形式はCS2、B50S2が載荷部のせん断破壊（パンチングシエア）であるのに対し、A50S2は曲げ破壊となっている。これは、B50S2がアンカーの張出部（図1参照）の効果でCFRCより抜けにくくなり曲げ耐力が向上したのに対し、せん断耐力はアンカー形状に影響されないため、曲げ耐力がせん断耐力を上回り、せん断破壊が先行したと考えられる。また、図よりたわみ性能を比較すると接着パネルCS2は最大荷重時

表3 鋼板の機械的性質

降伏点 σ_y (kgf/mm ²)	破断強度 σ_u (kgf/mm ²)	伸度 (%)
36.8	44.7	32.0

表4 供試パネル諸元

記号	アンカー		配合
	形状	間隔(mm)	
A 5 0 S 2	A	5 0	S 2
B 5 0 S 2	B	5 0	S 2
A 3 5 S 2	A	3 5	S 2
A 5 0 S 1	A	5 0	S 1
A 5 0 S 0	A	5 0	S 0
A 5 0 K 2	A	5 0	K 2
C S 2	エポキシ樹脂接着		S 2

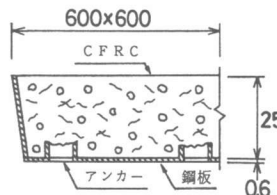


図2 供試パネルの寸法

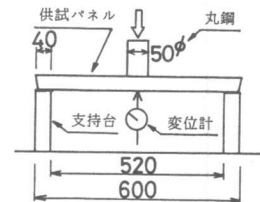


図3 載荷試験方法

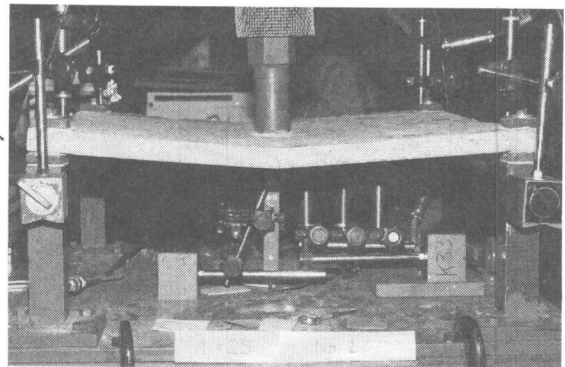


写真1 パネルの強度試験状況

のたわみが小さく、最大荷重後は急激に荷重が低下している。一方、A50S2、B50S2は最大荷重時のたわみがそれぞれCS2の1.5倍、2.5倍と大きい。これは接着の場合、CFRCと鋼板とのずれ変形に対してパネル全面で抵抗するため、最大荷重までの剛性低下は小さいが、せん断破壊と同時に鋼板がCFRCより剥離するため、急激な荷重低下を生じる。これに対して機械的アンカーによるA50S2、B50S2は応力の高いパネル中央付近のアンカーがずれ変形に抵抗し、A50S2は主としてCFRCの圧縮塑性変形が、B50S2は主

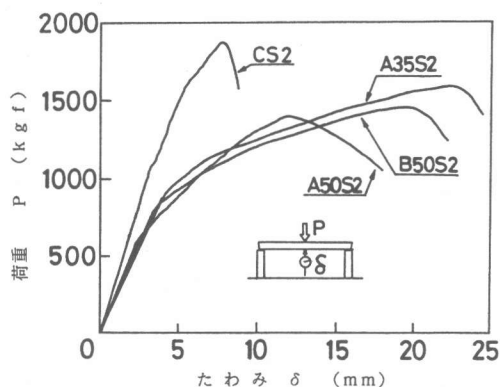
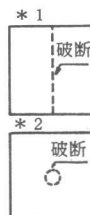


図4 荷重～たわみ曲線（アンカーの影響）

表5 パネルの強度特性（アンカーの影響）

としてアンカーの引張塑性変形が徐々に進むため、最大荷重時のたわみが大きくなると考えら

記号	たわみ(300kgf)		最大荷重		破壊形式
	mm	剛性比	kgf	比	
A50S2	1,10	0,86	1430	0,75	曲げ破壊*1
B50S2	1,17	0,81	1480	0,78	載荷部のせん断破壊*2
A35S2	1,08	0,88	1540	0,81	載荷部のせん断破壊*2
CS2	0,95	1,00	1900	1,00	載荷部のせん断破壊*2



