

外ケーブルによるPC桁の補強効果に関する研究

津野 和男^{*1}・和泉 公比古^{*2}・山田 実^{*3}・森 康晴^{*4}

1. まえがき

近年、コンクリート橋では、交通量の増加や車両の大型化により機能低下や損傷が生じており、これらは経年とともに顕在化する傾向にある。損傷が発見された場合は、個々に発生原因を究明し、種々の検討がなされた後、補修・補強が実施されているが、補修後の耐荷力の確認および経年変化に対する補修効果の保証については十分な追跡調査や解明がなされていないのが現状である。

コンクリート橋の中でも、PC 桁は補強部材の取付け方法等に十分な配慮が必要な構造物である。PC 桁の代表的な補修方法は、樹脂注入による修復をはじめ PC 箱桁での鋼板接着、T 形桁での PC 鋼材による外ケーブルによる補強等である。なかでも、鋼製ブラケットを用いた PC 桁の外ケーブル補強は有効な方法の一つである。

PC 桁の外ケーブル補強は、桁の外側に配置した PC ケーブルにより PC 桁本体に直接プレストレスを導入する方法で、ひびわれを閉じさせるだけでなく、圧縮力を与え耐荷力を増大させる補修工法である。その構造は桁の両側に取り付けられた鋼製ブラケットに PC ケーブルの端部を固定し、そのブラケットは、PC 鋼棒で桁を挟み込むように横締めを行って定着させている。

しかし、この補強の設計方法は確立されたものではなく、特に、終局時の補強効果をどう求めるかが明らかではない。道路橋示方書では、PC 鋼材とコンクリートの付着がない場合の破壊抵抗曲げモーメントを付着がある場合の 70 % とするよう規定している。外ケーブル補強の場合は、付着のある PC ケーブルを用いた既設桁に付着のない外ケーブルを取り付けることから、外ケーブルと内ケーブルが併用されたときの評価が課題であり、損傷の状況に応じて個々の対応がなされているのが現状である。

本研究は、模型実験を実施し、そこで得られた補強効

果を使用して、数値解析により外ケーブル補強した桁の補強後の耐荷力を含む補強効果について検討したものである。

2. 模型実験による PC 桁の補強効果の検討

2.1 実験目的

本実験は、外ケーブル補強された実際の橋をモデルとして模型実験を行い、PC 桁への外ケーブル補強効果を確認し、外ケーブル補強された桁の終局耐力を算出するための基礎資料を得ることを目的とする。

2.2 実験供試体

実験に用いた供試体の形状と寸法を写真-1 および図-1 に示す。供試体は実際の橋梁と相似となるように、破壊抵抗曲げモーメント、桁高と桁幅の比率、ケーブルの緊張力、各荷重段階での桁上下縁応力度、外ケーブルの角度、定着位置等を定めている。また、鋼製ブラケットの縮小率は、スケールで実橋の約 1/2.4 となっている。実験供試体の種類は、表-1 に示す 5 体とした。

2.3 実験方法

基準桁 (A-1) は、桁の下側にひびわれを一度発生させた後除荷し、以後 0.5 tf ピッチでコンクリートが圧壊するまで載荷した。補強桁 (B-1, B-2) は、一度ひびわ

