

論文 薄肉帯鋼板併用繊維シート工法によるコンクリートくいの補強

角田 敦^{*1}・田中 正吾^{*2}・松本 正春^{*3}・大西 博^{*4}

要旨:本研究の目的は、繊維シートと薄肉帯鋼板により新品の PHC コンクリートくいを補強し、曲げ耐力およびじん性能を向上させることにある。くいの表面軸方向にエポキシ樹脂とともに繊維シートと薄肉帯鋼板を貼付け、さらに周方向に繊維シートを巻きつけ補強することにより、曲げ強度およびじん性能は顕著に向上し、曲げ荷重除荷後に残留変形がほとんどないことも確認された。また、曲げ試験途中で発生した微小クラックが、除荷後に閉じることも確認された。さらに、除荷後のくいを切り出し、切断面を拡大鏡で観察してもクラックを見出すことができなかった。

キーワード: 繊維シート、鋼板、コンクリートくい、曲げ耐力、クラック、最尤法

1. はじめに

コンクリートくいはクラックおよび終局曲げ耐力設計値から、各形状・タイプに対してそれぞれA, B, C種の3種類を有している。需要の大部分はA種であり、A種は在庫生産を、B, C種は受注生産を原則としている。くいの曲げ耐力が重要となり、B, C種の需要が増えることが見込まれ、A種を簡便にB, C種に補強可能な技術開発が要望されている。また、すでに在庫になっているA種くいをB, C種に補強し、有効活用することも重要な課題である。

本研究では、繊維シートと薄肉帯鋼板（複合シート）による補強方法について実験的に検討した。まず、無筋コンクリート版を複合シートで補強し、施工方法を決定し、補強材料を選定した。そこで、最適材料の複合シートと施工方法でA種コンクリートくいを補強し、曲げ耐力の向上効果の確認、曲げ載加途中および除荷後のクラックの挙動を確認^{1), 2), 3)}した。

2. 使用材料

補強用繊維材料として高弾性率アラミド繊維、高強度炭素繊維およびガラス繊維を選定し、薄肉帯鋼板として構造用炭素鋼S55C（板厚 1.2mm, 幅 20mm）を適用し、特性を表-1に示した。また、軸方向および周方向の補強に使用した織物を表-2に示した。プライマーおよび接着含浸用樹脂として、ビスフェノールA型常温硬化エポキシ樹脂を採用した。無筋コンクリート版は長さ 80cm, 幅 80mm, 厚さ 50mmとし、測定時のコンクリート圧縮強度は 25N/mm²であった。

表-1 補強材料の力学特性

材 料	強度	弾性率
	(MPa)	(GPa)
炭素繊維	4900	230
アラミド繊維	3500	110
ガラス繊維	3430	73
S55C(薄肉鋼板)	650	210

*1 サカイ産業（株）顧問（正会員）

*2 山口大学 大学院理工学研究科 教授，工博

*3 (株)佐伯建設商品技術開発室室長

*4 東レ・デュボン（株）ケブラー技術開発部主幹

3. 無筋コンクリート版の曲げ試験

3.1 試験体の作成と曲げ試験

施工手順は次の通りである。また曲げ試験方法はスパン間600mmの単純3点曲げ試験とした。

- A. コンクリート版全面をサンダーで研磨後プライマーを塗布する。
- B. 樹脂を塗布後コンクリート版軸方向に繊維シートおよび薄肉帯鋼板を貼り付ける。
- C. 端部からの剥離防止のため、樹脂塗布後周方向に繊維シートを貼り付け養生硬化する。

3.2 施工手順と使用材料の絞り込み

施工手順と使用材料の絞り込みを目的に予備曲げ試験を実施し、結果を表-3に示した。

(1) 施工手順の考察

補強材の剥離対策から、試験番号3の樹脂塗布／繊維シート／薄肉帯鋼板／周方向シート／樹脂塗布の順序がよいことが確認された。

(2) 繊維シートの考察

A. 軸方向補強

試験番号3, 5, 6, 7より終局破壊荷重の高いアラミド繊維シートまたは炭素繊維シートが最良であることが確認された。しかし炭素繊維と接触する鋼板は電位差に由来して電気化学的に腐食されやすいので、炭素繊維シートを適用することは困難である。

