

論文

[2136] 外ケーブルによる PC 桁の補強効果に関する実験的研究

佐野 正¹・村上忠彦²・丸山久一³・睦好宏史⁴

1. はじめに

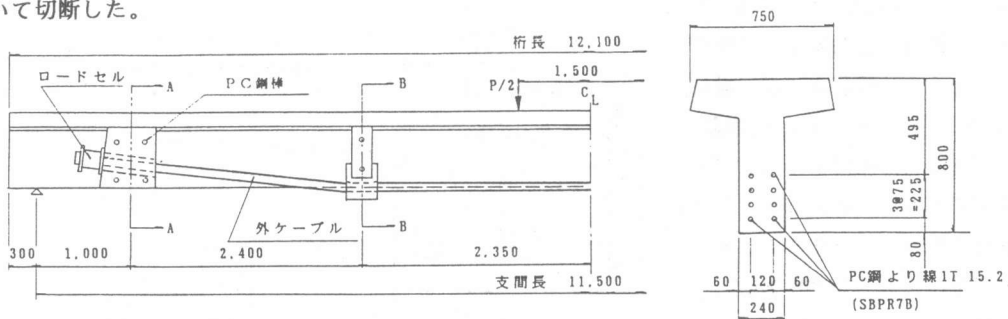
外ケーブル工法は、外観を大きく変えることなく既設構造物の機能改善ができる、構造物の使用中でも施工できるといった特徴があり、補強工法としても有効である。筆者らはこれまでに、RC梁にFRP緊張材を用いてプレストレスを導入した外ケーブル方式のPRC梁供試体に対して曲げ載荷試験を実施し、基本的な力学的性状を明らかにしてきた[1][2]。

本研究では、PC部材に発生する損傷のうちでも最悪と考えられるPC鋼線が破断した場合を想定し、人為的に内ケーブルを切断した実橋レベルのPC桁供試体に対して外ケーブル方式でプレストレスを導入し、補強効果を検討した。外ケーブル用緊張材には、重防食PC鋼線および3種類の連続繊維補強材(カーボン繊維、アラミド繊維2種類)を使用した。

本報告では、補強効果を実験的に確認した結果について述べるとともに、外ケーブル補強PC桁の荷重-変位関係を計算により推定し、実験結果と比較検討した結果について述べる。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は桁長12.1m、支間長11.5mのポストテンション方式PC桁である。桁供試体の概要および支間中央におけるPC鋼線の配置を図-1に示す。PC鋼線は4段(計8本)配置である。損傷PC桁は、これらのPC鋼線のうち、下段の2本あるいは4本を人為的に切断することで作製した。内ケーブルの切断位置および外ケーブルの種類と構成を表-1に示す。切断位置は、支間中央1箇所のみあるいは支間中央から左右にそれぞれ1m離れた2箇所の2種類である。内ケーブルはコンクリートをはつき取ってシースを露出させたのち、ディスクサンダーを用いて切断した。



(a) 桁側面

(b) 支間中央PC鋼線配置

図-1 桁供試体の概要(単位mm)

*1 ショーボンド建設(株)エンジニアリング本部技術部、工修(正会員)

*2 ㈱富士ピー・エス本店技術部開発課課長(正会員)

*3 長岡技術科学大学助教授 建設系、Ph.D(正会員)

*4 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博(正会員)

表-1 載荷試験の概要

実験NO	供試体番号	内ケーブル切断位置	外 ケ ー ブ ル				定着方法
			種 類	構 成	本 数	導入プレストレス (tf)	
1	No. 1	支間中央 1箇所	重防食PC鋼線	束ねタイプ	2	3.6	くさび
2		最下段 2本切断					
3	No. 2	支間中央 1箇所	より線状 カーボン繊維	マルチタイプ	6	3.6	くさび
4		最下段 2本切断					
5	No. 3	支間中央 1箇所	より線状 カーボン繊維	束ねタイプ	6	3.6	定着用膨張材
6							
7		並列束状 アラミド繊維	シングルタイプ	1	3.6	くさび	
8							並列束状 アラミド繊維
9	下段 4本切断	重防食PC鋼線	束ねタイプ	2	6.0	くさび	
10	No. 4	*	組紐状 アラミド組紐状	マルチタイプ	4	3.6	くさび
11							