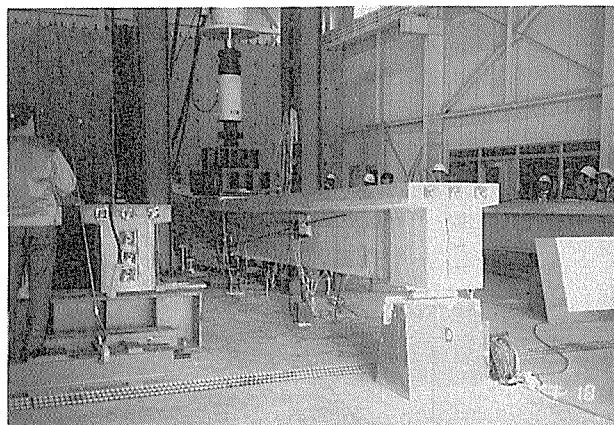


写真-1

*1 Kazuo TSUNO : 住友建設(株)専務取締役

*2 Kimihiko IZUMI : 首都高速道路公団保全施設部保全企画課

*3 Minoru YAMADA : 財首都高速道路技術センター技術部技術第二課

*4 Yasuharu MORI : パシフィックコンサルタンツ(株)構造部健全度調査課

◇研究報告◇

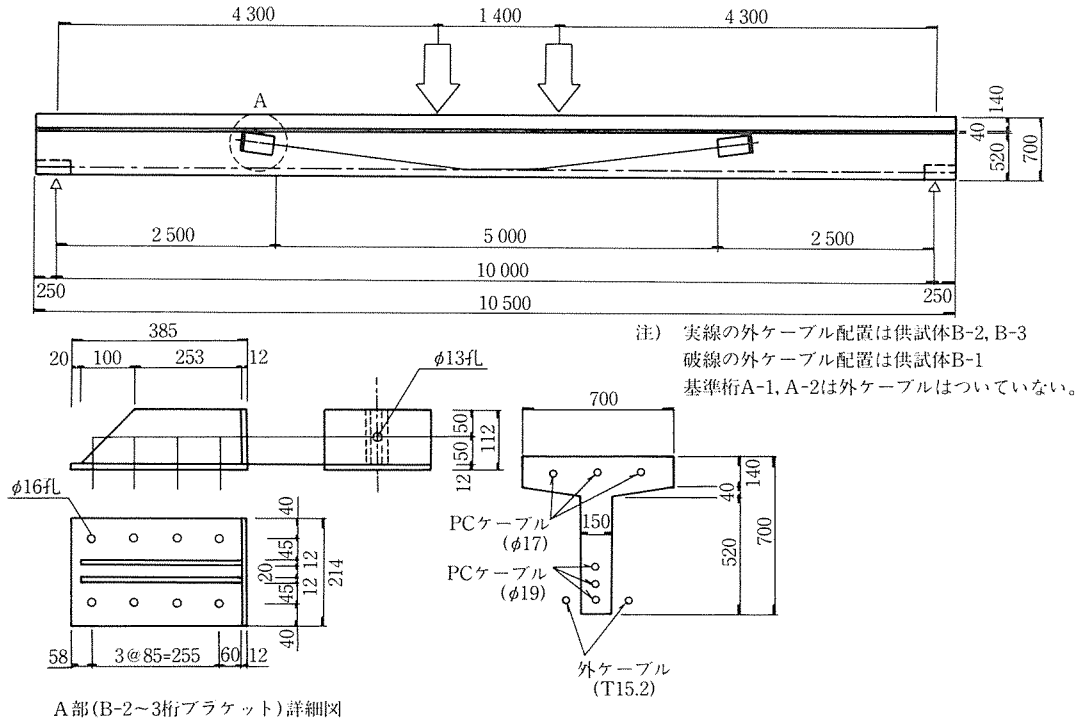


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体の種類

桁名	試験種類	桁種類	外ケーブル配置形
A-1	静的	無補強桁(基準桁)	—
A-2	動的	無補強桁(基準桁)	—
B-1	静的	外ケーブル補強桁	端部・水平
B-2	静的	外ケーブル補強桁	中間・V
B-3	動的	外ケーブル補強桁	中間・V

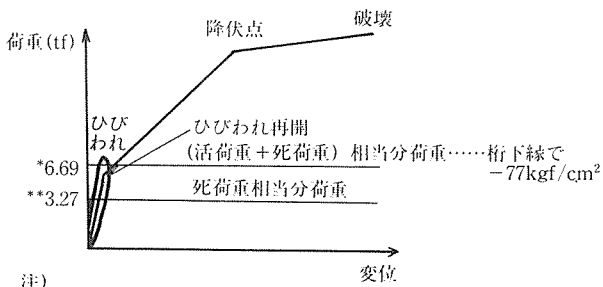


図-2 基準桁(A-1)の荷重と変位の関係

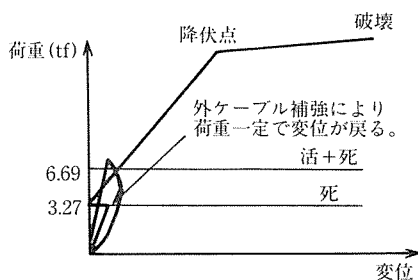


図-3 補強桁(B-1, B-2)の荷重と変位の関係

れを発生させ、除荷した後0.5 tfピッチで3.27 tfまで載荷し、荷重一定のまま外ケーブル補強を行う。その後、コンクリートが圧壊するまで載荷した。基準桁(A-2)は、一度ひびわれを発生させた後除荷し、上限荷重を6.69 tf(死荷重+活荷重相当)、下限荷重を3.27 tf(死荷重相当)として300万回の繰返し載荷の後、静的にコンクリートが圧壊するまで載荷した。補強桁(B-3)は、一度ひびわれを発生させた後除荷し、荷重一定のまま外ケーブル補強を行い、上限荷重を6.69 tf(死荷重+活荷重相当)、下限荷重を3.27 tf(死荷重相当)として300万回の繰返し載荷の後、静的にコンクリートが圧壊するまで載荷した。図-2に基準桁(A-1)、図-3に補強桁(B-1, B-2)の荷重と変位の関係を示す。

