

論文

[2134] 外ケーブルを用いた PC 桁の曲げ性状

柳 益夫*¹・丸山久一*²・北出 太*³・吉田光秀*⁴

1. はじめに

ここ十数年来、海洋環境下に設置されたコンクリート構造物の塩害問題が深刻化している。とりわけプレストレストコンクリート部材においては、緊張材の腐食は部材の耐荷性状に大きな影響をおよぼし、耐荷力を大きく損ねることになる。

この補修・補強方法として近年注目されているものに、「外ケーブル方式」によりプレストレスを導入する工法がある。また、外ケーブル材料として腐食抵抗の大きな連続繊維補強材を用いることも検討され始めている [1] [2]。

本研究は、塩害を受けた PC 桁を想定して、人為的に内ケーブルを切断して損傷を与え、外ケーブルによりプレストレスを導入した PC 桁において曲げ荷重実験を行い、その曲げ性状について検討したものである。また、外ケーブルの曲げ引張性状および外ケーブルによる PC 桁の補強効果等については、他の 2 編の論文 [3] [4] にて報告する。

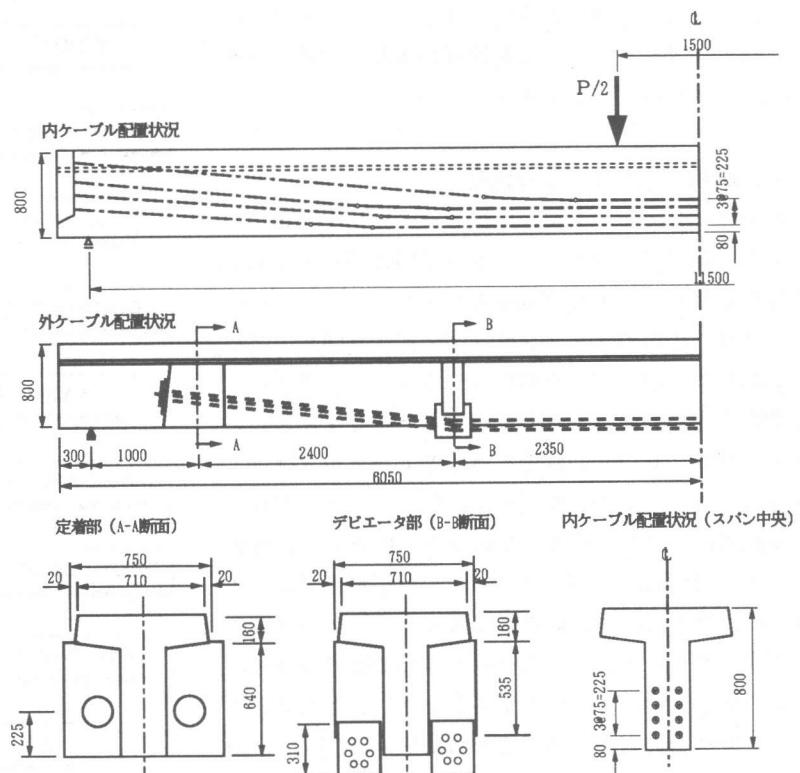


図-1 供試体形状

- * 1 株式会社福田組、工修（正会員）
- * 2 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系、Ph. D.（正会員）
- * 3 ショーボンド建設株式会社 エンジニアリング本部技術部
- * 4 株式会社富士ピー・エス 東京本部技術部

2. 供試体形状

図-1に供試体形状を示す。供試体は、桁長12.1m、支間長11.5mのポストテンション方式単純T桁で、内ケーブル(SWPR7B 1T15.2)は8本(4段)配置されており、プレストレス導入時の内ケーブルの応力度は、123.15kgf/mm²であり、供試体は同一の特性を有するもの

を合計4体作製した。外ケーブル定着ブロックは、PC鋼棒によりウェブに、またデビエータは接着剤により横桁下端に取り付けた。

外ケーブルにはPC鋼線(重防食タイプ)に加え、近年研究開発が盛んな連続繊維補強材であるカーボン繊維、アラミド繊維を用いた。ここでは外ケーブルの引張剛性が等しくなるよう各繊維の本数を定めている。外ケーブルの材料定数を表-1に示す。