B. 周方向補強

周方向補強繊維は試験番号3, 8, 9に示すように終局破壊荷重はほとんど変わらないので、軸方向補強繊維シートとコンクリートとの剥離を防止できれば良く、取り扱い易さと価格からビニロン繊維シートとした。

3.3 本試験結果と考察

予備試験を参考に、アラミド繊維シートの厚さと薄肉帯鋼板の枚数を変数として実施した本試験結果を、表-4にとりまとめた。初期クラック荷重とは、試験体に貼り付けた伸び計が最初に急変を示す伸度、すなわちコンクリートにクラックが発生するおよそ300 μ の伸びに相当する荷重である。鋼板弾性限界荷重とは、薄肉帯鋼板が塑性変形し始めるおよそ2000 μ に相当

表-2 織物の特性

呼称	補強繊維	目付(g/m ²)	公称耐力(kN/m)	補強方向
AF-20	アラミド	160	274	軸・周
AF-40	アラミド	320	490	軸
AF-60	アラミド	447	637	軸
CF-200	炭素	200	392	軸
GF	ガラス	18	27	軸・周
VF	ビニロン	140	40	周

表-3 予備試験結果

番号	軸方向補強種類と順序		周方向補強	終局破壊荷重(kN)	破壊モード
	一層目	二層目			
	0	--	---	---	
1	AF-60	---	AF-20	19.1	シート破断
2	S55C	---	AF-20	7.0	鋼板剥離
3	AF-60	S55C	AF-20	25.7	圧壊
4	S55C	AF-60	AF-20	28.2	鋼板剥離
5	CF-200	S55C	AF-20	25.3	圧壊
6	GF	S55C	AF-20	9.7	シート破断
7	VF	S55C	AF-20	8.6	シート破断
8	AF-60	S55C	VF	25.7	圧壊
9	AF-60	S55C	GF	20.8	圧壊

する荷重である。図-1には各試験体の曲げ荷重-伸度曲線を示した。複合シートとAF-40、鋼板の荷重-伸度曲線を合算した荷重-伸度曲線が一致するので、繊維シートと鋼板の間で複合則が成立する。鋼板換算補強断面積（薄肉帯鋼板断面積+（繊維断面積×繊維弾性率／鋼板の弾性率）で定義）と初期クラック荷重および薄肉帯鋼板弾性限界荷重の関係を図-2に示した。初期クラック荷重、鋼板弾性限界荷重のいずれも鋼板換算補強量により決まることが明らかとなった。すなわち、繊維シート量を最低限とし、残りの必要な補強は薄肉帯鋼板で分担させれば良いこととなる。これをもとにコンクリートくいの性能向上を検討することに決定した。

表-4 本試験結果

番号	軸方向補強材			初期クラック		鋼板弾性限界	
	繊維シート	薄肉帯鋼板	鋼板換算補強断面積*	荷重	伸度	荷重	伸度
		枚	mm ²	kN	%	kN	%
A-1	なし	0	0.0	3.11	0.035	---	---
B-1	なし	1	24.0	3.98	0.037	4.99	0.196
B-2	なし	2	57.0	4.56	0.040	7.65	0.202
B-3	なし	3	90.0	5.02	0.039	10.05	0.203
C-1	AF-40	0	9.7	3.62	0.041	4.17	0.203**
C-2	AF-40	1	33.7	4.00	0.044	7.32	0.237
C-3	AF-40	2	57.7	4.47	0.044	8.83	0.183
C-4	AF-40	3	81.7	5.10	0.044	11.37	0.200