本数：片側当りの本数， 導入プレストレス：両側合計の値

*：支間中央より1m離れた両側 2箇所
最下段 2本切断

表-2 外ケーブル材料の物性

ケーブルの種類	外径 (mm)	断面積 (mm ²)	降伏点 (kgf/mm ²)	破断荷重 (kgf)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)
重防食PC鋼線	15.2	140.7	177	—	198	19500
より線状 カーボン繊維	12.7	76.0	—	17300	228	14300
並列束状 アラミド繊維	24	452	—	65200	144	12900
組紐状 アラミド繊維	14.7	170	—	27900	165	6640

より線状カーボン繊維および組紐状アラミド繊維の断面積は繊維+樹脂の値である。

並列束状アラミド繊維の断面積は空隙を含んだ値である。

外ケーブルの種類としては、重防食PC鋼線を複数本束ねて使用する場合、より線状カーボン繊維(CFRP)をマルチタイプ(複数本を平行線状に配置するタイプ)で使用する場合、並列束状アラミド繊維をシングルで使用する場合および組紐状アラミド繊維(AFRP)をマルチタイプで使用する場合を検討の対象とした。なお、CFRPおよびAFRPは、繊維を樹脂で複合硬化しているが、並列束状アラミド繊維は繊維のみであり複合硬化していない。各ケー

ブルの物性を表-2に示す。各ケーブルの定着には、くさびによる方法を主に用いた。また、束ねたCFRPを鋼製のスリーブ内に挿入し、間隙に定着用膨張材を注入して、その膨張圧力を利

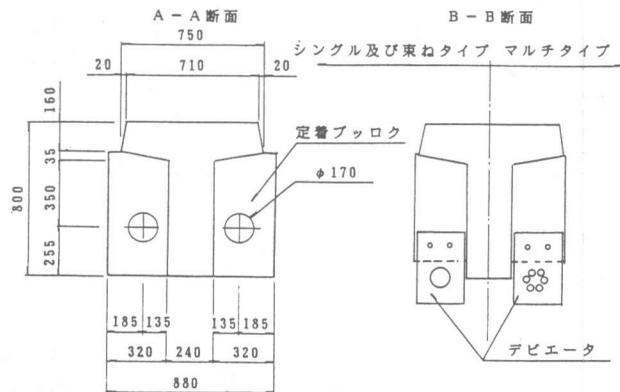


図-2 定着ブロックおよびデビエータ(単位mm)

用してケーブルを定着する方法も試みた[3]。外ケーブルは図-1(a)に示すように桁両側面に配置し、横桁部2箇所まで曲げ上げる形状とした。曲げ上げ角度は 6.2° である。

図-2に定着ブロックおよび曲げ上げブロック(デビエータ)の断面を示す。定着ブロックは桁作製後に鉄筋を配置してコンクリートを打ち足し、さらにコンクリートの硬化後にPC鋼棒で横締めした。ブロック内には、アンカーヘッドが移動できるように直径170mmの空洞を設けている。デビエータは無収縮モルタルを用いたプレキャスト製とし、横桁にエポキシ樹脂で接着するとともにボルトで固定した。また、デビエータ内には外ケーブルの曲げ上げ角度と曲率保持のためにあらかじめ塩化ビニルパイプを埋め込んでいる。

外ケーブルによるプレストレスの導入は、内ケーブルの切断にあたってコンクリートをはつり取った部分を無収縮モルタルで断面修復したのちに行った。導入プレストレスは36tfおよび50tfの2レベルとした。36tfは内ケーブル2本を切断したことにより失われたプレストレス力に相当する。50tfは桁供試体の上縁にひびわれが発生しないと考えられる最大のプレストレスである。このとき、プレストレスは上縁の引張ひずみ発生量を観察しながら徐々に導入し、50tf導入時で上縁の引張ひずみは約 90μ であった。60tfは支間中央で内ケーブルを4本切断したときの外ケーブルによる導入プレストレスである。この時、上縁の引張ひずみは 121μ であったが、ひびわれの発生は認められなかった。外ケーブルの緊張は片引きとし、桁供試体の両側面と同時に導入した。緊張力の管理は、定着ブロック背面に取り付けたロードセルにより行った。

