

耐蝕性材料を用いた外ケーブル工法の開発

徳光 卓*1・樋野 勝巳*2・丸山 久一*3・睦好 宏史*4

1. はじめに

外ケーブル工法は、ケーブル配置が断面に束縛されないため設計の自由度が大きく、今後のプレストレス導入方法として、内ケーブルにはない可能性を秘めた工法であると言える。

外ケーブル工法は、諸外国で多くの新設橋梁に実績を持つ反面、日本では補修分野での実績が主であり、新設橋梁では鉄道橋を主として数橋が報告されているのみである。

しかし、近年の労務事情の悪化からPC橋のプレキャスト化が各方面で検討され、これに伴う形で外ケーブル工法も注目を集めており、今後新設構造物においても施工例が増加するものと思われる¹⁾。

今まで、日本において外ケーブル工法が進展しなかった理由は、定着部の応力集中など構造的な問題だけでなく、塩害補修などの腐蝕性環境下では鋼材腐蝕の進行が早く、防蝕処理の不具合によるケーブル破断など、維持管理上の懸念があったものと思われる。

また、外ケーブルは多くの場合、桁から離れた位置に露出しているか、箱桁内部などの閉塞環境に配置されており、その取替えは様々な制約条件のもとでの人力作業とならざるを得ないため多額のコストを必要とする。

そこで筆者らは、基本的に取替えを必要とせず、なおかつ有事には取替えや追加が可能な外ケーブル工法の開発を目指し、連続繊維補強材に代表される新素材や防蝕処理を施したPC鋼材などの高耐蝕性材料を用いた外ケーブル補強桁の実験を行った。

本開発では、各種連続繊維材料や防蝕PC鋼材の性能確認と同時に、これらの施工性についても比較検討を行ったので以下に報告する。

2. 本工法の利点と適用構造の検討

本研究を行うにあたり、高耐蝕性材料を用いた外ケー

ブル工法の利点や将来性を考え、これに基づいて実験および開発の方法を決定した。

高耐蝕性緊張材料を用いた外ケーブル工法の利点は、

① 緊張材料自体に耐蝕性があるため、定着部の防蝕処理が容易、もしくは不要となる。

② 将来の維持管理コストの低減が図れる。

さらに、この材料として連続繊維補強材を使用した場合には、

③ 軽量であるため、ケーブル配置の労務負担を軽減できる。

④ ケーブルの共振に対して有利となる。

などの様々なメリットがある。

2.1 既設コンクリート橋の補修

既設コンクリート橋が腐食性環境にある場合は、補強に用いるケーブルの耐蝕性だけでなく、定着部や偏向部の耐蝕性が重要となる。

また一般に、コンクリート内の鉄筋やPC鋼線の正確な損傷状態の把握が困難であり、さらに経年によって損傷が進行していくことを考えれば、外ケーブルの取替えや追加、緊張力の調節が可能となるようにする必要のあるものと思われる。

以上のことから、従来使用されていた鋼製ブラケットに代え、偏向部は横桁に無収縮モルタル製のプレキャストデビエータを取り付けて対応し、定着部については端部横桁より作業空間分だけ内側に離れた位置に新たなコンクリート製の横桁を設けるものとして、構造全体としての耐蝕性を持たせるものとした。

2.2 新設構造物の場合

労務事情の悪化傾向が続く限り、長大橋梁建設におけるブロック桁の使用など、今後ますますプレキャスト化の要請が強まってゆくものと予想される。

従来の内ケーブル方式の場合、ケーブルの曲げ上げ・曲げ下げが断面内で行われるため、ブロックの構造が各々異なることになり、工場製作の自動化を阻害する要

*1 Suguru TOKUMITSU : (株)富士ピー・エス 本店技術開発課

*2 Katsumi HINO : ショーボンド建設(株) エンジニアリング本部技術課 課長

*3 Kyuichi MARUYAMA : 長岡科学技術大学 建設系 助教授, 工博

*4 Hiroshi MUTSUYOSHI : 埼玉大学 工学部建設工学科 助教授, 工博

困となっていた。

これに対し、全ケーブルを外ケーブルとすれば製造を最も簡略化できるが、ずれ破壊に対する安全性や架設時の安全性を確保するのは必ずしも容易ではない。

これらのことを考え、内ケーブルのブロック断面内における曲げ上げを極力少なくし、外ケーブルと併用して、内ケーブルで死荷重を、外ケーブルで活荷重を分担する設計が標準になるものと考え、本研究を進めるものとした。

3. 連続繊維補強材の曲げ上げ耐力確認実験

既往の研究によれば、連続繊維補強材を曲げ上げて使用する場合、直線状態で緊張した場合に比べて強度低下を起こすことが報告されている²⁾。

外ケーブル工法の場合、マルチケーブルとしての使用を検討する必要があるが、この場合の耐力低下は直線緊張でのものが報告されているだけであり、曲げ上げて使用した例は報告されていない³⁾。

