

昭和40年代初頭に施工されたPC桁のブロック目地構造は、現在一般的に施工されている、せん断キーを有し接合面に接着剤を塗布し接合するマッチキャスト方式ではなく、ブロック間に10cmの間隙を設けコンクリートを打設する方式であり、目地部にはせん断キーはなく鉄筋は不連続なものであった。試験体においても、実際の構造と同様にブロック目地を5cm設けPC鋼材のみ連続とする構造とした。

試験体(主桁、ブロック目地)のコンクリートの目標強度は $f_{ck}=460\text{kgf/cm}^2$ とした。鉄筋はSD295を使用した。ポストテンション方式の内ケーブルはPC鋼より線 SWPR7B1T12.7mmを5本用い、グラウトを行った。

今回に実験では外ケーブルの種類を実験要因としたが、PC鋼材を外ケーブルとして用いる場合の補強効果は各方面で報告されており、施工実績も多数あることから、実験の比較の基本をPC鋼材を用いる試験体(CASE-1; PC試験体)とし、連続繊維緊張材は炭素系連続繊維緊張材を用いる試験体(CASE-2; CFRP試験体)とアラミド系連続繊維緊張材を用いる試験体(CASE-3; AFRP試験体)とした。使用した外ケーブル特性値を表-1に示す。

デビエータは鋼製サドルに曲げ半径($R=3\text{m}$)の半円形状の溝を切削し、すべり構造として高分子ポリエチレンシートを設置した。支点側中間横桁2ヶ所にデビエータと支間中央にはすべり構造を有する高さ保持サドルを取り付けた[3]。

外ケーブル定着ブラケットは、ブラケット部での破壊を防ぐため主桁と一体構造とし、PC鋼棒(SBPR785/1030 ϕ 23mm)をブラケット1ヶ所当たり4本配置した(写真-1)。

2.2 載荷方法および測定項目

載荷は、試験体の支間を10.48mとし支間中央から左右0.75mの位置に2点集中荷重を静的載荷することとした(写真-2)。なお、死荷重作用時の曲げ応力度状態を実際の橋梁と一致させるため、試験体にカウンターウエイトを設置した。載荷ステップを次に示す。

- ①内ケーブルのみ緊張した状態で計算ひび割れ荷重まで載荷する。
- ②除荷後に外ケーブルの緊張を行う。
- ③外ケーブル補強後における計算ひび割れ荷重を載荷し除荷する。
- ④最終的に破壊荷重まで載荷する。

なお、荷重の増分は1tfを基本とした。各ケーブル緊張時にはケーブルのひずみとコンクリートひずみ測定し、載荷試験時には試験体桁の各ひずみ(コンクリート、鉄筋、内ケーブル)とたわみ、外ケーブルの張力とひずみ、ブロック目地部の開口量と鉛直変位、等を測定した。

表-1 外ケーブル特性値

	単位	CASE-1	CASE-2	CASE-3
使用緊張材		SWPR7B 1T12.7	CFRP 7 ϕ 15.2	AFRP FA15
外ケーブル種類		PC鋼より線	PAN系炭素繊維	アラミド繊維
使用マトリクス			エポキシ樹脂	エポキシ樹脂
公称径	mm	12.7	15.2	14.7
公称断面積	mm ²	98.71	113.6	170
引張強度	kgf/mm ²	190	180	140
降伏点応力度	kgf/mm ²	160	—	—
弾性係数	kgf/mm ²	19500	14000	7000
保証破断荷重	tf	(18.7)	20.3	24.0
破断伸び	%	6.4	1.6	2
リラクゼーション率	%	1.4	2.5	10