荷重は支間中央に150cmのモーメント一定区間をもつ2点集中荷重とし、荷重、たわみ、ひずみ、外ケーブルの張力の変化、ひびわれ幅等を測定した。

3. 実験結果

表-3に各供試体の初期ひびわれ荷重、プレストレス導入後に初期ひびわれ発生位置でひびわれが再開した荷重およびコンクリートの圧壊荷重を示す。初期ひびわれは支間中央付近で発生し、荷重は17.9~18.4tfであった。ひびわれ発生は目視により確認した。今回の実験に用いた桁供試体において、支間中央の断面下縁でプレストレスが0となる荷重は15tfであり、初期ひびわれ荷重はこの荷重の約1.2倍であった。導入プレストレスの大きさと、初期ひびわれ発生位置でひびわれが再開するときの荷重との関係をNo. 2およびNo. 3と比較する。今回の実験に用いた供試体では、導入プレストレスが36tfから50tfに増加するとひびわれ再開荷重は約13%高くなっ

表-3 荷重実験結果一覧

実験NO	供試体番号	ひびわれ荷重 (tf)	プレストレス導入後のひびわれ再開荷重 (tf)	コンクリート圧壊荷重 (tf)	コンクリートの圧縮強度(kgf/cm ²)
1	No. 1	18.3	—	56.8	599
2			—	—	
3	No. 2	18.2	19.6	53.1	584
4			22.0	—	
5	No. 3	17.9	17.0	—	559
6			19.0	—	
7			16.0	—	
8			18.0	—	
9	No. 4	18.4	—	46.8	570
10			—	59.7	
11			—	—	

た。これは、導入プレストレスの増加につれて桁に生じる上向きの変位が大きくなるため、ひびわれが再び開くまでの変位を与えるのにより大きな荷重を必要とするためと思われる。このような傾向は、外ケーブルの種類が異なっても同様であった。なお、供試体No. 2とNo. 3とでひびわれの再開荷重が異なるのは、No. 2のひびわれ再開は目視によって確認したのに対し、No. 3ではクリップゲージの測定値に基づいて確認したためと思われる。

No. 1および2のコンクリート圧壊は、内ケーブルを切断した支間中央付近で発生した。これに対し、No. 4ではモーメント一定区間で、荷重点に近い位置で発生した。表-3において、No. 4に比べてNo. 1および2の圧壊荷重が低いのは、内ケーブルを切断した支間中央断面に大きなひびわれが発生し、破壊が集中したためと思われる。

図-3は、内ケーブルを切断したことによる影響を荷重-変位関係により比較した結果である。結果は支間中央1箇所内ケーブル2本を切断したNo. 2、支間中央から左右にそれぞれ1m離れた2箇所内ケーブル2本を切断したNo. 4について示している。切断後の荷重は支間中央の変位が初期ひびわれ発生時の約1.5倍(15mm)となるまで行った。対応する荷重は約17tfである。これより、最下段の内ケーブルを切断したことにより曲げ剛性は低下し、健全桁と同様の変位を生じる荷重は約20%低下することがわかる。また、支間中央1箇所内ケーブル2本を切断した場合と支間中央から左右にそれぞれ1m離れた2箇所内ケーブル2本を切断した場合とで比較すると、17tf程度までの荷重範囲では両者の荷重-変位関係はほぼ同様であった。

図-3において、外ケーブルで補強した後の荷重-変位関係をNo. 2を例に示す。これより、荷重-変位関係は健全時と同程度まで回復しているのがわかる。また、導入プレストレスを36tfから50tfに増加させた場合、15tf程度の荷重までは曲げ剛性に大きな変化は認められなかった。しかし、それ以上の荷重では導入プレストレスが大きいほど曲げ剛性が高まっており、健全桁の曲げ剛性を上回る結果となった。

このように今回の実験に用いたPC桁供試体では、内ケーブルの切断により失われたプレストレスと同等のプレストレスを外ケーブルで導入することにより、健全桁と同様の曲げ剛性を有するまでに回復できることが確認された。

