

(71) 外ケーブルを使用した既設PC橋の補強に関する実験および解析

阪神高速道路公団 山口 良弘
 阪神高速道路公団 沢登 善誠
 (株)ピー・エス 三輪 泰之
 (株)ピー・エス ○ 森 拓也

1. はじめに

外ケーブルによるPC桁の補強は、耐荷力の不足した既存の橋梁に対してきわめて有効な手段の一つである。本実験および解析は、実際の補強工事の実施に際し、その安全性の確認を目的としてPC建設協会関西支部により実施されたものである。補強対象桁は、約30年前に建造されたポストテンション方式単純T桁であり、主桁は10cmのモルタル目地により5ブロックに分割されている。外ケーブルは、図-1に示すように緊結鋼棒によって固定されたコンクリートブラケットに定着する方式としている。

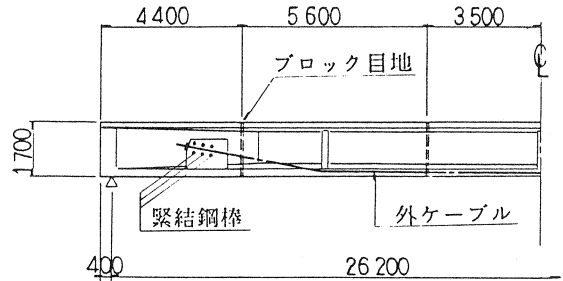


図-1 外ケーブル配置図

実験および解析の主項目は、
 ①定着端コンクリートブラケットの使用状態および終局状態の安全性確認
 ②外ケーブルで補強されたPC桁の曲げ破壊耐力の確認
 である。

なお、当橋梁の調査から補強工事に至るまでの流れを図-2に示す。

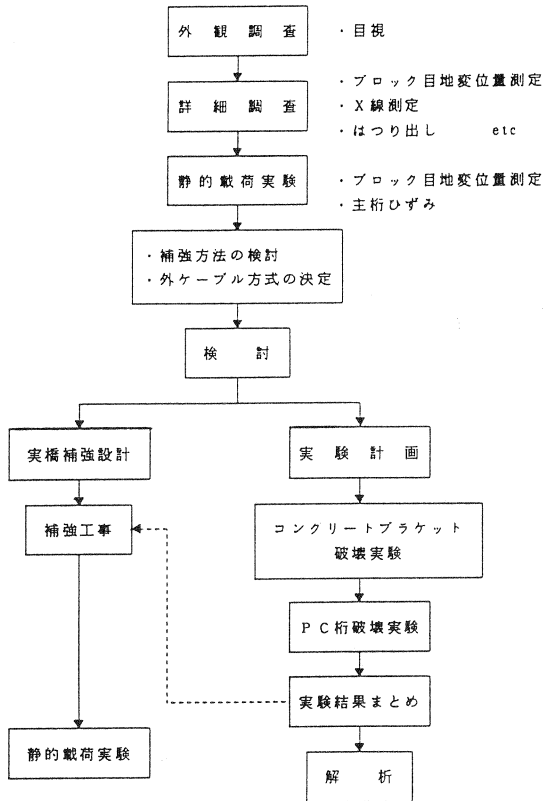


図-2 調査から補強まで

2. 実験

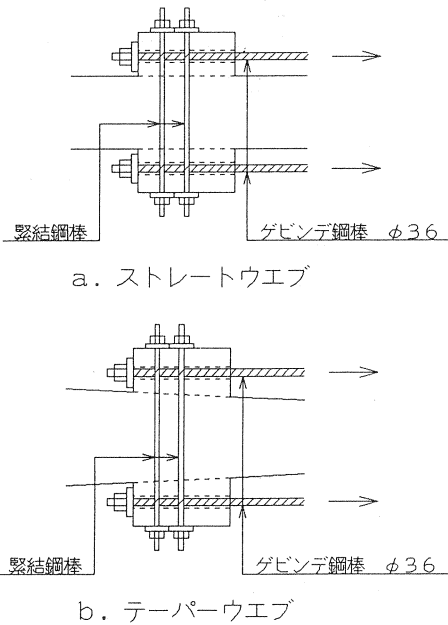
2-1 コンクリートブラケットの安全性確認実験

供試体は図-3に示す形状であり、緊結鋼棒の量を変えて打ち継ぎ面に与える平均圧縮応力度を変化させ、終局耐力およびブラケットの水平変位量、緊結鋼棒の増加ひずみについて測定した。またブラケットの設置位置が主桁ウェブ厚の変化区間であることから、ストレートウェブとテーバーウェブの両者について実験を行い、その影響について調査した。