※ () 内は引張強

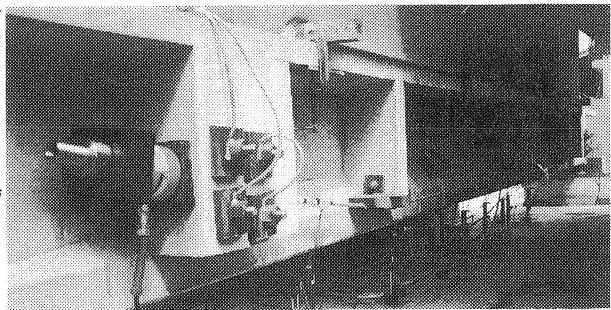


写真-1 試験体外ケーブル (AFRP)

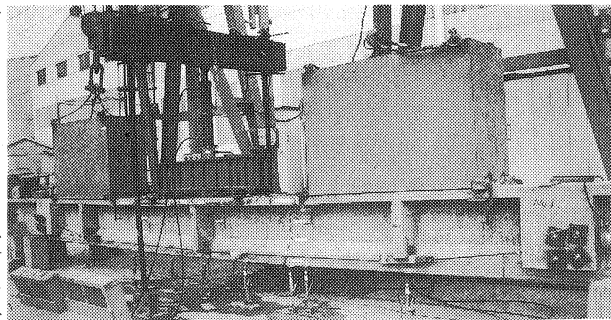


写真-2 載荷試験状況

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れ・破壊形態

表-2に載荷試験における各試験体の荷重の比較、図-2に各試験体最終ひび割れ状況を示す。なお、表中のひびわれ荷重の計算値は弾性計算値であり、目地下縁のコンクリートの合成応力度が 0kgf/cm^2 となる荷重とし、破壊荷重の計算値は道路橋示方書Ⅲの破壊抵抗曲げモーメントの算出方法によったが、外ケーブルの増加応力は見込まず有効応力一定の仮定で計算を行った。

初期ひび割れ発生箇所(目視)は全試験体ともブロック目地部下縁からであった。ひび割れ発生荷重はPC試験体が最も小さく、AFRP試験体、CFRP試験体の順で大きくなった。PC試験体でのひび割れ発生範囲はほぼ支間中のブロック目地間隔2.8mの間であったが、CFRP試験体、AFRP試験体の順でひびわれの発生範囲はブロック目地より支点側へ広がる傾向にあった。これは、外ケーブルの引張剛性EAの違いにより外ケーブルの引張力の増加量が異なる(3.4に後述)ため、増加プレストレスが大きいPC試験体ではひびわれ範囲が狭く、増加プレストレスが小さいAFRP試験体ではひびわれ範囲が広範囲になったと推察できる。

破壊形態は、全ケースとも支間中央側の載荷点付近でのコンクリート上縁の圧壊であり、上縁の圧壊が起こると同時に桁下縁までコンクリートが破壊し、完全に桁が2つに折れた状態であった。写真-3にCASE-2の破壊状況を示す。また、破壊時の載荷荷重も $30.1\text{tf}\sim 30.7\text{tf}$ であり、ほぼ同程度の終局耐荷力であった。せん断キーがなく鉄筋も不連続であるブロック目地が終局状態では弱点となるのではないかと懸念があったが、今回の実験では支間中央(曲げモーメント一定区間)での曲げ破壊となり、目地部が破壊に対して支配的要因とはならなかった。

3.2 たわみおよびコンクリートひずみ挙動

図-3に各ケースの支間中央における荷重とたわみ量の関係を示す。

各試験体の曲げモーメント一定区間内における初期ひび割れ発生荷重は、PC試験体が 11tf 、CFRP試験体が 10tf 、AFRP試験体が 9tf であったが、荷重-たわみ曲線もこれらのひび割れ荷重時付近で変曲点が認

表-2 試験結果

外ケーブル種類	ひび割れ荷重(tf)		ひび割れ発生部位	破壊荷重(tf)		破壊形態	終局時中央たわみ(mm)
	計算値	実験値		計算値	実験値		
CASE-1 PC	6.6	6.0	目地下縁	24.25	30.5	上縁圧壊	※
CASE-2 CFRP	6.6	7.8	目地下縁	24.29	30.7	上縁圧壊	262
CASE-3 AFRP	6.5	7.2	目地下縁	24.23	30.1	上縁圧壊	267