2.4 実験結果

(1) 静的試験

実測のひびわれ荷重、ひびわれ再開荷重、破壊荷重と、計算により求めたそれらの値を表-2に示す。ひびわれ荷重は補強前のものであり、計算値のひびわれ再開荷重は桁の下縁が圧縮から引張に変わるときのものである。また、破壊荷重の計算値は、外ケーブルも付着があ

表-2 各供試体のひびわれ荷重、ひびわれ再開荷重、破壊荷重 (単位: tf)

桁名	ひびわれ荷重		ひびわれ再開荷重		破壊荷重	
	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
A-1	15.2	10.6	10.7	10.1	31.9	29.4
B-1	15.7	11.1	20.7	16.1	42.3	42.2
B-2	14.7	10.8	16.7	16.3	42.0	42.1

るとして求めたものである。

A-1 と B-1 の破壊荷重の差が外ケーブルの補強効果を意味し、実測値は桁と外ケーブルの付着がない（以下アンボンドという）場合で、計算値は桁と外ケーブルの付着がある（以下ボンドという）場合である。両者の差は前者が 10.4 tf、後者が 12.8 tf であり、その比率は 81 % となっている。A-1 と B-2 の場合は、実測値の差が 10.1 tf、計算値の差が 12.7 tf であり、その比率は 80 % となっている。供試体の数が 2 体と少ないものの、実験の結果からは、外ケーブル補強の効果はボンドとして計算した場合の 80 % 程度は見込めることがわかった。

ひびわれ荷重においては実測値が計算値を大きく上回っているが、これはコンクリートの引張強度を割裂試験の結果から求めたことによるものと考えられる。ひびわれ再開荷重は B-1 以外は実測値と計算値は良く一致しており、ひびわれが発生した後、荷重を戻して再度載荷した場合、桁の下縁の応力が引張になるとひびわれが再開していることがわかる。これから、ひびわれ発生前までの荷重レベルであれば、外ケーブルを付着があるものとして計算しても問題がないといえる。

図-4 に基準桁 (A-1) と補強桁 (B-1, B-2) の荷重と変位の関係を示す。B-1, B-2 は、破壊荷重において基準桁を大きく上回っているものの、破壊時の変位は基準桁より小さくなっている。また、B-2 は B-1 より破壊時のひびわれの範囲が広がっている分、破壊時の変位は B-2 が B-1 よりやや大きくなっている。

図-5 に B-1、図-6 に B-2 の荷重と外ケーブルのひずみの関係を示す。荷重が大きくなるにつれて外ケーブルのひずみは B-2 のほうが B-1 より大きくなり、B-2 が破壊する前に外ケーブルは降伏しており、B-1 が破壊するときはまだ外ケーブルは降伏していない。これから、破壊荷重は変わらないものの、B-1 の場合は外ケーブルのひずみが桁全長の平均ひずみとなるため、支間中央部に位置し、桁の 1/2 支間長の平均ひずみである B-2 に比べて破壊時の外ケーブルの補強効果に与える影響は小さくなることわかる。

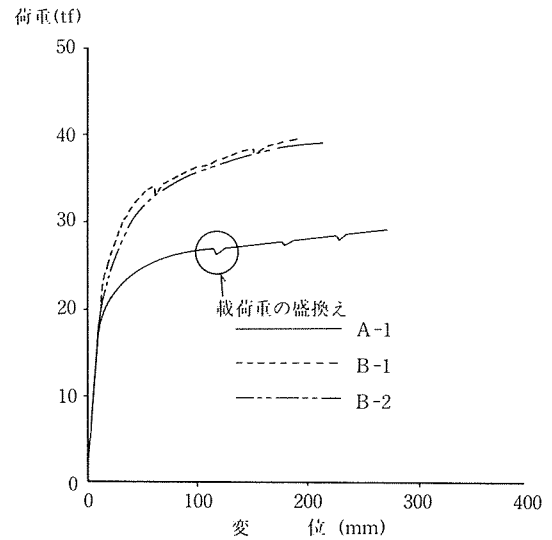


図-4 荷重—変位曲線 (実測値)