*鋼板換算補強断面積＝薄肉帯鋼板断面積＋（繊維断面積×繊維弾性率／鋼板の弾性率）

**鋼板を使用していないので、伸度約0.200%相当の荷重を読み取った。

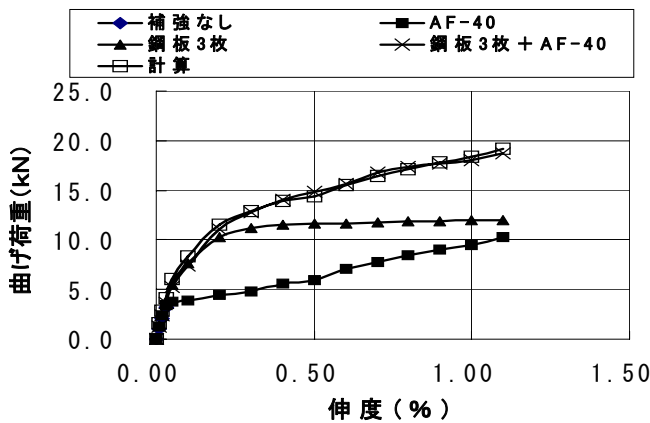


図-1 無筋コンクリート版の曲げ荷重-伸度

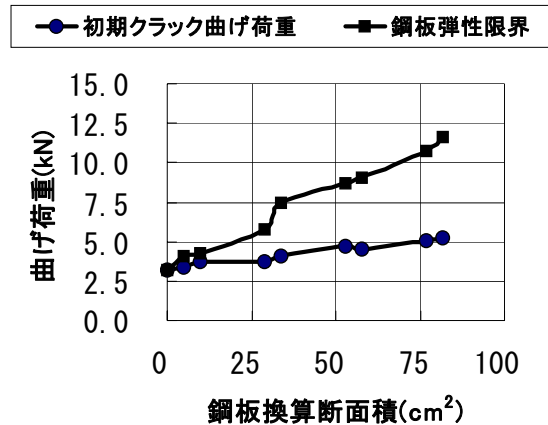


図-2 鋼板換算補強断面積と曲げ荷重

4. PHC くい の曲げ載加試験

4.1 PHC コンクリート くい と試験体の製作

(1) PHC 標準仕様コンクリート くい

くいはA種で、形状は外径400mm、厚さ65mm、PC鋼棒径7.1mm×10本、くいの断面積684cm²であった。

(2) 試験体の作成手順

3.2の記述に従い、施工手順は樹脂塗布／繊維シート(幅30cm)／鋼板／周方向シート／樹脂塗布の順序とし、繊維シートの厚さと薄肉帯鋼板の枚数を変数として試験体を作成し、写真-1に示した。

4.2 試験方法と載加結果

試験方法は図-3に示したようにJIS A 5373「プレキャストプレストレスコンクリート製品の曲げ試験」に準拠し、同時にクラックを検出した。表-5に試験体と曲げ試験結果を示した。じん性能向上確認のため、中央変位の計測とともに、ひずみ計を取り付けた。初期クラックが発生した時の曲げモーメントの向上は小さいが、終局破壊時の曲げモーメントの向上は顕著であった。図-4に試験番号101(無補強)および103試験体(複合シートによる補強)の中央たわみ量と曲げモーメントの関係を示した。