※ 測定データ無し

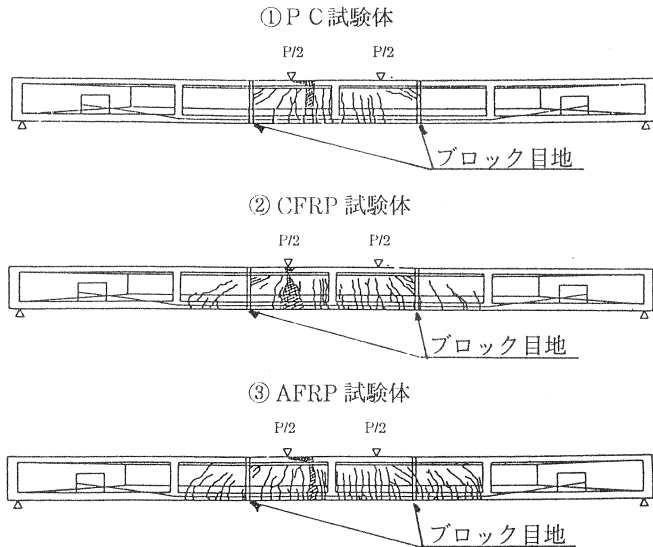


図-2 各試験体ひび割れ状況

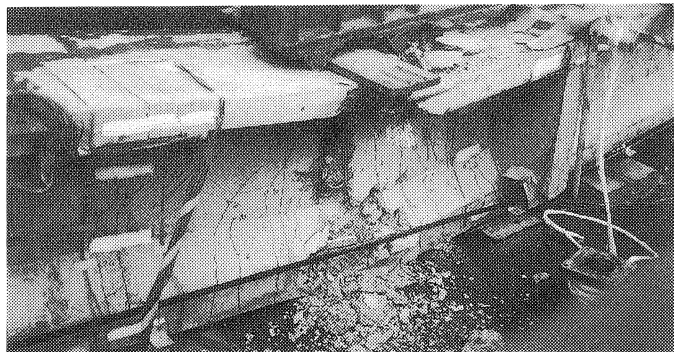


写真-3 試験桁の破壊状況

められる。ひび割れ発生以降の各荷重段階でのたわみ量はPC試験体が最も小さく、次にCFRP試験体であり、最も大きなたわみ量を示したのがAFRP試験体であった。これは、各試験体の外ケーブル引張剛性の相違による試験体曲げ剛性の相違および外ケーブルプレストレスの増加張力の相違によって生じたと考えられる。表-3に外ケーブル引張剛性と試験体曲げ剛性の値を示す。

終局荷重におけるたわみ量はCFRP試験体が262mm、AFRP試験体は267mmであり、終局荷重と同様ほぼ等しい値であった。

図-4に各ケースの支間中央における荷重-コンクリート上縁ひずみの関係を示す。コンクリート上縁のひずみは、支間中央から桁軸方向左右に15cmずつ離れた2断面の平均値を示している。

同一荷重値におけるひずみ値は、たわみ量の傾向同様に、3試験体の外ケーブルのなかで引張剛性の最も大きなPC鋼材を使用したPC試験体が最も小さく、CFRP試験体、AFRP試験体の順で大きなひずみ値を示している。終局荷重付近(P=25tf以上)では、PC試験体では曲線的なひずみの増加を示すが、降伏点を持たない連続繊維緊張材を使用した試験体では、折れ点を持つ直線的なひずみの増加を示している。

ブロック目地部上縁およびその周辺のコンクリートのひずみには顕著なひずみ値は計測されておらず、目地部への局部的な応力集中はなかったと言える。

荷重とたわみ・ひずみ関係の比較では、連続繊維緊張材はPC鋼材と概ね同様の傾向であると言える。

3.3 ブロック目地部開口量

図-5に各ケースの荷重とブロック目地の開口量(南側)の関係を示す。なお、ブロック目地部開口量は π 型ゲージを用いて測定したが、載荷荷重P=20tf付近までの測定値となっている。