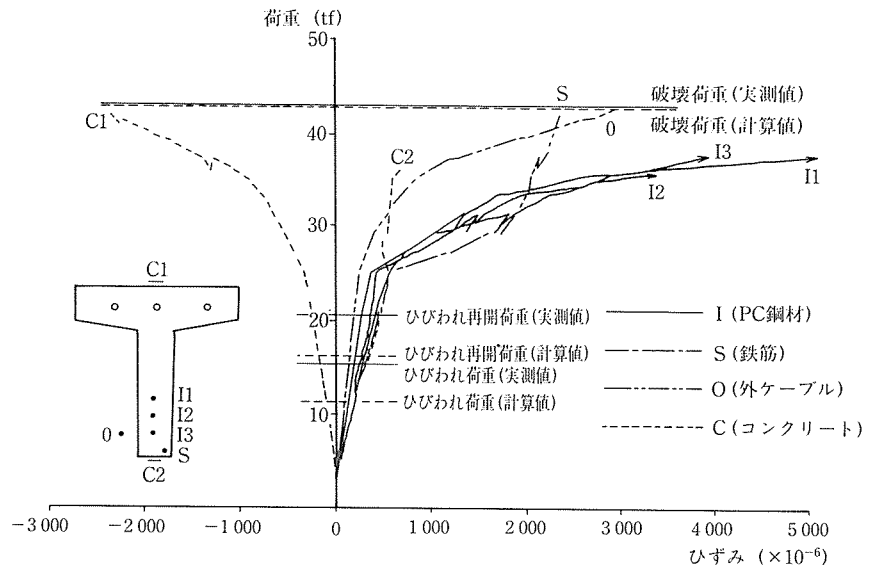


図-5 荷重—ひずみ曲線 (B-1)

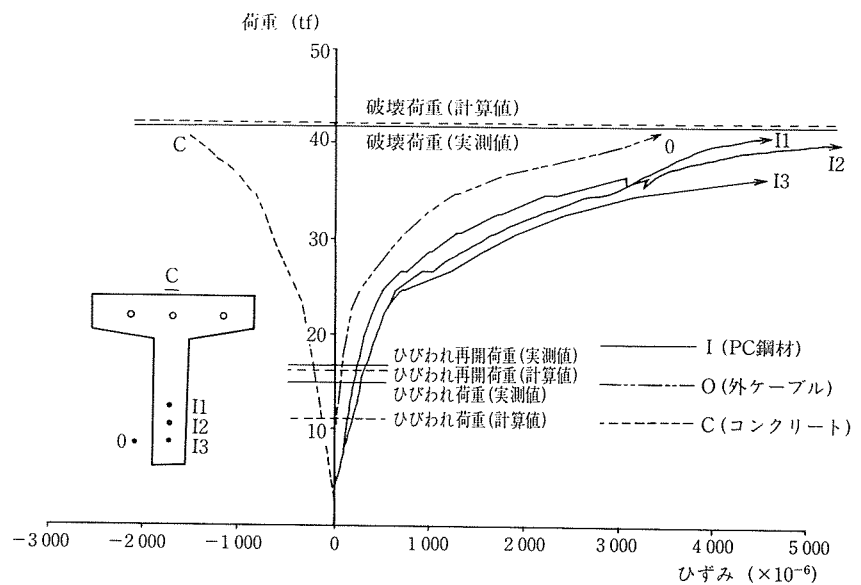


図-6 荷重—ひずみ曲線 (B-2)

◇研究報告◇

(2) 疲労試験

静的試験の基準桁 (A-1) および補強桁 (B-2) と疲労試験の基準桁 (A-2) および補強桁 (B-3) の破壊荷重を表-3 に示す。これから、補強を行った場合は繰返し載荷を行った場合も静的載荷の場合とほとんど変わらないが、補強をしない場合は繰返し載荷によって破壊荷重が 6 %