れる。また、最大荷重以後も鋼板がCFRCより剥離しないことより荷重低下も緩やかであった。このことより、機械的アンカーによるパネルの方が接着によるパネルよりも変形能力が大きくなることが判る。

なお、パネルの応力状態は次のように評価する。弾性範囲内にある4隅支持の正方形板の中央にP kgf 載荷した時に発生する最大曲げモーメントMは近似的に

表6 最大耐力（曲げモーメント）

記号	M ((1)式による)	M _p (全塑性モーメント)	M/M _p
A50S2	547	508	1,08
B50S2	567		1,12
A35S2	591		1,16
CS2	730		1,44

(単位:kgf・cm/cm)

$$M = (0.1034 \ell n \frac{a}{u} + 0.129) \cdot P \quad \text{--- (1)}$$

ここに a : 正方形板の一辺の長さ u : 載荷板の一辺の長さで表せる²⁾。完全合成梁を仮定した剛性により各荷重時の応力状態を求めると、約600kgf載荷でCFRCには引張ひびわれが生じ、約1300kgf載荷で鋼板が降伏する。また最大荷重時の発生モーメントの計算値とパネルの全塑性モーメントの計算値を比較して表6に示す。表より、A50S2、B50S2の発生モーメントは全塑性モーメントより約10%高く、機械的アンカーを用いることによりパネルの強度を十分確保できることが判る。

2-2-2 アンカー間隔の影響

アンカー間隔の異なるA50S2とA35S2とを比較すると剛性はほぼ同等であるが、A35S2の方が最大荷重が8%、最大荷重時のたわみが約2倍大きい。また、破壊形式はA50S2が曲げ破壊に対し、A35S2は載荷部のせん断破壊である。これらの差異は間隔が小さい方が鋼板とCFRCとの

ずれあるいは剝離力に対するアンカー1個当りの分担力が低いことによる。すなわち、曲げ耐力が向上し、せん断耐力を上回ったため、せん断破壊が先行したと考えられる。

2-2-3 CF混入量の影響

荷重～たわみ曲線の代表例を図5に、300kgf 荷重時のたわみ、最大荷重および破壊形式を表7にまとめて示す。図、表より明らかなように、CF混入量が少

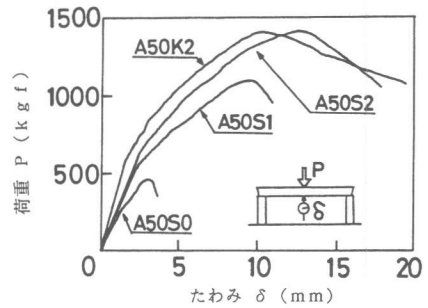


図5 荷重～たわみ曲線 (CFRRCの影響)

くなるにしたがいパネルの最大荷重が低下し、CF未混入のA50S0の最大荷重はCFを2 vol%混入したA50S2の1/3となる。また、A50S0は剛性も大きく低下しているが、これはCFが混入されていないためアンカーの引抜け等に対しての抵抗が小さくなり、載荷初期よりアンカーの引抜けが生じ、鋼板

とセメント板との一体化が図れなかったことによると考えられる。表6と同様に最大荷重時の発生モーメントの(1)式による計算値と全塑性モーメントの計算値とを比較して表8に示す。表より、全塑性モーメントまで耐力を保持するにはCFRRC強度を高める必要があり、本構造であればCFを2 vol%程度混入する必要があることが判る。

表7 パネルの強度特性 (CFRRCの影響)

記号	たわみ(300kgf)		最大荷重		破壊形式
	mm	剛性比	kgf	比	
A50S2	1.10	1.00	1430	1.00	曲げ破壊
A50S1	1.29	0.78	1180	0.83	曲げ破壊
A50S0	1.64	0.61	490	0.34	支持部の曲げ破壊
A50K2	0.88	1.14	1400	0.98	曲げ破壊

表8 最大耐力 (曲げモーメント)

記号	M ((1)式による)	M _p (全塑性モーメント)	M/M _p
A50S2	547	508	1.08
A50S1	453	516	0.88
A50S0	186	521	0.36
A50K2	539	547	0.99

(単位:kgf·cm/cm)

2-2-4 CFRRC強度の影響

表2に示すようにシラスバルーンを主骨材とするS2と比較して、微粉硅砂を主骨材とするK2は曲げ強度は同等であるが、せん断強度が54%、圧縮強度43%、弾性係数が38%高い。一方、パネルの強度性能を図5および表7の結果について比較すると、CFRRCの弾性係数の差に対応して、初期剛性はA50K2の方が14%高い。しかし、最大荷重はいずれも全塑性モーメントに達しており、変形能力もほぼ等しく、破壊形式も同様に曲げ破壊であり、CFRRC配合による差異は認められない。すなわち、パネルの強度を確保するにはマトリックスの配合にかかわらず、CFを2 vol%程度混入することが必要となることが判る。