PC試験体ではP=17tf付近でブロック目地部開口量の急激な増加が認められ、P=20tfでは3ケースのなかで最も大きな目地部開口量;3.8mmを示した。CFRP試験体およびAFRP試験体におけるP=20tf段階でのブロック目地部開口量は、それぞれ2.7mm、1.9mmとなった。ひび割れが広範囲に渡る引張剛性の小さいAFRP試験体では、目地部開口量は小さく、逆に、ひび割れ範囲が狭い引張剛性の大きいPC試験体では、目地部開口量は大きくなった。このことから、非線形領域において、目地部開口量はひび割れ発生範囲に影響を受けると推察される。

表-3 外ケーブル引張剛性と試験体曲げ剛性

試験体	外ケーブル種類	引張剛性 tf	試験体 I m ⁴	コンクリート E kgf/cm ²
CASE-1	PC 1T12.7B	1925	0.00679	3.31E+05
CASE-2	CFRP ϕ 15.2	1590	0.00677	3.24E+05
CASE-3	AFRP FA15	1190	0.00674	3.21E+05

注)・引張剛性は外ケーブル1本当たりの値
・試験体 I は外ケーブルを換算した断面二次モーメント
・コンクリート E は試験体コンクリートの弾性係数

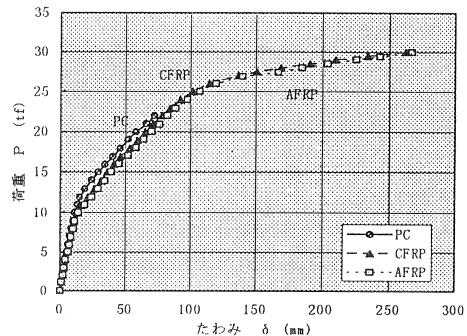


図-3 荷重-たわみ(支間中央)曲線

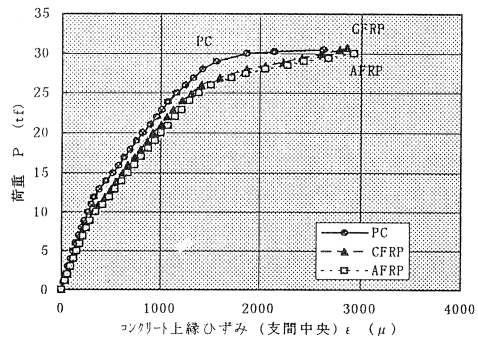


図-4 荷重-コンクリート上縁ひずみ(支間中央)曲線

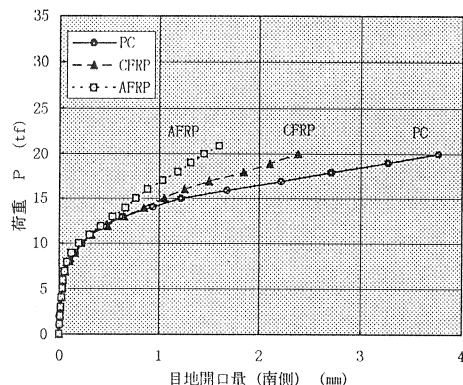


図-5 荷重-ブロック目地開口量(南側)曲線

3.4 外ケーブルの増加張力

外ケーブル工法は、コンクリート断面と外ケーブルのひずみが異なり、付着のある内ケーブル工法で成立する平面保持則が成り立たない。これは、構造物の変形が小さい使用状態では、平面保持則が成立するものとさほど差異はないが、変形が大きな終局状態では厳密な計算が必要となる。外ケーブルに降伏点を持たない連続繊維緊張材を使用する場合、終局時の挙動を知ることが特に重要となる。