4. 荷重-変位関係の推定

ここでは、外ケーブル補強PC桁の荷重-変位関係を計算により推定[2]した結果について述べる。

実測と推定結果との関係を図-4に示す。

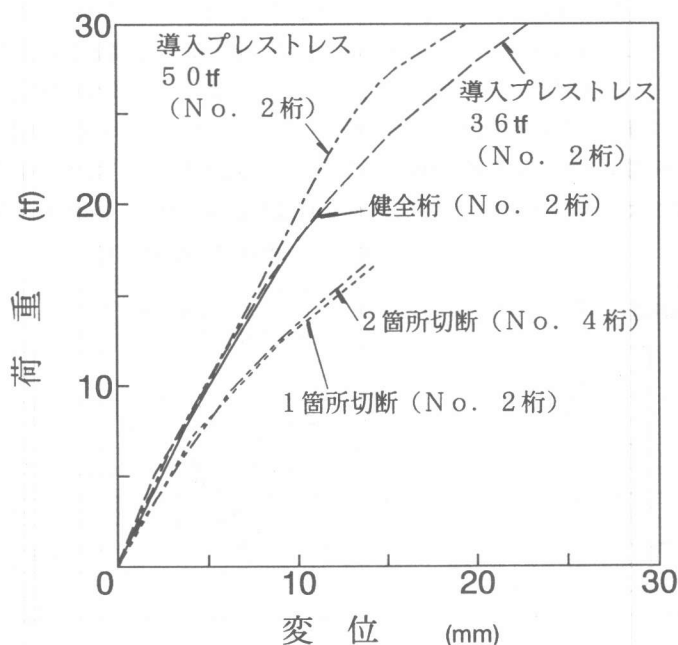
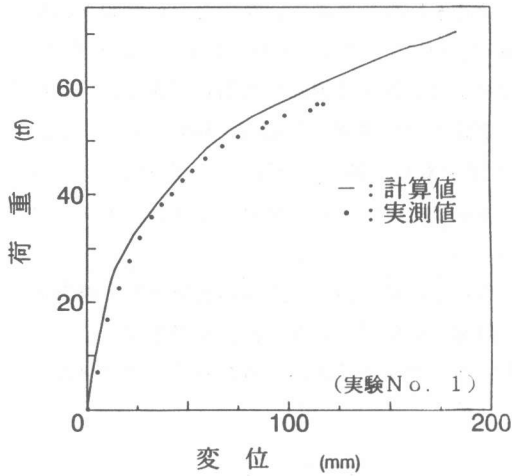
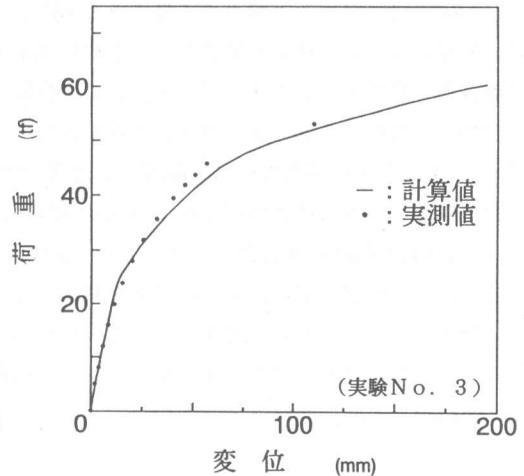


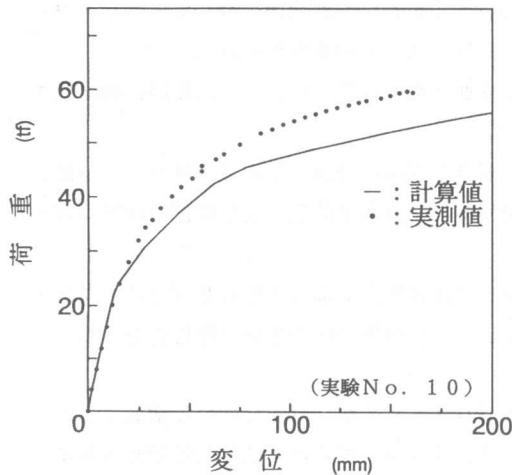
図-3 外ケーブルによる補強効果



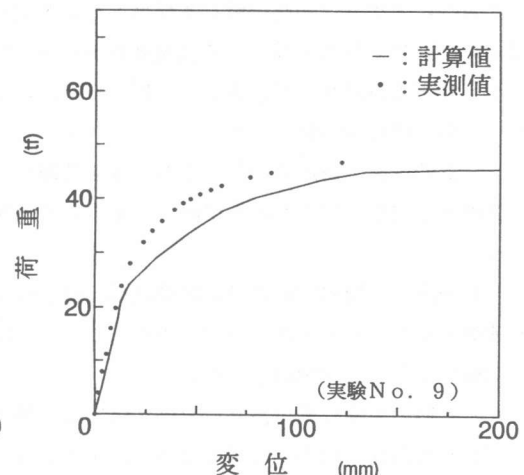
(1)重防食PC鋼線(2本切断)