3. 試験方法および載荷経路

載荷は、スパン中央に1.5mの等モーメント区間をもつ2点対称集中載荷とした。載荷経路は図-2に示す。塩害を受けたPC桁を再現するために、コンクリートをはつり、小型のディスクサンダーにより内ケーブルを切断した。損傷程度を変化させるために、内ケーブル切断位置、切断本数を各供試体ごとに変化させた。内ケーブル切断の断面修復を無収縮モルタルで行い、硬化後、外ケーブルを配置した。外ケーブルはデビエータ部で折り曲げ、桁ウェブの両面に配置した。外ケーブルの緊張は、2連式油圧ジャッキを定着ブロック後方に設置して、両面同時に緊張した。外ケーブルによるプレストレス力は、内ケーブルの切断で失われたものと同じ量(36t)を導入することとし、途中ではプレストレス力の影響を調べるためにその1.5倍(50t)の量も導入した。外ケーブルの張力は外ケーブルの端部に設置したロードセルにより測定した。なお、初期載荷でひびわれの発生位置を確認の後、ひびわれ発生点にクリップゲージを取り付け、ひびわれ幅を測定した。

最終的には、外ケーブルで補強した状態でコンクリートが圧壊するまで載荷を行った。

各供試体に使用した外ケーブルの種類、導入プレストレス等を表-2に示す。

表-1 外ケーブルの性状

	重防食	より線状	並列束状	組紐状
種類	PC鋼より線	カーボン繊維	アラミド繊維	アラミド繊維
外径 (mm)	15.2	12.7	24	14.7
断面積 (mm ²)	140.7	76.0	452	170
降伏点強度 (kgf/mm ²)	177			
破断荷重 (kgf)		17300	65200	27900
引張強度 (kgf/mm ²)	198	228	144	165
弾性係数 (kgf/mm ²)	19500	14300	12900	6640
使用本数 (本)	4	12	2	8

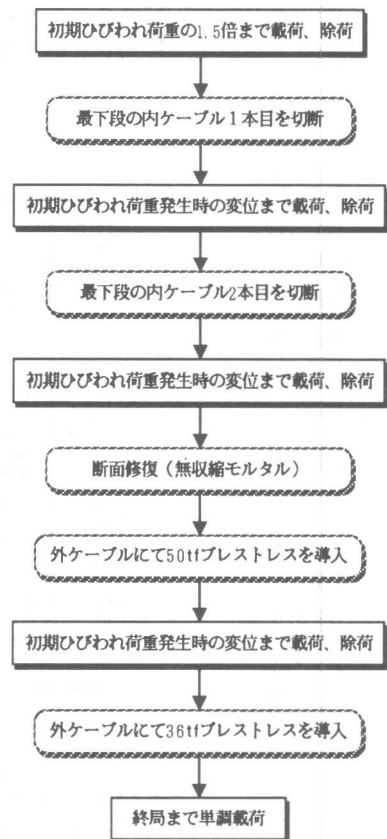


図-2 載荷経路

4. 実験結果および考察

(1) ひびわれ発生状況

破壊形式は、すべての供試体において曲げ圧縮破壊であった。代表例として、NO.1桁、NO.4桁のひびわれ発生状況を図-3に示す。PC桁として4供試体は全く同じ性状を有しているので、初期載荷時のひびわれ発生荷重は全て同様で、18tf前後である。

注目すべき点は、内ケーブルの切断位置の違いによる外ケーブル方式で補強した後の性状である。NO.1桁においては、荷重が30tf過ぎから内ケーブルの切断点から放射状に新たにひびわれが進展し、荷重が増加するにつれてひびわれの本数が増加していく。荷重が終局に近づくと、放射状のひびわれの進展が止まり、内ケーブル切断前に形成されたひびわれが上方に進展し、最終的にはスパン中央のひびわれが進展して、等曲げモーメント区間のコンクリートが圧壊した。NO.4桁においては、荷重が44tf近辺から切断点から放射状にひびわれが進展した。切断点はスパン中央から1mの点であり、桁端側に放射状に進展したひびわれは、ある荷重段階から載荷点へ向かって進展した。荷重が終局に近くなるとスパン中央の放射状のひびわれの進展が止まり、代わって内ケーブル切断前に形成されたひびわれが上方に進展し、最終的には、載荷点近傍（等曲げモーメント区間内）のコンクリートが圧壊した。NO.2、NO.3桁のひびわれ発生状況はNO.1桁とほぼ同一であった。なお、各供試体における外ケーブルの設計は、外ケーブルの引張剛性EAがほぼ等しくなるようにしている。したがってNO.4桁の切断後の性状の違いは外ケーブルの種類の違いによるのではなく、切断位置による違いであると考えられる。