そこで、本開発に先立って、連続繊維補強材マルチケーブルの曲げ上げ耐力確認実験を実施した。

3.1 使用材料とその定着方法

連続繊維補強材として、炭素繊維、アラミド繊維材料の中から代表的な3種類の材料を選び実験に供した。

材料の種類・諸元は表-1に示すとおりである。

定着方法として、より線状炭素繊維は、ダイキャストくさび定着(図-1)、定着用膨張材による定着(図-2)の2種類を、またアラミド繊維では組み紐状、並行束状の2種類の材料に対して各1種類の定着具を揃え、計4種類とした(図-3、図-4)。

各材料ごとのケーブル使用本数は、各緊張材の剛性EAがほぼ等しくなるように決定した。

3.2 デビエータ

外ケーブル偏向部には、図-5、図-6に示されるような無収縮モルタル製のプレキャストブロックを使用した。

高耐蝕性材料の弱点は、材料自体あるいはその被覆材料に傷が付き易く、擦れや角当たりによって材料の破断あるいは被覆材の剥離を起こしやすいことであり、デビエータ部における接触部分の材質、曲げ上げ角度、曲げ半径、端部の処理など、通常のPC鋼材に比べて様々な

表-1 曲げ上げ耐力実験に用いた連続繊維補強材

繊維の種類	加工形状	線径 (mm)	断面積 (mm ²)	保証破断荷重 (kgf)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)
炭素繊維	より線状	φ12.5 mm	76.0	14 500	190.8	14 300
アラミド繊維	組み紐状	φ14.7mm	170	24 000	141.2	7 000
アラミド繊維	並行束状 (ポリエチレンシース被覆)	φ24 mm	452	60 000	132.7	12 900

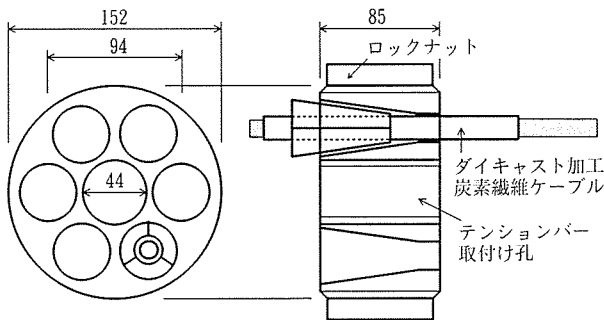


図-1 より線状炭素繊維マルチ定着具 (ダイキャスト定着)

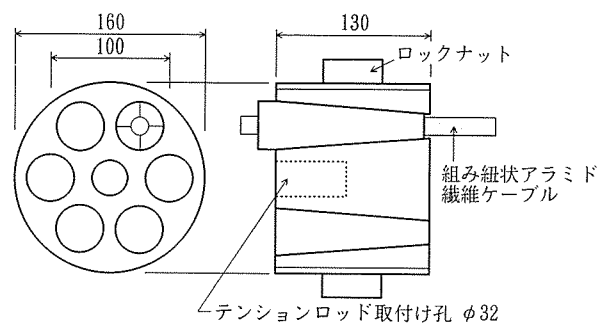


図-3 組み紐状アラミド繊維マルチ定着具 (くさび定着)

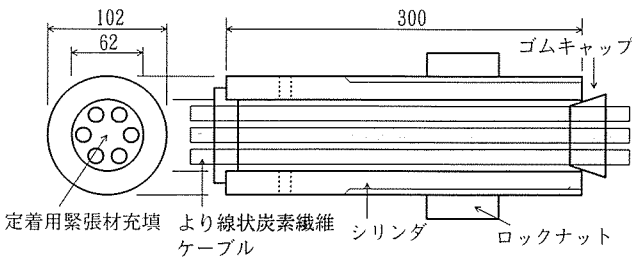


図-2 より線状炭素繊維マルチ定着具 (定着用膨張材定着)