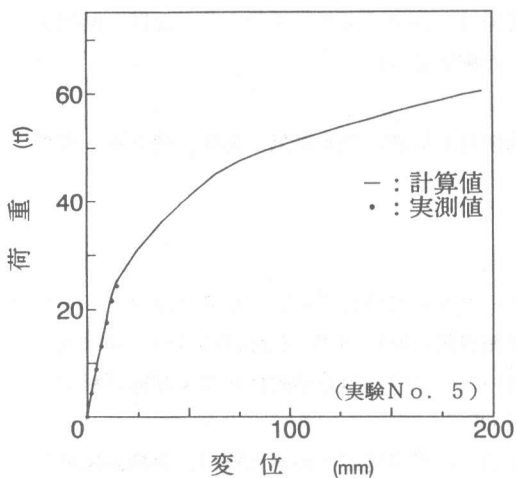
(2)より線状カーボン繊維(2本切断)



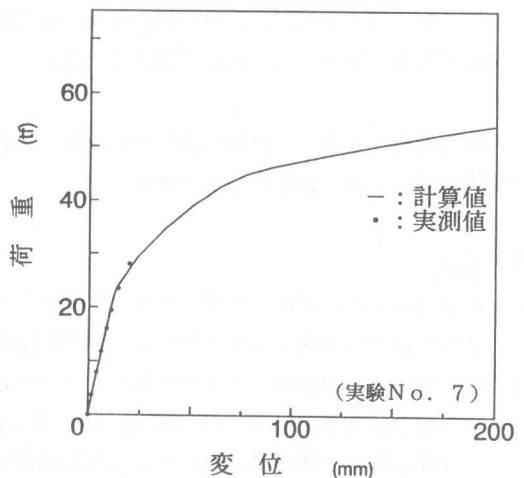
(3)組紐状アラミド繊維(2箇所切断)



(4)重防食PC鋼線(4本切断)



(5)より線状カーボン繊維(定着用膨脹材)



(6)並列束状アラミド繊維

図-4 荷重-変位関係の実測値と計算値との比較

(1)あるいは(2)は、支間中央1箇所では2本内ケーブルを切断したのち、重防食PC鋼線あるいはより線状カーボン繊維で補強したときの結果である。(3)は、支間中央から左右にそれぞれ1m離れた2箇所では2本内ケーブルを切断し、組紐状アラミド繊維で補強した場合である。(4)は、支間中央1箇所では4本内ケーブルを切断したのち、重防食PC鋼線で補強した結果である。また、(5)は、束ねたより線状カーボン繊維を定着用膨張材で定着した場合、(6)は、並列束状アラミド繊維で補強した場合の結果である。(5)および(6)は圧壊まで載荷していない。また、導入プレストレスは(4)が60tfである他は、すべて36tfである。

これより、荷重-変位の計算結果は実測とよく一致しており、内ケーブルの切断本数、位置および緊張材が異なっても、外ケーブル補強PC桁の荷重-変位関係を計算により推定できることが確認された。また、定着用膨張材を使用した場合でも、従来のくさび定着と同様に取り扱えることが確認できた。

5. 結論

人為的に内ケーブルを切断して損傷を与えた実橋レベルのPC桁供試体に対して、外ケーブル方式でプレストレスを導入して補強効果を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 最下段の内ケーブルを2本切断したことにより曲げ剛性は低下し、健全桁と同様の変位を生じる荷重は約20%低下した。

(2) 支間中央1箇所では内ケーブル2本を切断した場合と支間中央から左右にそれぞれ1m離れた2箇所では内ケーブル2本を切断した場合とで比較すると、両者の荷重-変位関係はほぼ同様であった。

(3) 今回の実験に用いたPC桁供試体では、内ケーブルの切断により失われたプレストレスと同等のプレストレスを外ケーブルで導入することにより、健全桁と同等の曲げ剛性を有するまでに補強できることが確認された。

(4) 今回の実験に用いたPC桁供試体では、導入プレストレスが36tfから50tfに増加すると、ひびわれ再開荷重は約13%高くなった。また、導入プレストレスが大きいほど曲げ剛性は高まり、荷重が約15tfを超えると健全桁を上回る結果となった。

(5) 外ケーブルで補強したPC桁の荷重-変位関係は、内ケーブルの切断本数、位置、緊張材の種類が異なる場合でも計算により推定し得ることが確認された。

本研究を行うに当たり材料の提供を頂いた、神鋼鋼線工業㈱、住友電気工業㈱、帝人㈱、東京製綱㈱に対し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 睦好宏史・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
- 2) 睦好宏史・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、1992.2
- 3) 平山達郎ほか：膨張材を用いたFRP緊張材定着法の現場施工への適用検討、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、土木学会、pp.47-52、1992.4