これは、損傷を受けたPC桁を外ケーブルで補強した場合、プレストレスを導入することにより桁全体の初期曲げ剛性は改善されるが、荷重の増加にともない、PC桁自身の断面剛性、欠陥部の影響が大きく現れてくると考えられる。

これは、損傷を受けたPC桁を外ケーブルで補強した場合、プレストレスを導入することにより桁全体の初期曲げ剛性は改善されるが、荷重の増加にともない、PC桁自身の断面剛性、欠陥部の影響が大きく現れてくると考えられる。

(2) 荷重-変位関係

図-4にNO.2桁の全域にわたる荷重-変位関係を示し、初期段階を拡大したものを図-5に示す。内ケーブルを切断することにより曲げ剛性が低下して変形が大きくなる。これに外ケーブルを用いてプレストレスを導入すると、荷重-変位関係は内ケーブルの切断前までに回復している。

表-2 実験要因

供試体名	外ケーブル種類	切断位置 切断本数	導入プレストレス (tf)
NO.1桁	重防食PC鋼線	スパン中央	36
		最下段(2本)	50
NO.2桁	より線状 カーボン繊維	スパン中央	36
		最下段(2本)	50
NO.3桁	並列束状 アラミド繊維	スパン中央	36
		最下段(2本)	50
	重防食PC鋼線	スパン中央 下から2段目まで(4本)	60
NO.4桁	組紐状 アラミド繊維	スパン中央	36
		スパン中央から左右1m 最下段(2本)	50

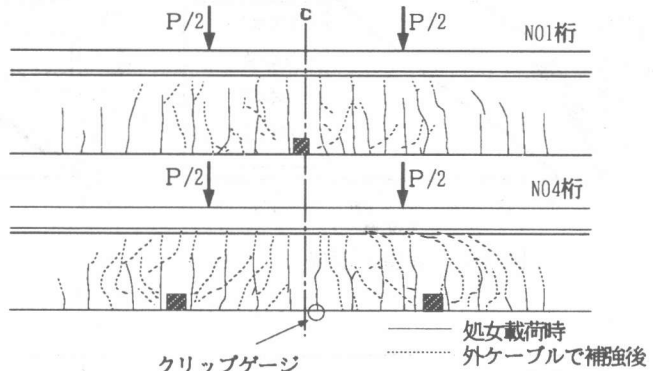


図-3 ひびわれ発生状況

外ケーブルにプレストレスを50tf導入した場合は、初期ひび割れ発生時の変位に至るまでしか載荷しておらず、プレストレスを36tf導入した場合の荷重-変位関係と明瞭な差は生じていないが、ひびわれ再開口後、若干であるがプレストレス50tfを導入した場合の方が変位抑制効果大きいことを示している。

外ケーブルによってプレストレスを導入した後、載荷し最大荷重に至るまでの荷重-変位関係は、通常のPC部材とはほぼ同様の挙動を示す。図-6に外ケーブルの張力を、図-7に内ケーブルのひずみを示す。荷重の増加にともない変位が増加し、荷重30tf近辺で内ケーブルが降伏している（内ケーブルのプレストレス導入時にひずみが6000 μ s程度生じており、図-7中の2500 μ sの付近が内ケーブルの降伏点と考えてよい）。この点は、外ケーブルの張力が急激に増加する点と一致している。つまり、変形が進んで内ケーブルが降伏すると変形の進行が著しくなり、その変形にともない外ケーブルの張力が急激に増加したと考えられる。