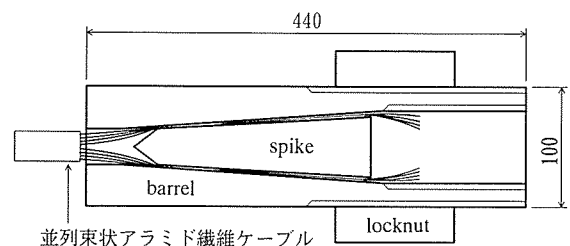


図-4 並列束状アラミド繊維定着具

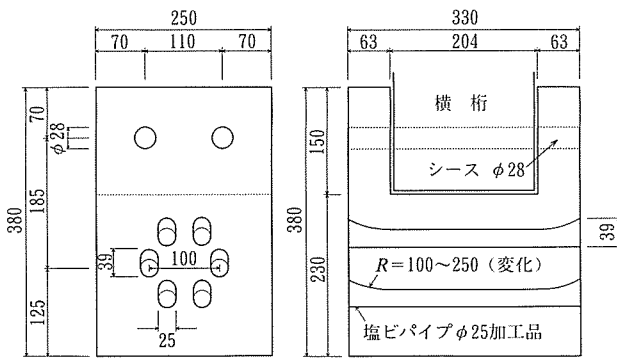


図-5 分散配置型ケーブル用曲げ上げブロック

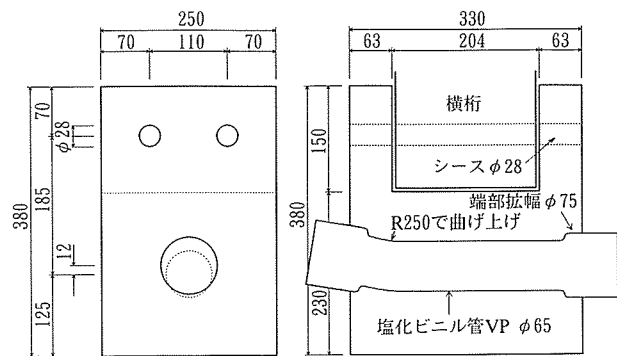


図-6 シングル・束ね型ケーブル用曲げ上げブロック

注意が必要である。

これらの処理方法については確たるものがなく、今後も検討が必要であるが、本試験では、ケーブル挿入部に塩化ビニル製パイプを使用し、載荷時の荷重を線で受け、曲げ変形に対しても角当たりが起きることのないよう、パイプの端部付近で拡幅処理を施した。

3.3 試験方法

連続繊維補強材の曲げ上げ破断実験は図-7に示す装置を用いて行った。

曲げ上げ角度は11.5度であり、マルチケーブルでは定着時のセットロスや、ケーブル長の誤差によって、各ケーブル間の張力差を生ずる恐れがあるため、定着具間の距離を3.9mと長めに設定した。

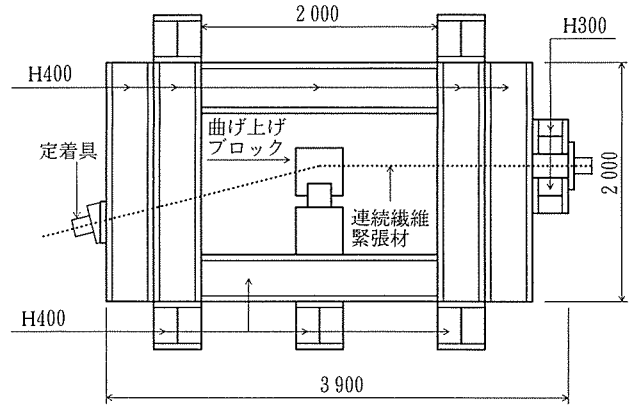


図-7 連続繊維補強材曲げ上げ耐力試験装置

3.4 試験結果

曲げ上げ破断試験の結果を表-2に示す。

供試体数は、より線状炭素繊維ケーブルのくさび定着供試体が2体、その他は各1体ずつである。

マルチケーブルの場合、いずれも多本数の内1本が破断することにより終局に至ったが、組み紐状アラミド繊維ケーブルでは定着部で、炭素繊維ケーブルでは曲げ上げ部での破断となった。

並列束状アラミドではケーブル全体にポリエチレン被覆が施されており、素線が各所で破断したとみられる状況を呈したため、破断箇所の特定は不可能であった。

組み紐状アラミド繊維ケーブルは定着部で破断していることから、結果は曲げ上げによる強度低下でなく、ケーブル間の張力差やくさびの定着効率のばらつきを表していると言える。

炭素繊維ケーブルでは定着方法にかかわらず破断荷重が等しくなっている。また、マルチケーブル直線緊張時の破断荷重にシングルケーブルでの曲げ上げによる強度低下率を乗じた値に比べて安全側の値となった。

また、アラミド繊維ケーブルでは、加工形状が組み紐状や並列束状と異なるにもかかわらず、いずれも直線緊張時とほぼ変わらない耐力を示した。

これらの結果より、いずれの連続繊維補強材も適切な緊張力を設定すれば、外ケーブル工法試験用緊張材とし

表-2 曲げ上げ耐力実験結果

使用材料	定着方法	直線緊張での破断荷重 (tf)				曲げ上げ緊張での破断荷重 (tf)				
		① シングル破断荷重	② マルチ破断荷重の理論値	③ マルチ破断荷重の実測値	③/② 強度低下率	④ シングルでの強度低下率	③×④ マルチ破断荷重推定値	⑤ マルチ破断荷重の実測値	⑤/③ 強度低下率	⑤/(③×④) 実測値/推定値
より線状炭素繊維	ダイキャスト	17.3	103.8	*a 82.0	0.80	*c 0.74	61	69	0.84	1.13
	定着用膨張材			*b 92.5	0.89	-	-	70	0.76	-
組み紐状アラミド	くさび	20.8	41.6	*a 41.3	0.99	*a 0.80	33	*d (38.5)	>0.93	1.17
並列束状アラミド	くさび	65.2	-	65.2	-	*a 1.00	65.2	*e (66)	(1.01)	1.01

※上表中、組み紐状アラミドは4本マルチで破断しなかったため、2本マルチで実施した。

*aはメーカーによる試験値(ロットは異なる)。*bは原田らによる³⁾。*cは榎本らによる²⁾。*dは定着部での破断。*eはシングルケーブルでの値。

て使用可能と判断した。

4. 外ケーブル補強桁の曲げ載荷実験

4.1 供試体

供試体の形状寸法は図-8に示すとおりである。内ケーブル8本のうち下段より2本あるいは4本を支間中央付近でディスクサnderを用いて人為的に切断し、その後高耐蝕性緊張材を外ケーブルとして用い、緊張したのち、静的曲げ載荷試験を行った。