表-3 各桁の破壊荷重

	破壊荷重 (tf)
A-1	31.9
A-2	29.9
B-2	42.0
B-3	41.7

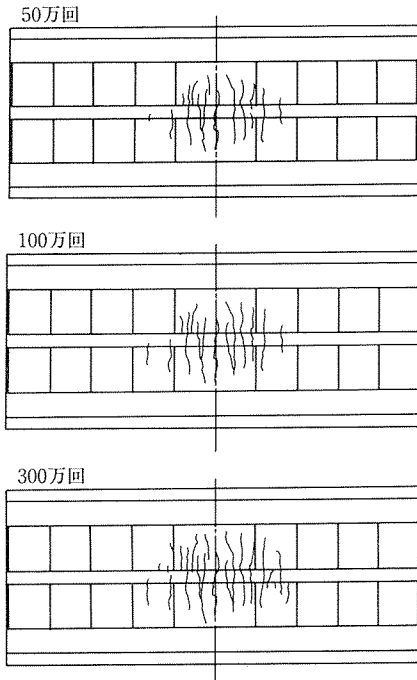


図-7 基準桁 (A-2) ひびわれ進展図

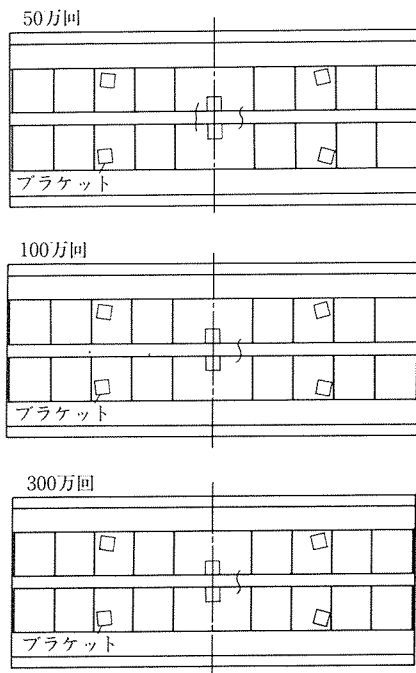


図-8 補強桁 (B-3) ひびわれ進展図

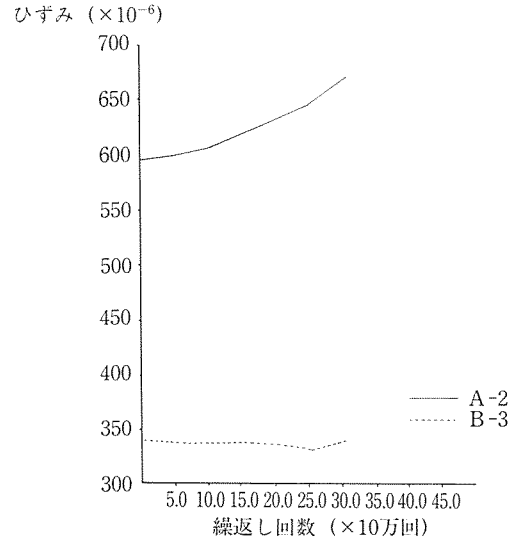


図-9 繰返し載荷による最下段内ケーブルのひずみの進展図

程度低下していることがわかる。

図-7 に基準桁 (A-2), 図-8 に補強桁 (B-3) の繰返し回数別のひびわれ図を示し, 図-9 に桁内部の最下段 PC ケーブルの繰返し回数とひずみの関係を示す。これらから, 補強した場合は, ひびわれや PC ケーブルのひずみはほとんど変化しないが, 補強しない場合は, ひびわれや PC ケーブルのひずみが繰返し回数とともに増加することがわかる。

(3) まとめ

実橋をモデルとした模型実験の結果をまとめると次のようになる。

- ・設計荷重程度までは外ケーブルを付着があるものと見なしても良い。
- ・破壊荷重は外ケーブルを付着があるものと見なした場合の 80 % 程度となる。
- ・外ケーブルで補強した場合は, 300 万回の繰返し載荷によっても破壊荷重の低下やひびわれの進展および内部鋼材のひずみの増加がない。

3. PC 桁外ケーブル補強の数値解析

3.1 解析目的

PC 桁を外ケーブル補強した場合の効果については模型実験で確認できたが, その供試体数が 5 体 (配置形状は 2 種類) に限られており, 補強効果を一定の式で表現するには至らなかったため, これを補う目的で 2 次元弾塑性 FEM 解析による数値解析を行った。

3.2 解析方法

2 次元弾塑性 FEM 解析を適用するに際して, 解析精度に影響を及ぼす材料特性のモデル化, 要素分割, 要素タイプおよび荷重ステップ等を, 模型実験で得られた値と整合するように設定した。

コンクリートの初期ひびわれは、smeared crack モデルを用いて表現した。このモデルは、ひびわれを等価な材料特性に置き換え、間接的に構造物に及ぼす影響を表すものである。初期ひびわれは第一主応力がひびわれ発生強度を上回ると、第一主応力方向と直交する方向に発生する。初期ひびわれの発生したコンクリートは、第一主応力方向の剛性（引張剛性） E およびせん断剛性 G を低減させ、直交異方性弾性体として取り扱う。ひびわれと直角方向の局所座標系 $\xi-\eta$ （図-10 参照）の材料マトリックスは、

$$[D_{Cr}] = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{vmatrix}$$

$$D_{11} = \alpha E / (1 - \nu^2)$$

$$D_{22} = E / (1 - \nu^2)$$

$$D_{12} = \alpha \nu E / (1 - \nu^2)$$

$$D_{33} = \beta E / 2 (1 + \nu)$$

ここに、 E ：弾性係数
 ν ：ポアソン比
 α ：引張剛性の低減係数
 β ：せん断剛性の低減係数

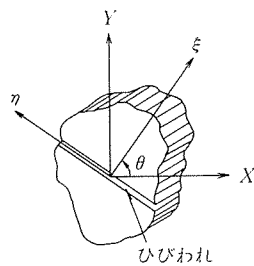


図-10 1方向ひびわれの座標系

である。

次に、材料定数を表-4 に、要素分割図（一例として B-2 供試体）を図-11 に示す。なお、要素タイプは 8 節点要素とし、荷重ステップは 0.2~0.5 tf ピッチとした。