3. CFRRCの乾燥収縮によるパネルの寸法変化

3-1 試験方法

CFRRCは乾燥時に収縮変形するため、今回の供試パネルの様に片面のみ鋼板と一体化した場合はCFRRCの収縮変形に対して鋼板が抵抗し、CFRRC側が凹状にそることになる。このそりを解消する方法としてCFRRCに膨張材を混入し、予めパネルのCFRRC側を凸状にそらせておき、乾燥収縮によるパネルのそりをなくすことが考えられる。ここでは、膨張材混入量とパネル

のそり量との関係を明らかにした。配合はS2を標準とし、膨張材を対セメント比で0、10、15%の3種類変化させた。養生は膨張変形を考慮して約24hrの気中養生後に脱型し、60℃×5hrの蒸気養生を実施した。供試体は2種類で、その形状・寸法はCFRCの寸法変化測定用が $160^1 \times 40^w \times 10^t$ mm、パネルをモデル化した合成梁のそり測定用が $600^1 \times 100^w \times 25.6^t$ mm（CFRCが25mm、鋼板が0.6mm）である。なお、アンカー形状は図1のA、間隔は50mmである。供試体は蒸気養生後に110℃の槽内にて乾燥し、最大72hrまで調査した。測定方法を図6、図7に示す。CFRCの寸法変化は標点間を100mmとして気中養生後にコンタクトボールを埋め込み測定した。また、合成梁のそりは基準線からの変形をダイヤルゲージにより測定した。



図6 乾燥収縮測定方法

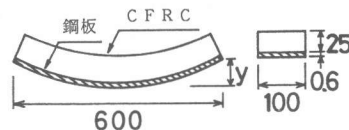


図7 合成梁のそり測定方法

3-2 結果および考察

3-2-1 CFRCの寸法変化

膨張材を混入したCFRCは蒸気養生により膨張するが乾燥が進むにつれて収縮する。図8に乾燥時間と収縮（膨張）ひずみとの関係を示す。膨張材を15%混入したCFRCは蒸気養生後に 4.2×10^{-3} 、10%混入したものは 0.5×10^{-3} 、未混入のものは 0.1×10^{-3} 膨張する。その後、乾燥が進むにつれて収縮し、24hr乾燥で膨張材15%混入のCFRCはひずみが0となり10%混入のものは 2.2×10^{-3} 、未混入のものは 3.1×10^{-3} の収縮ひずみとなる。さらに、72hr乾燥すると、それぞれ 0.6×10^{-3} 、 3.2×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} の収縮ひずみとなり、乾燥収縮によるひずみの合計量は順に 4.8×10^{-3} 、 3.7×10^{-3} 、 3.6×10^{-3} と膨張材混入量が多いほど大きくなることが判る。

なお、乾燥によるCFRCの含水率の変化を表9に示すが、72hr乾燥を絶乾状態と仮定すると、10hr乾燥で2~5%の含水率となることが判る。

3-2-2 合成梁のそり

CFRCの乾燥収縮にともなう合成梁のそり量を測定した結果を図9に示す。図8と図9との比較より明かなようにCFRCの乾燥収縮ひずみと合成梁のそりの変化は良く対応しており、膨張材15%混入の合成梁は蒸気養生後に約11mm CFRC側が凸状になるが、72hr乾燥後はそりが1mmとかなり平坦に近

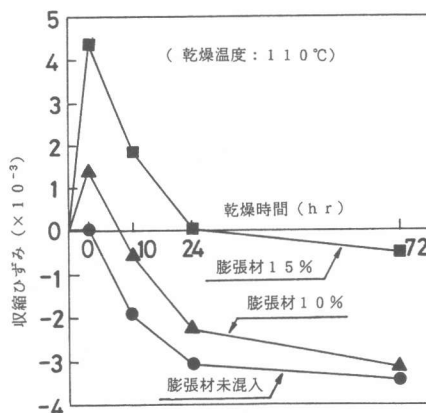


図8 乾燥収縮

表9 含水率

膨張材 wt %	乾燥 (110℃)			
	蒸気養生後	10 hr	24 hr	72 hr
0	30.0	2.6	0.5	0
10	29.0	5.2	1.2	0
15	30.9	2.6	0.6	0