これは既設ポストテンション桁の塩害損傷などにおけるPC鋼線が破断した場合を再現するとともに、新設ブロック桁における継目部や、内ケーブルと外ケーブルの

荷重分担割合を設定する際の資料とするものである。

曲げ上げ部は、T桁に後打ちした横桁部に前述のデビエータ用プレキャストブロックを取り付けたものとし、定着部は後打ちにより新たに横桁を設けた。

定着用の横桁は鉄筋および横締めによってずれを防止する構造とした。

外ケーブルに用いた材料は表-3に示すとおりであり、前述の連続繊維補強材に加えて、表面にエポキシ樹脂塗装を施した防蝕タイプのPC鋼材も用いた。

4.2 載荷方法

荷重は2点集中載荷方式とし、支間中央から左右0.75mの位置に静的載荷した。

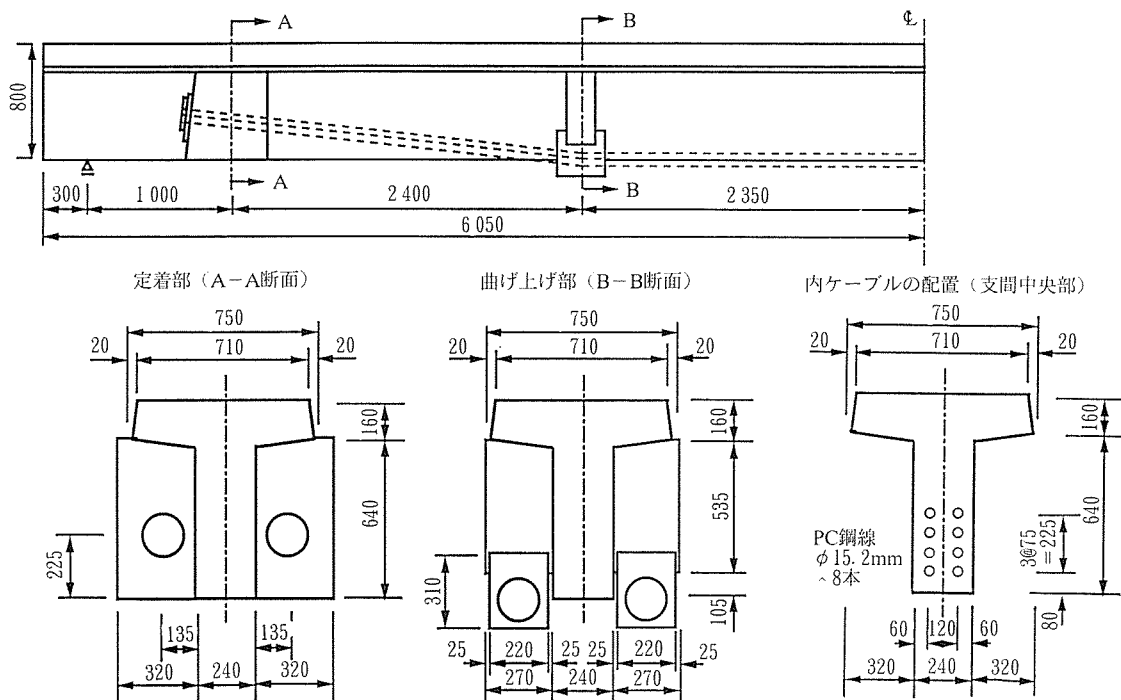


図-8 外ケーブル試験用供試体

表-3 外ケーブル補強桁静的載荷試験の仕様と試験結果の総括

供試体番号	内ケーブル切断位置	外ケーブルの仕様				試験結果概要			
		使用材料	本数	曲げ上げ部の配置	緊張力 (tf)	定着方法	ひびわれ荷重 (tf)	補強後の再ひびわれ荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)
NO. 1 桁	スパン中央1箇所の最下段2本切断	防蝕 PC 鋼より線	4 (2×2)	束ね型	36	くさび	18.3	-	56.8
					50			-	-
NO. 2 桁	スパン中央1箇所の最下段2本切断	より線状炭素繊維	12 (6×2)	分散型	36	くさび (ダイキャスト)	18.2	19.6	53.1
					50			22.0	-
NO. 3 桁	スパン中央1箇所の最下段2本切断	より線状炭素繊維	12 (6×2)	束ね型	36	定着用膨張材	17.9	17.0	-
					50			19.0	-
		並行束状アラムド繊維	2 (1×2)	シングル	36	くさび		16.0	-
					50			18.0	-
スパン中央1箇所の最下段4本切断	防蝕 PC 鋼より線	4 (2×2)	束ね型	60	くさび	-	-	46.8	
				50		-	-		
NO. 4 桁	スパン中央から両側1m離れた位置2箇所の最下段2本切断	組み紐状アラムド繊維	8 (4×2)	分散型	36	くさび	18.4	-	59.7
					50			-	-