破壊荷重の実験値と設計値(土木学会コンクリート標準示方書6.3.7設計せん断伝達耐力)との比較を図-4に示す。安全率を

考慮しないせん断伝達耐力(推定値)は実験結果とかなりよく一致している。いずれの場合においても実験値の方が15tほど高い値となっているが、これは供試体製作時に配置したインサートボルト(M12-3本)の抵抗によるものと思われる。またテーパウェブの影響は10%程度であり、設計値とよく一致した結果がえられた。

一方、載荷荷重とブラケット変位量の間関係を見ると、ある荷重段階を越すと変位量の進行が大きくなる傾向がみられる。これは緊結鋼棒の量に関わらず同様の挙動を示しており、平均圧縮応力度の差による顕著な違いは認められない。



供試体の種類

供試体	緊結鋼棒 SBPR95/110	平均圧縮応力度 σ_c (kg/cm ²)
NO. 1	$\phi 9$ 2-4本	14.5
NO. 2	$\phi 11$ -4本	20.8
NO. 3	$\phi 13$ -4本	29.3

図-3 コンクリートブラケット実験供試体

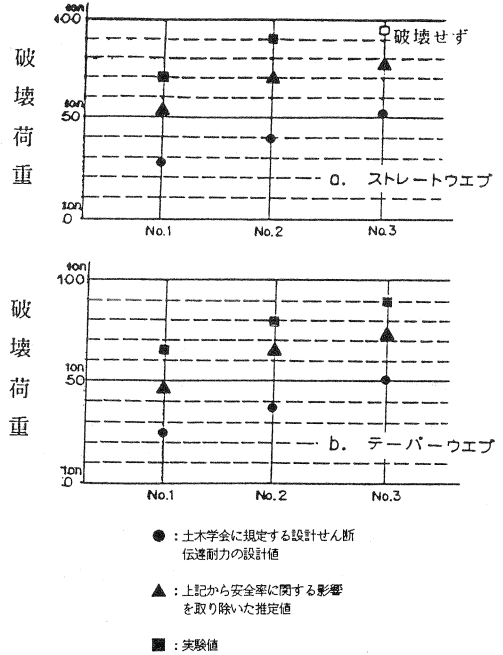


図-4 実験値と設計値

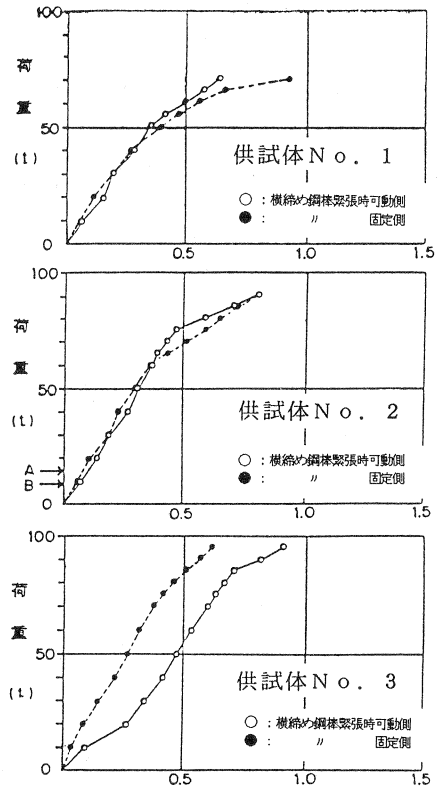


図-5 載荷荷重とブラケット変位量

2-2 外ケーブル補強桁の曲げ破壊耐力確認実験

実験供試体は実橋の1/2.5モデルであり、その種類は表-1に示す3本である。基準桁は実橋の健全桁に相当し、試験桁No.1, 2は損傷桁に相当するものである。実橋の損傷は桁内プレストレスが何らかの原因で減少したものと推察されることから、試験桁は桁内のPC鋼材量を基準桁の70%とし、不足分を外ケーブルで補強している。また試験桁No.1は桁内ケーブルのグラウトを完全充填しているが、試験桁No.2ではまったくグラウトをしていない。したがって各供試体は、配置されているPC鋼材の総量および使用状態での上下縁応力度はほぼ等しいが、コンクリートとPC鋼材との付着は順次低下したものとなっている。載荷実験要領を図-6に示す。