破壊荷重における実験値と FEM 解析値を表-5 に、破壊に至るまでの荷重と変位の関係を図-12~14 に示す。

PC 桁を外ケーブル補強した場合の効果に影響を与え

表-4 実験に使用した材料定数

	規格	降伏強度 (kgf/cm ²)	弾性定数 (kgf/cm ²)	断面積 (cm ²)
鉄筋	D 10	3 790	2.10×10 ⁶	0.7133
PC φ 19	SBPR 95/110	11 152	2.05×10 ⁶	2.986
PC φ 17	SBPR 95/110	10 930	2.04×10 ⁶	2.397
外ケーブル	T 15.2 150/175	17 592	1.97×10 ⁶	1.387
コンクリート	設計基準強度 $\sigma_{ck} = 450 \text{ kgf/cm}^2$			



図-11 要素分割図 (B-2)

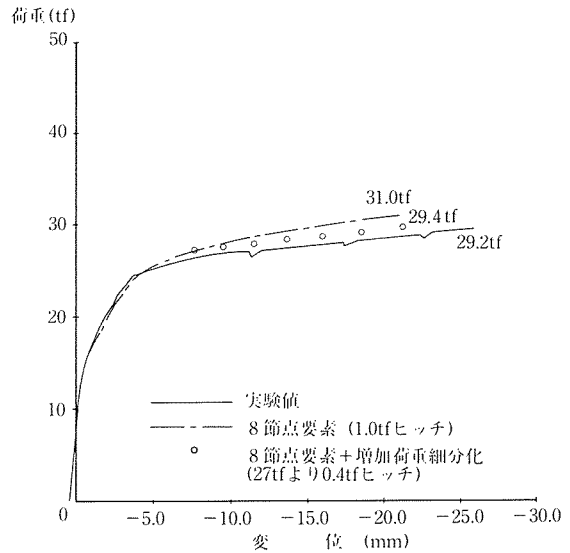


図-12 支間中央における変位 (A-1)

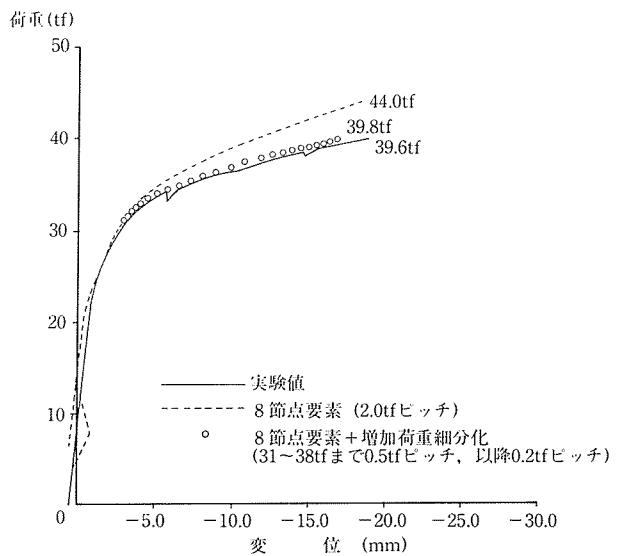


図-13 支間中央における変位 (B-1)

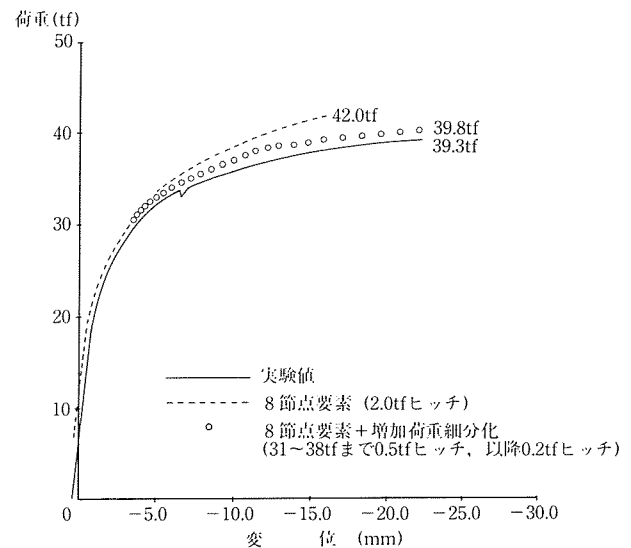
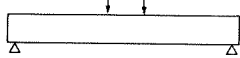




図-14 支間中央における変位 (B-2)

◇研究報告◇

表-5 模型実験と非線形解析の破壊荷重の比較

(単位: tf)

形状図	実験値	FEM解析値	設計値
A-1 基準桁 	29.2	29.4	26.7
B-1 外ケーブル端部・水平 	39.6	39.8	38.2
B-2 外ケーブル1/2 L・V 	39.3	39.8	38.1

ると考えられる要因のうち、外ケーブルに導入される応力度、外ケーブルの断面積、載荷位置、ケーブルの配置および定着位置を変化させてそれらの影響を把握するため、表-6 に示すような 16 ケースの数値解析を行った。