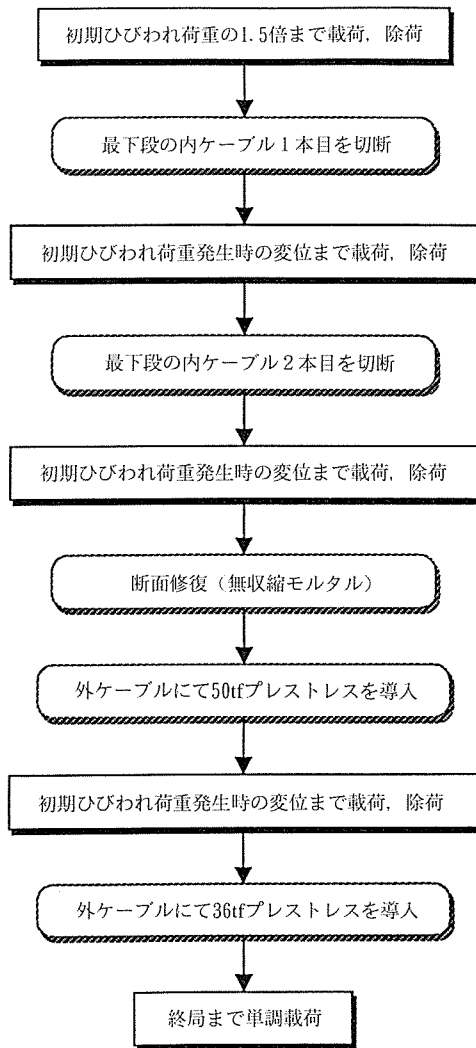


図-9 耐荷手順

載荷手順を図-9に示す。

本試験ではPC桁の損傷劣化に対する耐荷力の回復を想定しているため、まず桁に載荷してひびわれを発生させ、さらに内ケーブルを切断して桁に損傷を与えたのち、断面修復し、外ケーブルの緊張力を変化させて、その効果を確認する手法をとった。

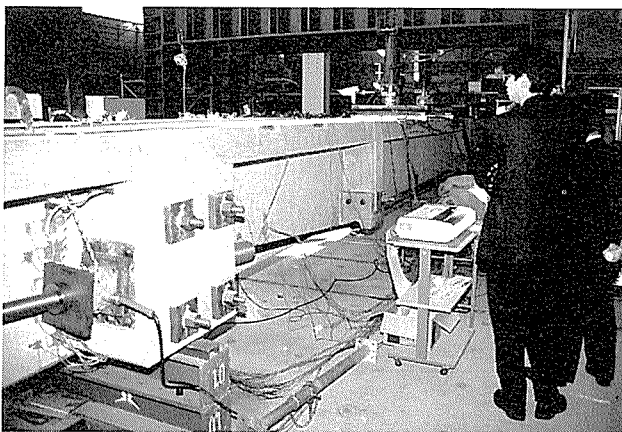


写真-1 外ケーブル供試体曲げ載荷状況

試験時には桁のたわみ、ひずみのほか、外ケーブルの張力変化、外ケーブル定着部背面の引張応力などについても測定をおこなった(写真-1参照)。

4.3 試験結果の総括

各供試体の仕様と試験結果の総括を表-3に示す。供試体は4体製作し、各供試体ごとに外ケーブルの種類と定着方法、緊張力を変化させて試験を実施した。

外ケーブル材料はマルチの本数を調整して、各材料とも剛性EAがほぼ等しくなるようにした。

表でひびわれ荷重と記しているのは、外ケーブル実施前の載荷によるものであり、供試体間のばらつきは少なかった。

補強後の再ひびわれ荷重は、外ケーブル緊張力の増加にしたがって大きくなり、損傷により低下したひびわれ耐力を、外ケーブル補強によって回復できることが確認された。

破壊形式は、各供試体とも支間中央部の上縁圧壊によるものであり、内ケーブルの切断本数が多いNO.3桁の破壊荷重は他の供試体に比べて小さくなった。

4.4 荷重～変位の関係

図-10、図-11に荷重変位曲線の例を示す。

内ケーブルを2本切断することにより、曲げ剛性は損傷を与える前に比べて約20%低下したが、外ケーブル補強により耐荷性状が回復し、破壊に至るまで通常の内ケーブルPC部材と同様な破壊過程を示した。

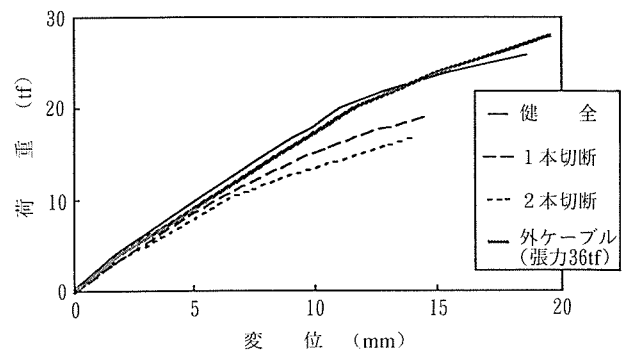


図-10 荷重～たわみ曲線の例 (低荷重レベル)