表-4に外ケーブルの張力の集計、図-6に荷重と外ケーブル増加張力の関係、図-7に支間中央たわみと外ケーブルの増加張力の関係を示す。なお、上記表および図中の外ケーブル張力の測定値は左右両ケーブルの平均値を示す。

3ケースとも、曲げモーメント一定区間にひびわれ発生した載荷荷重 ($P=9\sim 11\text{tf}$) まではほとんど外ケーブル張力の増加は見られなかった。しかし、コンクリートにひび割れが発生し試験体桁の曲げ剛性の低下が進行するとともに、外ケーブル張力は緩やかに増加し、PC試験体ではそのまま増加し続け終局状態に至ったが、CFRP試験体とAFRP試験体では載荷荷重 $P=25\text{tf}$ を越える時点から急激な張力増加が見られ、最終的な増加張力はPC試験体を上回り終局状態に至った。これは、PC試験体では終局時の外ケーブル応力度は降伏点を越えているため、終局状態での急激な桁の変形に対し急激な応力増加とはならなかったが、CFRP、AFRPには降伏点がないため、終局時の急激な桁の変形によって急激な応力増加が生じたと考えられる。

桁のたわみと各種外ケーブル増加張力の関係では、CFRPとAFRPは終局時までほぼ線形関係にあることがわかる。一方、PC試験体では外ケーブルのPC鋼材が降伏点を有するため、降伏点を越える荷重以上では、外ケーブル増加張力とたわみとの線形関係は成り立たなくなると推察できる。同じ変位量での外ケーブルの増加張力は、PC試験体が最も大きな値を示し、次いでCFRP、AFRPの順で小さな値となった。これは、当然ながら外ケーブルの引張剛性の大きな順となっている。

本実験では、外ケーブルの破断による終局破壊状態にはならなかったが、PC鋼材のような降伏点をもたず終局伸びが大きい連続繊維緊張材では、外ケーブルの初期張力は終局時の増加張力を正確に把握して設定する必要があると考える。

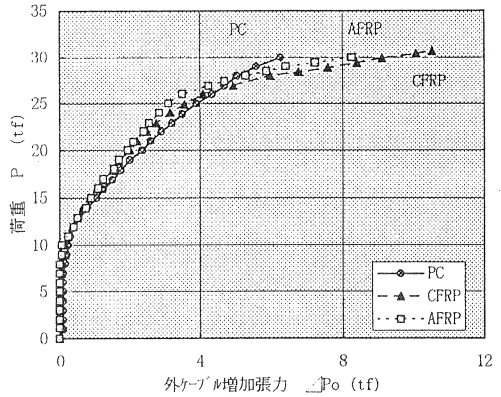


図-6 荷重-外ケーブル増加張力曲線

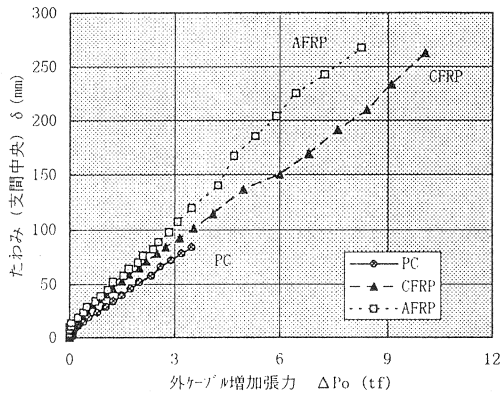


図-7 たわみ-外ケーブル増加張力曲線

表-4 外ケーブルの増加張力

試験体	外ケーブル種類	降伏点	保証破断	引張強度	初期張力		終局時張力		増加張力	
		荷重 tf	荷重 tf		tf	tf	kgf/mm ²	tf	kgf/mm ²	tf
CASE-1	PC 1T12.7B	15.8	—	18.7	11.45	116	17.75	180	6.30	64
CASE-2	CFRP φ15.2	—	20.3	25.9	11.36	100	21.86	192	10.50	92
CASE-3	AFRP FA15	—	24.0	27.2	11.22	66	19.47	115	8.25	49