表-1 外ケーブル補強桁実験供試体

実験供試体	桁内ケーブル	外ケーブル	グラウト
基準桁	SWPR7A 1T15.2-5本	—	完全充填
試験桁No.1	SWPR7A 1T12.4-5本	SWPR7B 1T12.7-2本	完全充填
試験桁No.2	SWPR7A 1T12.4-5本	SWPR7B 1T12.7-2本	0%

表-2の実験結果によれば、試験桁は基準桁に比べ曲げ破壊抵抗モーメントは低下するが、グラウト0%においても全ケーブル付着ありと考えた場合の約95%の耐力がえられた。また載荷荷重と目地部の目開きとの関係を見ると、グラウト効果の小さいものほど目開きが急激に進行する。破壊状態の桁のひびわれを見ると、グラウト効果の小さいものほどひびわれ本数が少なく、ブロック目地部の目開きが大きくなっている。試験桁No.1, 2はいずれも目地部上縁のコンクリートが圧壊しており、外ケーブル補強桁ではひずみが分散せず、ブロック目地部に集中することが推察される。

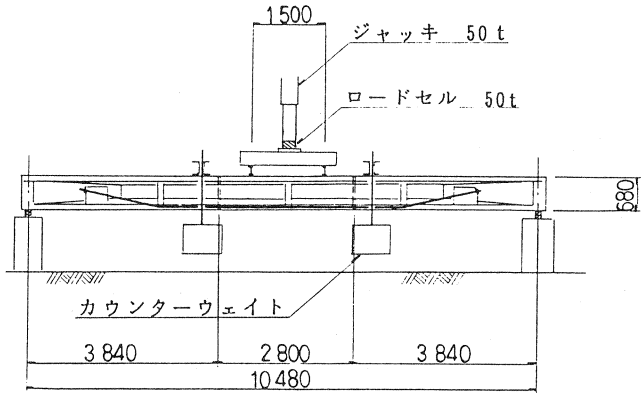


図-6 載荷実験要領

表-2 外ケーブル補強桁破壊抵抗曲げモーメント実験結果

	基準桁	試験桁No.1	試験桁No.2
ケーブル配置 ● 付着あり ○ 付着なし			
設計値	61.9tm	62.9tm (注)	62.9tm (注)
実験値	81.7tm	70.2tm	59.7tm
破壊箇所	載荷直下点	ブロック目地	ブロック目地

注) 全ケーブル付着ありと仮定したときの計算値

3. 解析

3-1 解析方法

外ケーブルで補強されたPC桁の破壊性状を調査するため、コンクリート材料の非線形を考慮した有限要素法による解析を行った。また曲げ破壊耐力に対し重要な要因となるPC鋼材の破壊時張力を評価するため微小変形を考慮した有限変位理論を用いた。

(1) コンクリートの材料非線形

ひびわれ発生後の引張剛性、せん断剛性および圧縮塑性について図-7に示すように非線形条件を設定した。圧縮強度は各供試体毎に行った材料試験の値を採用し、引張強度については土木学会コンクリート標準示方書に準じ、 $f_t = 0.5 f_c^{2/3}$ (材料安全係数は考えない)により算出した。

(2) 解析モデル

要素としては、コンクリート、桁内PCケーブル、外ケーブルおよび支間中央付近の鉄筋を考慮し、ブロック目地部は接触面として取り扱う。またグラウトされたPC鋼材は各節点で固定されたものとし、グラウトされていないPC鋼材は可動として考える。

3-2 解析結果

コンクリートの圧縮ひずみが $\epsilon_{cu} = 3500 \times 10^{-6}$ に達した時を解析上の破壊時とし、その破壊荷重と実験値とを比較すると表-3のようになる。解析値はいずれも実験値より小さく、PC鋼材とコンクリートとの付着が無いものほど差が大きくなっている。解析ではPC鋼材とシースとの摩擦を無視しており、それが誤差の一因となっているのではないかと考えられる。

つぎに破壊性状の比較を行う。FEM解析による破壊時クラックは実験クラックスケッチによく近似しており、付着の有無がひびわれの分散に与える影響についてよく表現されている(図-8)。またコンクリートの圧縮ひずみ、目地部の目開き量および支間中央のたわみと載荷荷重との関係も、解析結果は実験での測定値に比較的良好に整合しており、解析モデルは実験供試体をほぼ良好に再現できたものと判断される。