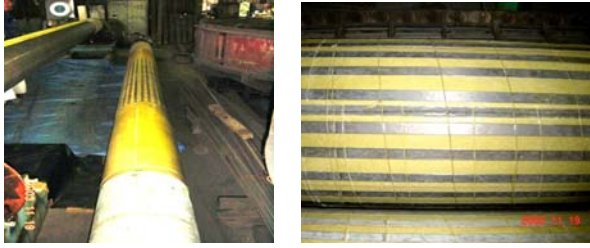


写真-1 試験体

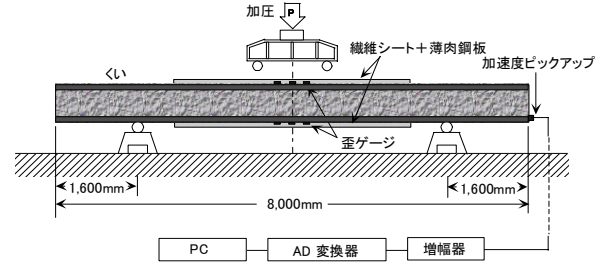


図-3 曲げ試験とクラック検出方法

表-5 試験体と結果一覧表

試験 番号	軸方向補強材		周方向 補強材	測定結果			
	繊維 シート	薄肉 鋼板 (本)		曲げモーメント		残留 変位 (mm)	破壊 モード
				クラック (kN-m)	終局破壊 (kN-m)		
101	なし	0	なし	70	100	20.5	破壊
102	AF-40	0	VF-1	73	155	---	シート破断
103	AF-20	20	VF-1	77	210	1.5	圧壊
104	AF-40	20	VF-1	81	225	1.0	圧壊
105	AF-60	20	VF-1	83	263	---	圧壊

この図より、クラック曲げモーメントから見て、複合シート工法によりA種くいをB種に補強できたが、C種には補強できなかった。一方終局破壊曲げモーメントはC種をクリアーした。無補強のくいの場合、大きなクラックが少数発生するのに対して、複合シートで補強すると、くい軸直角方向に白く見える小さなクラックが

入り、加力とともにその個数が増える傾向にあった。試験番号101(無補強)は終局破壊である100kN-mで除荷すると、残留たわみが残った。これに対して、試験番号103(複合シートによる補強)は残留たわみがほとんど検出されなかった。