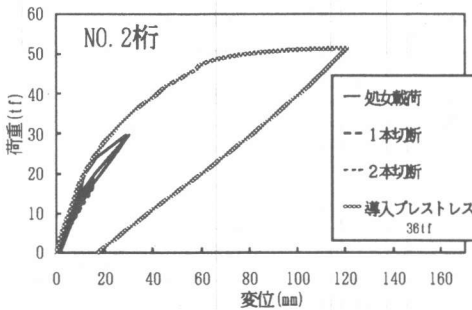


図-4 荷重-変位

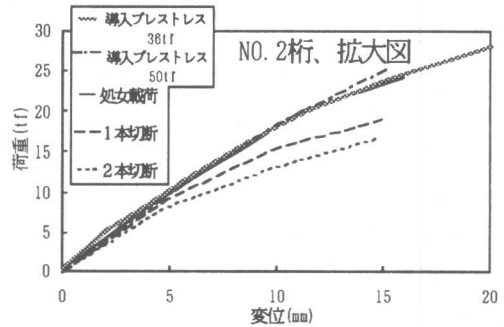


図-5 荷重-変位

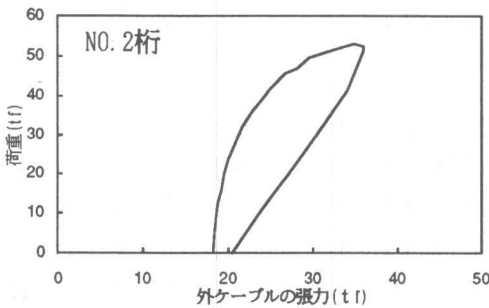


図-6 荷重-外ケーブルの張力

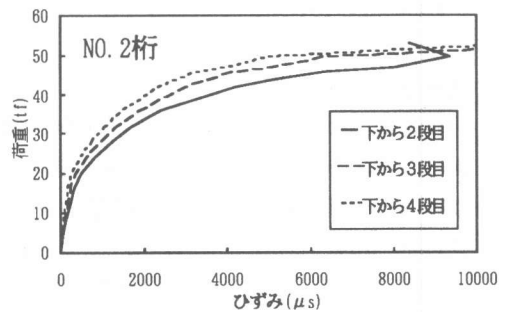


図-7 内ケーブルのひずみ

(3) コンクリートのひずみ

図-8~10にNO.4桁の処女載荷時、内ケーブル2本切断時および外ケーブルで補強した時のスパン中央でのコンクリートのひずみ分布を示す。ここで述べているひずみは、初期載荷前のコンクリートのひずみを0としたものである。

内ケーブルを2本切断することにより、上縁に -20μ s、下縁に 20μ s程度のひずみが生じているが、切断にともなう中立軸の変動はほとんど生じなかった。これは、切断位置がスパン中央でないたため、スパン中央の中立軸の変動が生じなかったと考えられる。

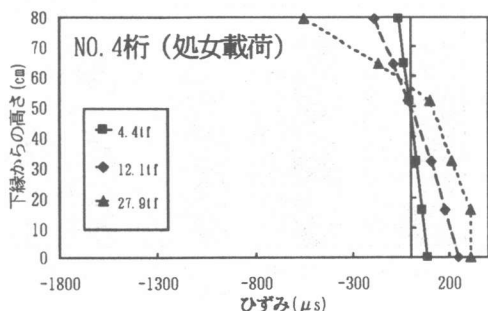


図-8 コンクリートひずみ分布

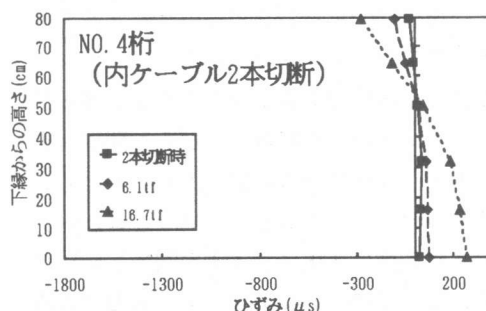


図-9 コンクリートひずみ分布

さらに外ケーブルでプレストレスを導入し補強することにより、上縁に $40\mu s$ 、下縁に $-200\mu s$ が生じ、中立軸が下がり、曲げ性状が改善されている。終局時には、中立軸が上がり破壊に至っている。

(4) ひびわれ間隔

損傷を受けたPC桁を外ケーブルによって補強しても、そのひびわれ間隔は、補強前のPC桁の性状によって決定される。土木学会コンクリート標準示方書では、曲げひびわれ幅算定式を以下のように定めている [5]。

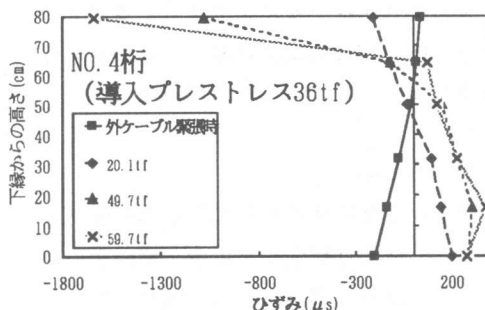


図-10 コンクリートひずみ分布

$$W_{max} = k \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} \text{ (または } \frac{\sigma_{pe}}{E_p}) + \varepsilon'_{cs} \right] \quad (1)$$