(単位: %)

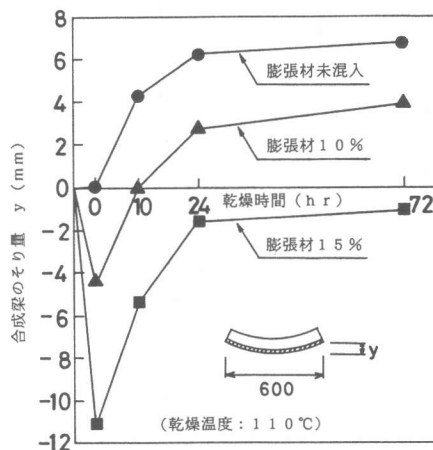


図9 合成梁のそり

くなる。また、10%混入の合成梁は蒸気養生後に4.5mm CFR C側が凸状になるが、10hr乾燥ではほぼ平坦になり、72hr乾燥では逆に4mm鋼板側が凸状になる。膨張材未混入の場合は蒸気養生後は平坦であるが72hr乾燥後は6.5mm鋼板側が凸状になる。以上の結果より、膨張材を混入することにより、CFRCに乾燥収縮が生じてもパネルを平坦に保つことが可能なことが判明した。

なお、そりが0となる膨張材の混入量はCFRCの含水率によって異なるが、例えば、この含水率を5%程度と仮定すれば、この含水状態でほぼ合成梁が平坦となる10%が膨張材の最適混入量となる。また、CFRCの含水率が大きく変化しないようにすることも重要である。

次にCFRCの乾燥収縮量と合成梁のそり量との関係を以下のように求めた。まず、CFRCの収縮ひずみを ϵ とすると、この収縮により複合板には曲げモーメントが発生し、そり y を生ずる。これらの関係を力の釣合い式より求めると、

$$y = \frac{\alpha^2 (\alpha + 1) \beta}{(\alpha^3 \beta + 1) \cdot (\alpha \beta + 1) + 3 \alpha (\alpha + 1)^2 \beta} \cdot \frac{3 l^2}{4 t c} \cdot \epsilon \quad (2)$$

ここに $\alpha = E_c / E_s$ $\beta = t_c / t_s$

E_c, E_s : CFR Cと鋼板の弾性係数 t_c, t_s : CFR Cと鋼板の厚さ
 l : 合成梁の長さ

となる。CFRCの収縮ひずみと合成梁のそりとの関係を、実験値と(2)式による計算結果とを比較して図10に示す。膨張材未混入の実験値は計算値と良く一致しているが、膨張材を混入したものの実験値は計算値よりもひずみが約 1.0×10^{-3} ずつ大きくなっている。これはCFRCのひずみ測定において気中養生時の変化を無視しているためである。

4. まとめ

CFRCと鋼板とをアンカーにより一体化した合成部材の強度特性および寸法変化について調査し、以下の結論を得た。

- (1) 適切な間隔(本実験では50mm以下)のアンカーにより一体化したCFRC合成部材は完全合成板の80%以上の剛性を有し、全塑性モーメントを超える耐力を有する。ただし、このためにはCFを2vol%程度混入する必要がある。
- (2) CFR Cと鋼板とを一体化した場合、CFRCの乾燥収縮により合成部材にはそりが生じるが、CFRCに膨張材を混入することにより、そりをなくすことが可能である。

[参考文献]

- 1) 片平富二夫、白川 潔 : CFR C合成部材の曲げ耐荷性能、日本建築学会大会学術講演会梗概集、昭和63年10月、PP. 63~64
- 2) S.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger: Theory of Plates and Shells, PP. 218~221

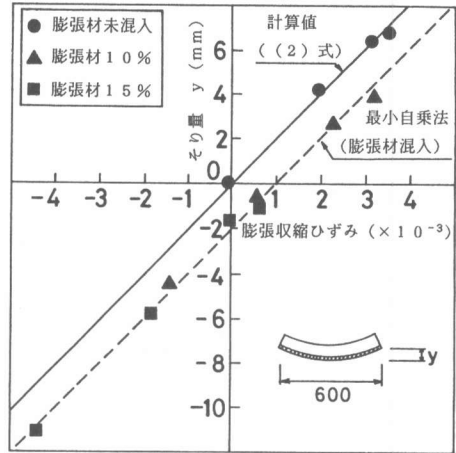


図10 CFR C収縮ひずみと合成梁のそりとの関係