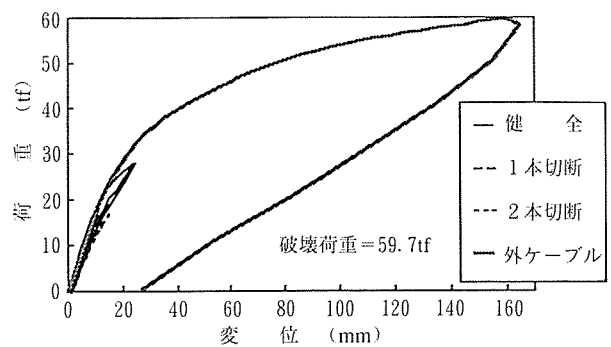


図-11 荷重～たわみ曲線の例 (終局荷重まで)

外ケーブルに連続繊維補強材などの弾性係数が小さな材料を使用した場合、桁の過大な曲げ変形が懸念されるが、桁の全体剛性に与えるケーブル剛性の割合が小さいためフルプレストレス状態ではその影響はほとんど表れていない。

図-12に外ケーブルの緊張力を変化させた場合のたわみ変化の例を示す。

供用荷重レベルでの比較であるため、その差は明瞭ではないが、外ケーブルの緊張力が大きいほどひびわれの再開荷重が大きくなり、開口後の剛性も高くなる傾向が見られる。

4.5 ケーブル緊張力の変化

外ケーブル工法の重要な性状の一つに、検討断面でコンクリート部材と外ケーブルのひずみが異なり、平面保持則が成立しないという点が挙げられる。

図-13に荷重と外ケーブル張力との関係を、図-14に荷重と内ケーブルひずみの関係を示す。

外ケーブルの張力変化を見ると、荷重の初期段階では張力の増加は僅かであるが、30 tf~40 tf 付近の荷重レベルからその増加は急激となっている。

また、内ケーブルの張力変化を見ると、同様に 30 tf~40 tf からひずみが急激に増加している。連続繊維補強材の外ケーブル耐力は終局時においても曲げ上げ緊張耐力の 60% 以下となるように設計していることか

ら、外ケーブルの急激な張力増加は、内ケーブルの降状に伴う桁の変形の急激な増加により生じたものと推定される。

図-15に桁の変位と外ケーブル張力の関係を示したが、ここで見られるように両者の間にはほぼ線形関係が成り立っている。

4.6 曲げひびわれの性状

図-16、図-17に、人為的損傷箇所を一箇所、および二箇所とした場合の曲げひびわれ発生状況を示す。

両供試体とも、PC鋼材の切断を行う前に予備荷重として約 30 tf (曲げひびわれ発生荷重の約 1.5 倍、最大耐力の約 55%) の荷重を加え、ひびわれを発生させた。この段階、すなわち、予備荷重時と記したひびわれは、両供試体とも本質的に同じものである。

補強後の荷重では、まず断面修復部より放射状のひびわれが発生するが、荷重レベルが上がるにつれこの放射状ひびわれの進展は止まり、代わって予備荷重時に発生したひびわれが進展して破壊に至った。

このことから、外ケーブル補強後の桁の2次的なひびわれの形成は、損傷部の位置・程度に影響されるが、終局が近づくとつれ放射状ひびわれの進展は止まっておき、この程度の損傷であれば、修復部の位置が終局時の弱点とならないことが推察できる。