ここに、 k ：鋼材の付着性状の影響を表す定数、 C ：かぶり (cm)、 C_s ：鋼材の中心間隔 (cm)、 ϕ ：鋼材径 (cm)、 σ_{se} 、 σ_{pe} ：鉄筋およびPC鋼材の応力度の増加量 (kgf/cm²)、 E_s 、 E_p ：鉄筋およびPC鋼材のヤング係数 (kgf/cm²)、 ε'_{cs} ：クリープおよび乾燥収縮の影響を考慮するための数値
この式の意味より、次式が最大ひびわれ間隔を表していると考えられる。

$$l_{max} = k \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} \quad (2)$$

図-11に最大ひびわれ間隔の実験値と学会式による算定値との比較を示す。算定値は最外縁に配筋されている鉄筋を対象に行ったものである。実験値は算定値に比べて過小評価となっている。理由としては、多段配筋の影響、プレストレスの影響等が考えられる。

(5) ひびわれ幅

図-12には処女載荷時および内ケーブル切断後の載荷における荷重-ひびわれ幅の関係を示す (NO.3桁)。さらに図-13には外ケーブルで補強した後の荷重ひびわれ幅の関係を、プレスト

レスレベルの違いによる影響について示した。損傷を受けたPC桁を外ケーブルを配置してプレストレスを導入することによりひびわれ再開口荷重が大きくなり、導入プレストレスが大きいほどひびわれ開口荷重が大きくなっている。図-13において、導入プレストレス60tというのは、内ケーブルを更に2本(計4本)切断した桁の補強として導入したプレストレス力である。内ケーブル4本を切断した後の荷重-ひびわれ幅関係は特に示していないのであるが、内ケーブルの切断により喪失したプレストレス力を外ケーブルにより導入することで、荷重-ひびわれ幅関係においても、その性状改善効果が認められた。

5. まとめ

- (1) 損傷を受けたPC桁を外ケーブルにより補強した場合、補強後のひびわれ進展状況は、内ケーブルの損傷位置、損傷程度に依存する。
- (2) 損傷を受けたPC桁を外ケーブルにより補強した場合、ひびわれ再開口荷重を大きくすることができ、十分なひびわれ抑制効果がある。

6. 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、pp.755~758、1991。
- [2] 佐伯 昇、大島寿哉、堀口 敬、後町光夫、秦 滋康：アラミド繊維による外ケーブルを用いたPRC部材の2、3の実験、第46回セメント技術大会講演集、pp.820~825。
- [3] 徳光 卓、樋野勝巳、丸山久一、睦好宏史：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、投稿中、1993。
- [4] 佐野 正、村上忠彦、丸山久一、睦好宏史：外ケーブルによるPC桁の補強効果に関する実験的研究、投稿中、1993。
- [5] 土木学会：コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編、1991。

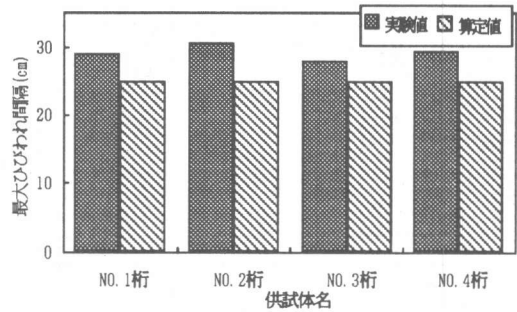


図-11 最大ひびわれ間隔の比較

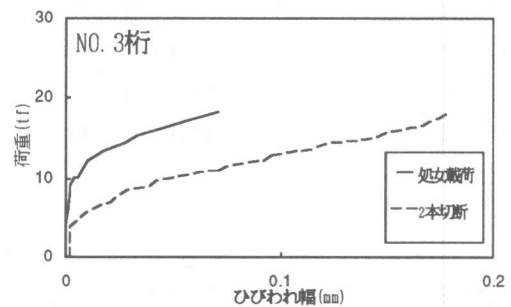


図-12 ひびわれ幅

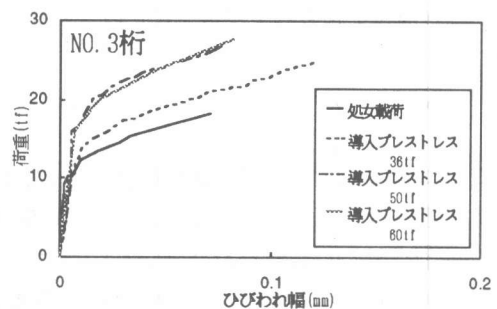


図-13 ひびわれ幅