3-3 考察

今回のFEM解析結果より、破壊時のPC鋼材張力を推定すると表-4のようになる。付着のあるPC鋼材についてみると、設計計算上の仮定値 $0.93 P_u$ と非常によく一致している。また付着の無いPC鋼材の破壊時張力は $0.93 P_u$ の約80%程度に低下するが、各設計基準に示す付着の無い場合の破壊時張力以上の値となる。

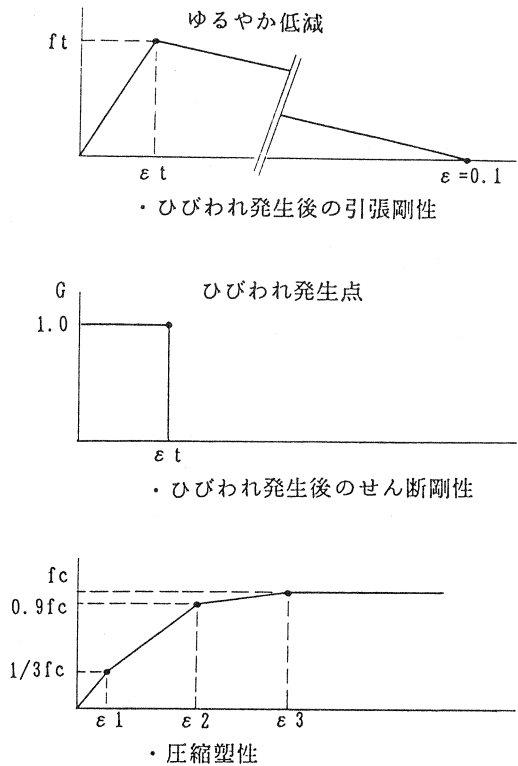


図-7 コンクリートの材料非線形

表-3 破壊荷重の比較

	実験値	$\epsilon_{cu} = 3500 \times 10^{-6}$	
		解析値	比率
基準桁	P=29.2ton	P=28.1ton	0.962
試験桁No.1	P=28.4ton	P=25.7ton	0.905
試験桁No.2	P=22.9ton	P=17.3ton	0.755

外ケーブルの破壊時張力は、鋼材比、固定間距離、初期導入力などにより変動するものであり、あらゆるケースについての断定はできないが、今回の補強工事に近い状態で使用される場合は、各設計基準以上の破壊時張力が期待できるものと考えられる。