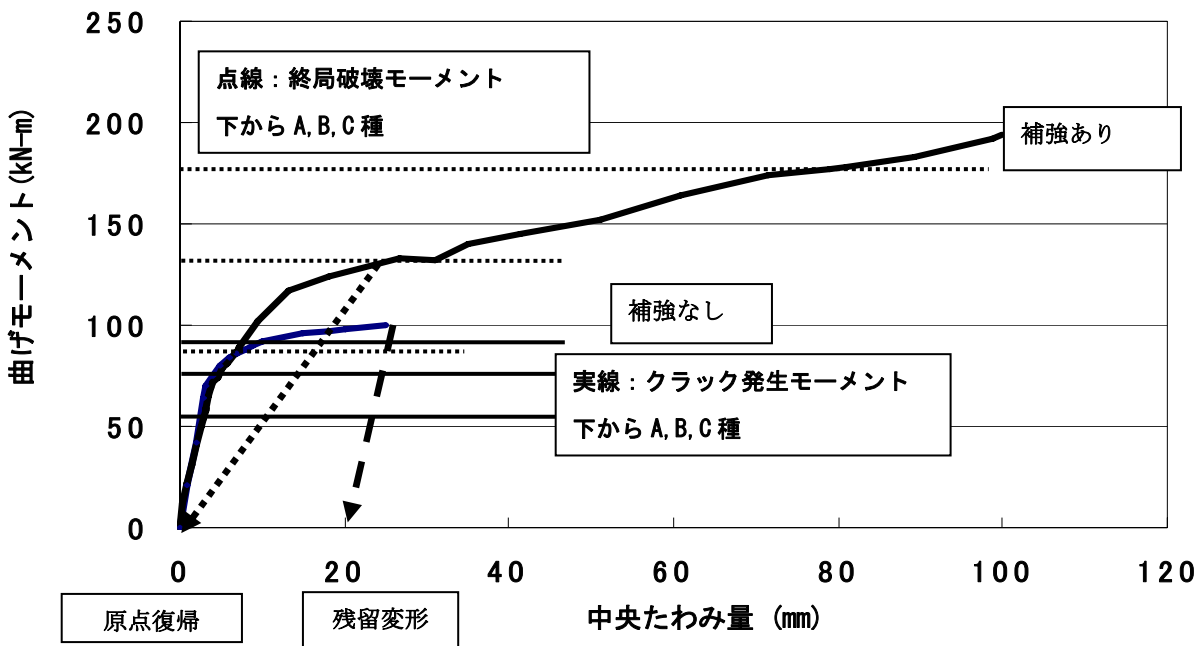


図-4 中央たわみ量と曲げモーメント

4.3 クラックの解析結果

試験番号 103 (複合シートによる補強) PHC くの補強試験体に対し荷重をかけたとき、及び除荷したときのクラック発生あるいは消滅の挙動について解析した。図-3 に示したように、加速度ピックアップをコンクリートくいの一端に取り付け、くい頭部をハンマーなどで軽く叩くことにより、くい内部に弾性定在波を発生させ、これを利用する方式である。具体的には、探索領域を幾つかのブロックに分割し、各ブロックに対して 2 つのクラックを仮定したダイナミックシステムを考え、最尤法を適用する方式である。そして、尤度関数を最大にするパラメータを求めることにより未知パラメータ (クラック位置) を推定する。また、このとき尤度関数の尖鋭度の大小でクラック幅の大小が相対評価できる。

(1) 76.5kN-m

まず、荷重を連続的に変え、最初に歪ゲージ出力の変化および破裂音が観測され、最初のクラックの発生が確認された曲げモーメントである 76.5kN-m において、計測した。図-5 (a) に示すように、検出されたクラック位置は $L=4,384\text{mm}$ となった。なお、コンクリート表面に現れるクラックに対応する白色の筋の位置を確認すると $4,376\text{mm}$ となり、計測位置とほとんど一致した。

(2) 88.5kN-m

次に、荷重を更に増加し、曲げモーメント

が 88.5kN-m 時に検出されたクラックの位置を図-5 (b) に示す。図より、 $L=3,637\text{mm}$ の箇所に新たなクラックが発生している。なお、コンクリート表面に生じた新たな白い筋の位置を確認してみると $3,613\text{mm}$ となり、提案手法によるクラック位置とほとんど一致している。なお、このときも歪ゲージ出力の変化と共にわずかな破裂音が確認できた。同時に、尤度関数の先鋭度の変化により、76.5kN-m 時に生じた $4,384\text{mm}$ の位置のクラックの幅が増したことも確認された。

(3) 124kN-m

更に荷重を増し、C 種ひび割れ曲げモーメントに相当する 124kN-m の曲げモーメント時に検出・計測されたクラック位置を図-5 (c) に示す。先に発生した 2 個のクラックも含め、計 14 個のクラックが検出された。なお、加圧中は最大荷重のため危険であり、除荷後にコンクリート表面の白い筋の位置を確認したが、前の荷重時に観測された白い筋が大きく成長した。観測された白い筋の位置全ては提案手法により検出されたクラック位置と極めて近いことが確認できた。また、尤度関数の先鋭度の変化により、 $L=4,382\text{mm}$ の箇所のクラック (図-5 (a), (b) の $4,384\text{mm}$ の位置のクラックに相当) の幅が更に増したことが確認された。