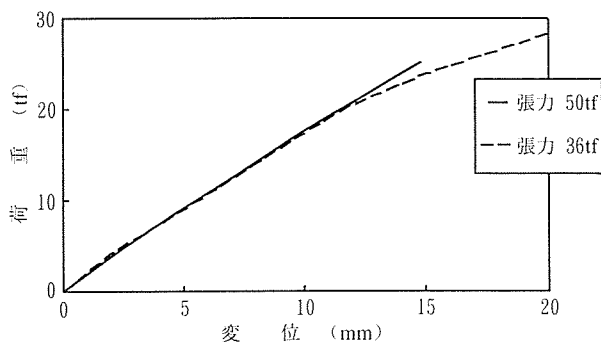


図-12 外ケーブルの緊張力を変化させたときの荷重～たわみ曲線

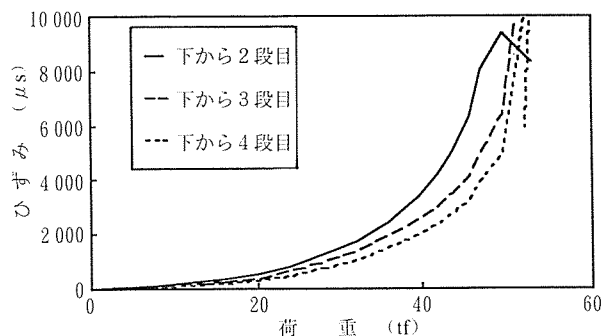


図-14 荷重荷重による内ケーブルひずみの変化

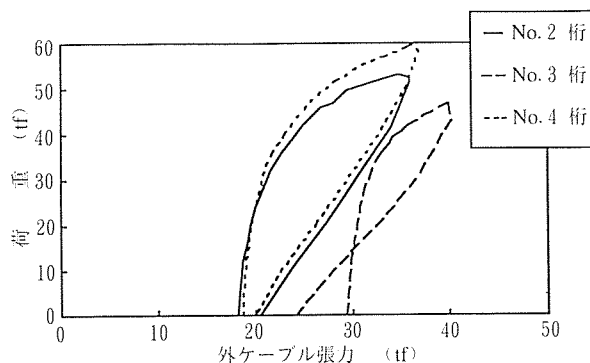


図-13 荷重荷重による外ケーブル張力の変化

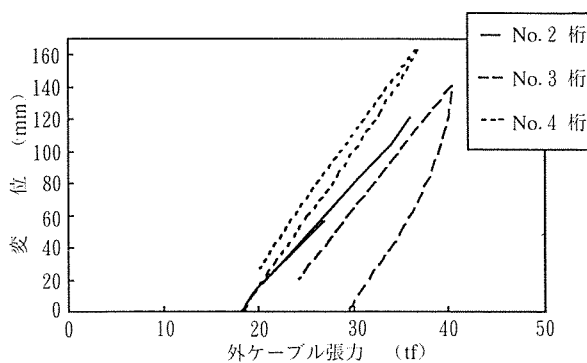


図-15 桁たわみと外ケーブル張力の関係

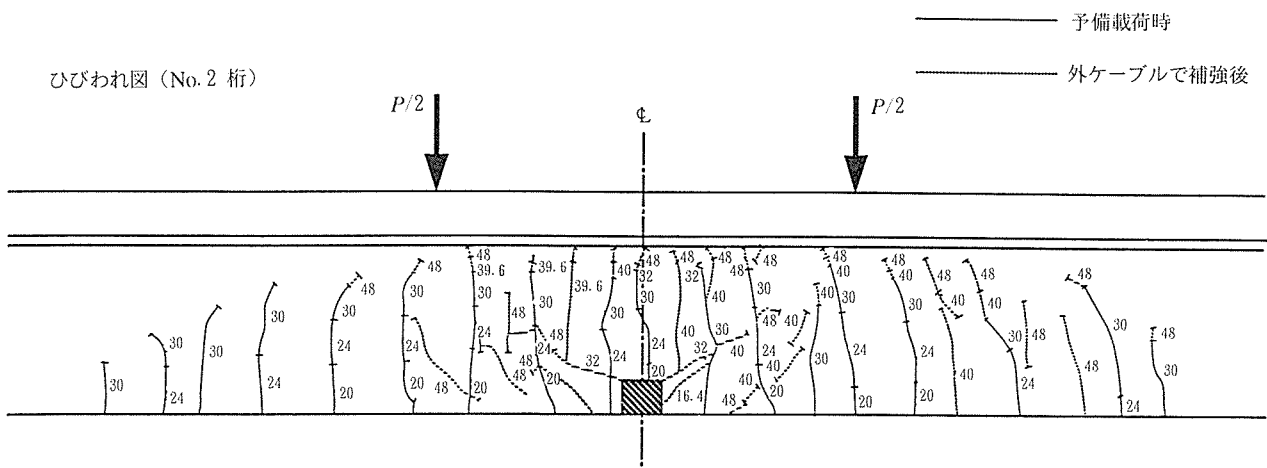


図-16 ひびわれ図 (補修箇所が一箇所の場合)

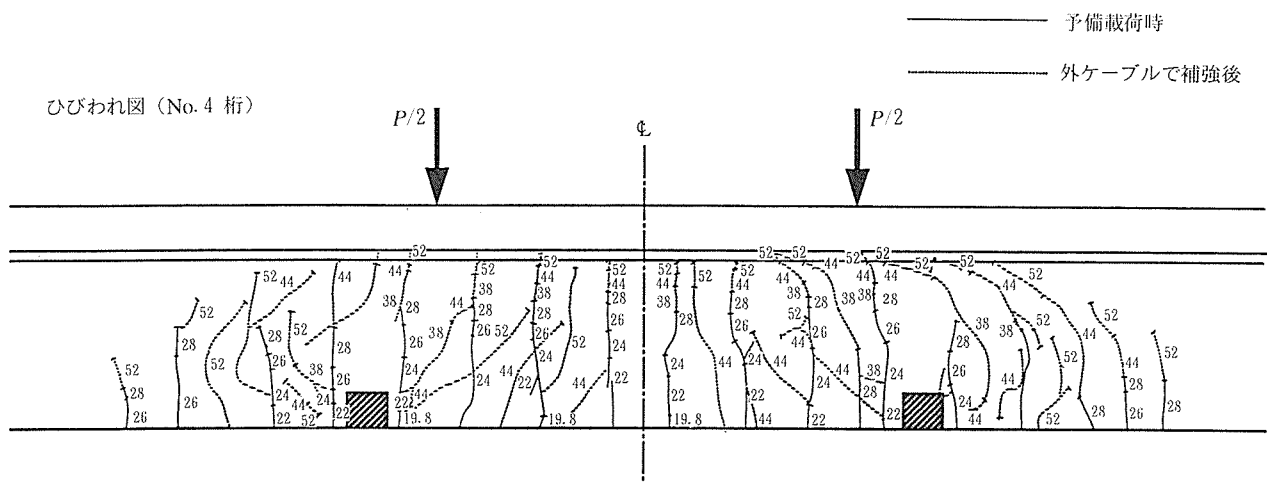


図-17 ひびわれ図 (補修箇所が二箇所の場合)