注) 保証破断荷重はメーカー保証値であり、引張強度は今回のロットの引張試験の平均値である

4. まとめ

連続繊維緊張材を外ケーブルとしてPCブロックT桁の補強に用いる場合の補強効果の確認およびその曲げ挙動の把握を目的とし、モデル桁を用いて静的破壊実験を行った。実験結果のまとめを次に示す。

- 1) 外ケーブルにPC鋼材を用いた試験体とCFRPおよびAFRPを用いた試験体を比較した場合、ひび割れ耐力・終局耐力ともほぼ同等であり、破壊形態も全て曲げモーメント一定区間内でのコンクリート上縁の圧壊となった。
- 2) せん断キークがなく鉄筋を不連続としコンクリートを打設するブロック目地構造は、今回の実験では破壊に対して支配的な要因とはならなかったが、実構造物の補強では、ブロック目地部に着目した検討が必要と考える。
- 3) 荷重-たわみおよび荷重-コンクリート上縁のひずみ関係では、PC鋼材を用いた試験体と連続繊維緊張材を用いた試験体と比較した場合、概ね同様であり、特に問題となる挙動は確認されなかった。
- 4) ひび割れ発生範囲は、引張剛性の小さいAFRP試験体が最も広範囲に渡り、引張剛性の大きなPC試験体が最も狭い範囲での発生となった。
- 5) ブロック目地開口量は弾性域ではほとんど差異はなく、非線形領域では、ひび割れの発生範囲に影響され、その範囲が広範囲な試験体(AFRP)ほど目地部開口量は小さくなった。
- 6) 外ケーブルの増加張力は、ひびわれが発生した後に顕著となり、桁の変形(たわみ)と線形関係を保ち増加する。終局荷重付近では、降伏点を持たない連続繊維緊張材を用いた試験体の方がPC鋼材を用いた試験体より張力増加は大きくなった。
- 7) 連続繊維緊張材を外ケーブルに用いる場合、外ケーブルの初期張力は終局時の増加張力を正確に把握して設定する必要があると考える。
- 8) 今回の実験では、内ケーブルが降伏した後のコンクリート上縁の圧壊であり、外ケーブルは破断に至らなかったが、外ケーブルとして降伏点を持たない連続繊維緊張材を用いる場合、7)の初期張力の設定とともに破壊モードの選定も重要になると考える。

以上のように、外ケーブルとしてPCブロック桁に連続繊維緊張材(CFRP、AFRP)を用いた場合でも、PC鋼材を用いた場合と概ね同等の補強効果が得られたと言える。

今後、非線形解析を行い実験データとの検証を行うとともに、外ケーブルに連続繊維緊張材を用いて補強を行う場合の設計手法についても検討する予定である。

なお、本実験研究は、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一貫で行われたものであり、同委員会各位には多大なご指導を頂いた。また、本研究を遂行するにあたり、東京製綱(株)並びに神鋼鋼線工業(株)には多大な協力頂いた。ここに記して謹んで謝意を表します。

【参考文献】

- [1] 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリート717-72、土木学会
- [2] アウトケーブル工法によるPC桁の耐力確認実験業務報告書、阪神高速道路公団、1990.3
- [3] 中田 順憲、山名 宗之、服部 篤史、眞嶋 光保：偏向部を有する連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol17、No.1、pp1173~1178
- [4] 徳光 卓、樋野 勝己、丸山 久一、陸好 宏史：耐蝕性材料を用いた外ケーブル工法の開発、プレストレストコンクリート、Vol.35、pp61~68、1993
- [5] 陸好 宏史、町田 篤彦：FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状および曲げ耐力、土木学会論文集 No.422/V-16、pp153~159、1992.2
- [6] 斉藤 宗、森井 惇雄、林田 道弥、奥村 一正：CFRPを用いた外ケーブルの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol16、No.1、pp1215~1220、1994