(4) 最大モーメント印加後除荷

最後に、一連の試験で最大モーメント

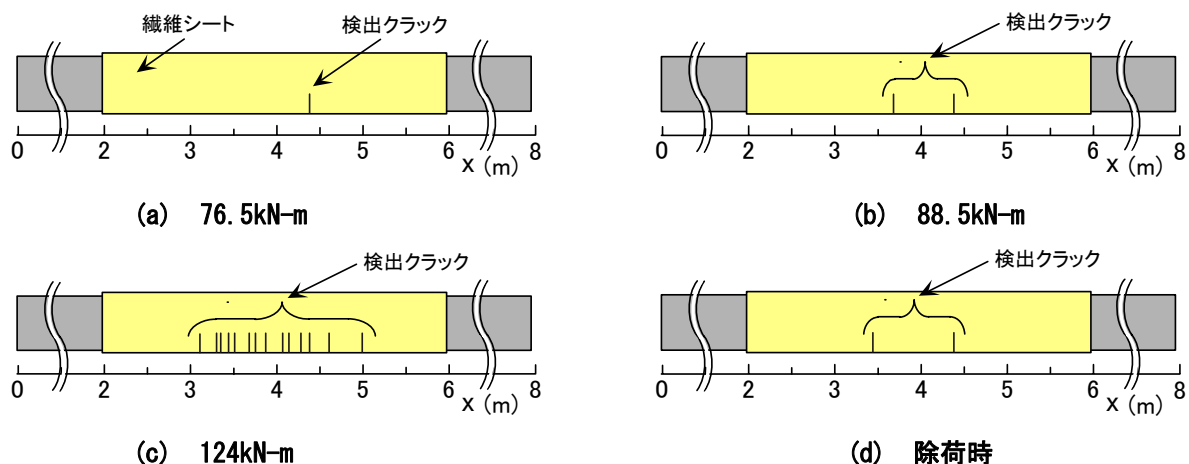


図-5 曲げモーメントと検出クラック位置



写真-2 最大曲げ加重時のくい

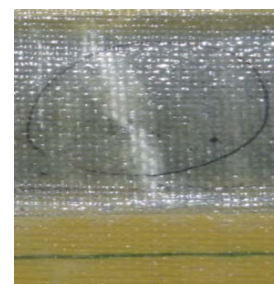
(210kN-m)を加え、くいは**写真-2**に示すように大きいたわんだ。除荷した後に提案手法を適用したときのクラック位置を**図-5(d)**に示すが、曲げモーメントが124kN-m時の14個のクラックの内2個しか検出されなかった。つまり、残りの12個は強く圧着したことがわかる。なお検出された2個も、124kN-m荷重時に比べて大幅に圧着度が増すことが、尤度関数の尖鋭度の減少により確認された。事実、実験終了後に繊維シートを剥がし、目視で確認を行ったが、この2個も含め14個のクラックは全て検出できなかった。興味あることは、除荷後に本手法により検出された2個のうちの1個は最初(つまり76.5 kN-m荷重時)に発生・検出されたクラックであることである。また、除荷後残留変位は1.5mmとわずかであった。**写真-3**に除荷後のクラックの状況を示した。無補強のくいは大きなクラックが開いたままであるのに対して、複合シートで補強されたくいの場合、繊維シートの無いコンクリート部分に白い線が確認された。

(5) 断面拡大観察

複合シートを剥がした後くいを切り出し、白く見える部分の表面を約25倍に拡大観察しても、すべてのクラックを検出することができなかった。以上のように、アラミド繊維と薄肉帯鋼板からなる複合シートによる補強コンクリートくいの場合には、曲げ荷重増加により多数の小クラックが順次生じてても、除荷後には全てのクラックが圧着し、見かけ上消滅することが確認⁴⁾された。



無補強



複合シート補強

写真-3 除荷後のくいの表面状態

5. まとめ

アラミド繊維シートと薄肉帯鋼板からなる複合シートで補強されたA種くいは曲げ荷重を上げると、小さなクラックが順次分散して発生し、大きいたわむまで終局破壊しないことが確認された。除荷後は残留変形がほとんどなく、クラックが消滅した状態であることも確認された。すなわち、じん性の低いくいを複合シートで補強することにより、従来にないじん性能の高いくいに変換できることが確認された。本工法は高機能繊維シートの使用量を最小限とし薄肉帯鋼板を最大限使用した工法であるので、価格的にも有利である。くい生産設備条件をA種からB、C種に変更する必要もないので、迅速に対応することも可能である。また、本工法はPRCくいや新タイプのくいへの展開も考えられる。

謝辞: 本研究に当たり、補強施工および曲げ試験を豊州パイル(株)、SRIハイブリッド(株)に実施して頂き、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 松本正春ほか：アラミド繊維シートと薄肉鋼板併用による補修・補強工法，日本建築学会学術講演梗概集，pp1261-1274，2005.9
- 2) NETIS登録番号QS-050013，SSアラミド工法
- 3) 松本正春ほか：特開2003-55966，特開2004-316335，特開2005-76300
- 4) 岡本昌幸，藤本浩，田中正吾：加速度ピックアップを用いたコンクリート杭の健全度評価，電気学会論文誌C，Vol.126，No.8，pp.931-937，2006.8