3.3 解析結果

2次元弾塑性 FEM 解析により得られた破壊抵抗曲げモーメント、最下段内ケーブルの応力度、外ケーブルの応力度をそれぞれの計算値とともに表-7 に示す。なお、ACI 318-83 の式を以下に示す。

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_c}{100 \rho_p} \quad (f_{se} \geq 0.5 f_{pu})$$

ただし、 f_{ps} は f_{py} ($f_{se} + 4220$) 以下とする。

ここに、 f_{ps} : 設計強度時における緊張されている鉄筋の応力 (kgf/cm²)

f_{se} : 緊張されている鉄筋の有効応力 (プレ

ストレス損失後) (kgf/cm²)

f_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

ρ_p : 緊張されている鉄筋断面積 (cm²)

A_{ps} : 引張域における緊張されている鉄筋断面積 (cm²)

b : 部材の圧縮面の幅 (cm)

d_p : 圧縮縁から緊張されていない鉄筋の中心までの距離 (cm)

f_{pu} : 緊張鋼材の引張強度 (kgf/cm²)

これから、PC 桁を外ケーブル補強した場合の効果に影響を与えると考えられる主な要因について、明らかとなったことを以下に示す。

① 外ケーブル導入応力度の影響

- ・ケース 3, 4, 5, 6 のように外ケーブルのプレストレス力を一定とした場合、導入応力度が引張強度の 54%, 60%, 70% の場合と 27% の場合では補強の効果が異なり、27% の場合では外ケーブル補強の有効係数を 0.7 とした場合よりも補強の効果が少ないことがわかる。

② 外ケーブルの補強効果

- ・ケース 2 とケース 3 を比べると、断面積が一定であれば、導入応力度が引張強度の 54% の場合と 27% の場合では補強の効果が異なり、27% の場合では外ケーブル補強の有効係数を 0.7 とした場合よりも補強の効果が少ないことがわかる。
- ・外ケーブル補強の有効係数を 0.8 とした場合は、

表-6 数値解析のケース内容

ケース番号	載荷点の位置 (支点からの距離 m)	外ケーブルの配置形状	外ケーブルの断面積 (cm ²)	外ケーブルの導入プレストレス (kgf/cm ²)	外ケーブルの付着状態
1	4.3	外ケーブルなし			
2	4.3	端部・水平	2.774	4790	なし
3	4.3	端部・水平	2.774	9580	なし
4	4.3	端部・水平	5.548	4790	なし
5	4.3	端部・水平	2.497	10555	なし
6	4.3	端部・水平	2.140	12314	なし
7	4.3	端部・水平	2.774	9580	あり
8	4.3	1/4 L・V 形	2.774	9970	なし
9	4.3	1/4 L・V 形	5.548	4985	なし
10	4.3	1/4 L・水平	2.774	9580	なし
11	4.3	1/4 L・水平	5.548	4790	なし
12	2.5	外ケーブルなし			
13	2.5	1/4 L・V 形	2.774	9970	なし
14	2.5	1/4 L・V 形	5.548	4985	なし
15	2.5	1/4 L・水平	2.774	9580	なし
16	2.5	1/4 L・水平	5.548	4790	なし

表-7 外ケーブルによる補強効果

ケース番号	破壊抵抗曲げモーメント (tf・m)					FEMの内ケーブル張力 (kgf/cm ²) 注)	外ケーブルの張力 (kgf/cm ²)	
	すべて外ケーブルとして計算	外の効果を内の0.7として計算	外の効果を内の0.8として計算	ACI 318-83を用いる場合	FEM		FEM	ACI 318-83の式
1	60.9	-	-	-	66.7	11 152 (57.6 tm)	-	-
2	88.9	80.5	83.3	76.7	77.0	11 152 (66.2 tm)	9 690	9 010
3	88.9	80.5	83.3	85.2	83.3	11 152 (72.7 tm)	14 055	13 800
4	116.3	99.7	105.2	92.7	89.9	11 152 (75.9 tm)	9 079	9 010
5	-	-	-	-	83.4	11 152 (78.1 tm)	15 490	-
6	-	-	-	-	82.4	11 152 (78.1 tm)	17 093	-
7	-	-	-	-	89.8	11 152 (78.1 tm)	17 597	-
8	88.6	80.3	83.1	85.7	85.6	11 152 (74.8 tm)	17 153	14 190
9	115.8	99.3	104.8	93.1	89.9	11 152 (81.3 tm)	10 813	9 205
10	88.9	80.5	83.3	85.2	87.7	11 152 (77.0 tm)	16 980	13 800
11	110.3	99.7	105.2	92.7	100.6	11 152 (83.4tm)	12 335	9 010
12	60.9	-	-	-	65.8	11 152 (55.5 tm)	-	-
13	88.6	80.3	83.1	85.7	81.3	11 152 (81.3 tm)	18 732	14 190
14	115.8	99.3	104.8	93.1	85.6	3 801 (85.6 tm)	10 974	9 205
15	88.9	80.5	83.3	85.2	89.9	11 152 (79.1 tm)	17 587	13 800
16	116.3	99.7	105.2	92.7	92.0	7 364 (87.7 tm)	10 112	9 010