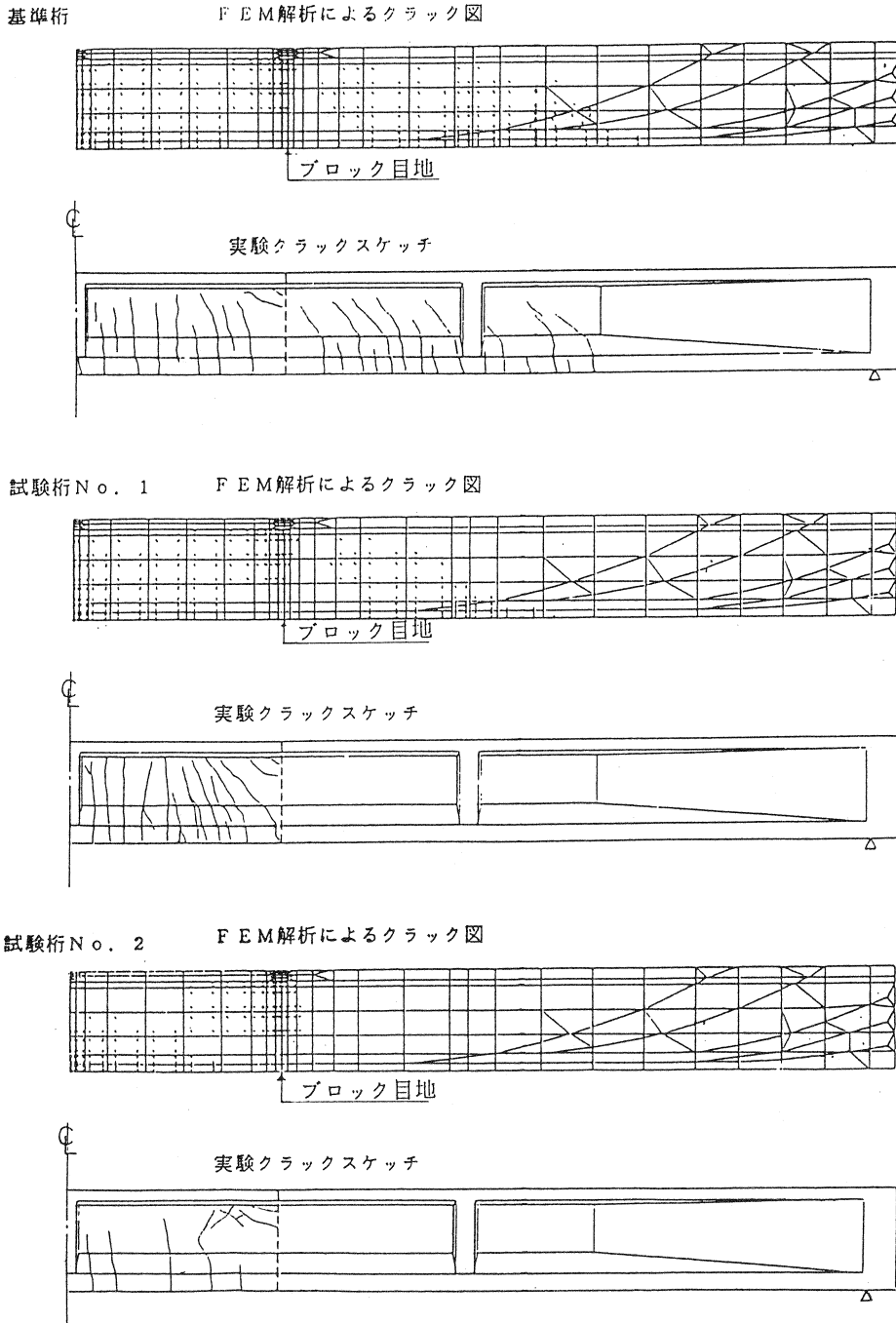


図-8 発生クラック

表-4 P C 鋼材の破壊時張力

a. 付着のあるP C 鋼材

	F E M 解析		Ⓐ0.93Pu
	① ϵ_{cu} =3500×10 ⁻⁶	②実験における破壊荷重	
基準桁 桁内ケーブル SWPR7A1T15.2	22.7ton	23.3ton	24.1ton
試験桁NO.1 桁内ケーブル SWPR7A1T12.4	16.7ton	17.2ton	16.0ton

b. 付着のないP C 鋼材

	F E M 解析		Ⓐ0.93Pu	各設計基準		
	① ϵ_{cu} =3500×10 ⁻⁶	②実験における破壊荷重		ⒷACI	ⒸCP110及び BS5400Part4	Ⓓ日本建築学会
試験桁NO.1 外ケーブル SWPR7B1T12.7	16.6ton	20.1ton	18.6ton	12.8ton	12.4ton	11.5ton
試験桁NO.2 外ケーブル SWPR7B1T12.7	14.7ton	17.5ton	18.6ton	12.5ton	12.4ton	11.5ton
試験桁NO.2 桁内ケーブル SWPR7A1T12.4	12.2ton	15.4ton	16.0ton	9.8ton	9.0ton	9.0ton

4. まとめ

今回の実験および解析の結果から以下のように総括する。

- ・外ケーブル定着用コンクリートブラケットについて

コンクリート標準示方書に定めるせん断伝達耐力の算出式は、コンクリートブラケットの破壊実験とよく一致しており、十分な精度を有しているといえる。ただし使用状態においては、耐久性の面から、荷重と変位が線形関係にある領域内に抑えるのが望ましいものと思われる。

- ・外ケーブルで補強したP C 桁の曲げ破壊耐力について

配置P C 鋼材の総量および使用状態の応力度が同等であっても、P C 鋼材とコンクリートとの付着の無い桁は曲げ破壊耐力が低下し、ひびわれの分散も悪くなる。しかしながら各設計基準に示す付着の無いP C 鋼材の破壊時張力は若干安全側の値であり、実際の破壊時張力はそれ以上と考えられ、曲げ破壊耐力もまた設計値以上のものが期待できると思われる。

なお、今回の実験から解析に至るまで、様々なご指導をいただいたコンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会(岡田清委員長)の藤井学京都大学教授ならびに小林和夫大阪工業大学教授に心から感謝の意を表する。