5. 外ケーブルの施工性

今回の実験では高耐蝕性緊張材料の材質、使用本数、定着具など、条件をさまざまに変化させ、その施工性も確認した。

外ケーブルのケーブル配置作業において、施工性に最も影響を与えたのはケーブルの重量と本数であった。

特に、本研究ではケーシングパイプを使用せず、ケーブルのセット時に材料の自重が加わる構造となっていたため、防蝕 PC 鋼材に比べて軽量の連続繊維補強材の方が施工性に優れていた。

また、ケーブル使用本数は引きそろえ工程の関係上、マルチの本数が少ない方が有利であった。

これらのことから、ケーシングパイプを使用しない外ケーブル工法においては、適度な曲げ靱性の範囲内である限りケーブルは太径、あるいは束ねられたものが適しており、特に緊張力が大きくなるに従って軽量の連続繊維

補強材は作業上有利になるものと考えられる。

また、実際の現場においては、十分な注意を払ったとしてもケーブル配置作業時にケーブルの擦れ・当たりなどが起こるのは避けようがなく、ケーブルの防護のために適切な被覆を行うことが不可欠と考えられる。

緊張定着作業においては、定着具の重量とセットの容易さが重要となる。

シングルケーブルで使用した並行束状アラミドケーブルについては、軽量のアルミニウム合金製くさび式定着具を使用したため、作業性に優れていたが、他のマルチケーブルについては鋼製で、サイズが大きくなり、必然的に重量も重くなったため施工性はあまり芳しくなかった。

外ケーブルの耐蝕性能はケーブル自体だけでなく、定着具をも含めた耐蝕性能で評価されるべきものであり、施工性の向上と併せて、鋼製定着具に替わる軽量かつ耐蝕性に優れた定着具の開発が重要である。

6. ま と め

本研究によって高耐蝕性材料を用いた外ケーブル工法についての基礎的なデータを得ることができた。

今後、補修・新設の両分野で外ケーブル工法の適用が進むものと思われ、これら耐蝕性を考慮した材料の適用も進むものと考えられる。

本工法を実橋に適用した場合、内ケーブルと併用するのであれば、設計荷重レベルにおいて問題を生ずることは少ないと思われるが、ケーブルの曲げ上げ状態における疲労や擦れの問題が明らかでなく、今後、この点について解明してゆかねばならないと考えている。

また、本研究はさまざまなケーブルを用いることにより、耐荷力、作業性を検証して、外ケーブル工法に適した材料・工法を検討することが目的の一つであったが、各材料とも一長一短があり、材料や緊張定着工法自体に開発中の部分もあることから、材料に対する評価はできていない。

各メーカーのなお一層の開発に期待するとともに、本報告がその一助となれば幸いである。

最後に、本研究の実施にあたり、長岡技術科学大学・埼玉大学の学生諸氏、住友電気工業(株)、東京製綱(株)、神鋼鋼線工業(株)、帝人(株)より多大な協力をいただいたことを深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) たとえば、飯野忠雄，風間 徹，荒川敏雄：外ケーブル方式の有用性と適用性について，PC 構造物の供用性と耐久性の向上-第 21 回 PC 技術講習会-，pp. 51～73，(社)プレストレストコンクリート技術協会，平成 5 年 2 月
- 2) 榎本 剛，山藤紀彦：CFRP スtrand の曲げ引張耐力に関する実験的研究，土木学会第 46 回年次学術講演会，pp. 232～233，1991.9
- 3) 原田哲夫，ミヨーキン，樋野勝巳，徳光 卓：定着用膨張材を用いた連続繊維緊張材マルチケーブルの定着法，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，プレストレストコンクリート技術協会，pp. 285～290，1992.11
- 4) 陸好宏史，町田篤彦，佐野 正：FRP を外ケーブルに用いたプレストレストコンクリートはりに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13，No. 2，pp. 755～758，1991.6
- 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. 442/V-16，pp. 153～159，1991.6
- 6) 柳 益夫，丸山久一，北出 太，吉田光秀：外ケーブルを用いた PC 桁の曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 795～800，1993.6
- 7) 徳光 卓，樋野勝巳，丸山久一，陸好宏史：外ケーブル用マルチタイプ連続繊維補強材の定着システムと曲げ引張性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 813～816，1993.6
- 8) 佐野 正，村上忠彦，丸山久一，陸好宏史：外ケーブルによる PC 桁の補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 2，pp. 807～812，1993.6

【1993 年 5 月 14 日受付】

◀刊行物案内▶

新たな展開を示す PC 構造

< 第 19 回 PC 技術協会講習会テキスト >
(平成 3 年 2 月)

頒布価格：4 500 円 (送料：450 円)

内 容：プレストレストコンクリート橋の新たな展開 [池田尚治]／組立プレストレストコンクリート造 (建築) [岡本順二郎]／新しいプレテンション桁の JIS について [池田尚治，藤元安宏，深山清六，佐久間隆夫]／PC 橋の新しい構造事例 [小林 敏，宮地 清，野村貞広]／各地の美しい PC 構造物 [各開催地域の講師]／各種の省力化工法 [(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会]