注) () 内の値は内ケーブルが降伏したときの抵抗曲げモーメントを示す。

ケース 13 の場合に解析値が計算値を下回っていることから、有効係数は、0.7 と設定したほうが安全であることがわかる。

- ・ケース 1, 3, 7 の解析値から有効係数を求めると 72 % となった。
- ③ 外ケーブルの配置形
 - ・ケース 3 とケース 8, 10 およびケース 13, 15 から、 $1/4 L$ ・水平配置が最も補強効果が大きく、次が $1/4 L$ ・V形配置で、端部水平配置が 3 つの中では最も補強効果が小さい。これは、端部水平配置の場合は外ケーブルの応力が桁全長の平均応力となっていることと、 $1/4 L$ ・V形配置は、荷重載荷点において外ケーブルの桁下縁からの距離が水平配置より大きくなっているためである。
- ④ 荷重載荷点の位置
 - ・ケース 8 とケース 13 を比べると、ケース 13 のほうが補強効果が小さくなっている。これは、同じ $1/4 L$ ・V形配置でも載荷点が支点側に行くほど桁下縁から外ケーブルまでの距離が大きくなっているためである。
 - ・ケース 10 とケース 15 を比べると、ケース 15 のほうが補強効果が大きくなっているが、せん断スパン比が小さくなったことによる影響と考えられる。
- ⑤ AC 1318-83 の式との比較
 - ・ $1/4 L$ ・水平およびV形配置のような桁の途中で

定着しているものは、外ケーブルの応力度は解析値と ACI 318-83 の式による計算値は一致しないが、端部水平のような桁端部に定着がある場合は、解析値と計算値が近似式としては良く一致している。

- ・外ケーブルの導入応力度が引張強度の 27 % の場合では、 $1/4 L$ ・水平およびV形配置に対しても同様に良く一致している。

4. 模型実験と数値解析における補強効果のまとめ

4.1 外ケーブル補強の耐疲労性

模型実験により、ひびわれを生じた PC 桁に外ケーブル補強を施工した場合、300 万回の設計活荷重の繰返しに対しても、たわみ、ひずみ、ひびわれの増加は認められなく、外ケーブル補強の耐疲労性があることが確認できた。また、ひびわれのある PC 桁をそのままの状態でも 300 万回の設計活荷重の繰返しを行った場合、内部鋼材のひずみや桁のたわみが増加すること、破壊荷重が低下することがわかり、損傷のある PC 桁の補修の必要性が確認できた。

4.2 外ケーブルの補強効果

2 体の模型実験では、外ケーブルの補強効果は、桁と外ケーブルを付着があるものとして計算した場合の 80 % を考慮できることとなり、数値解析の結果もほぼ同様の結果となったが、 $1/4 L$ ・V形配置の場合で荷重載

◇研究報告◇

荷点が定着位置付近まで支点側へ近づくと、80%を下回ることもあることがわかった。したがって、設計上は外ケーブルの補強効果（有効係数）を70%程度としておいたほうが安全であるといえる。

模型実験で不足する部分を、数値解析で補うことができたが、今回の解析方法がすべての構造系に適用できるということではなく、特に次のような場合には注意する必要があることを付記しておく。

- ・せん断破壊が卓越する領域の構造系を対象とする場合。
- ・連続梁形式の構造系を対象とする場合。

5. あとがき

模型実験と数値解析の結果から、ひびわれを生じた既設のPC桁を外ケーブル補強する場合の効果を有効係数という形で把握することができ、外ケーブルの補強が疲労にも有効であることが確認できた。また、別途行った

鋼製ブラケットの模型実験および数値解析により、定着部の抵抗機構、耐疲労性が確認されている。さらに今後は、桁と鋼製ブラケット間の間詰め材のクリープが横締め鋼棒の応力緩和に与える影響を実験的に確認することが課題である。

最後に、模型実験および数値解析を行うにあたりご指導ご協力頂いた、プレストレスト・コンクリート構造物の補修方法に関する調査研究委員会の委員、幹事の各位に対して感謝の意を表明する次第である。

参 考 文 献

- 1) 財首都高速道路技術センター「プレストレスト・コンクリート構造物の補修方法に関する調査研究報告書」、1989.3
- 2) 財首都高速道路技術センター「プレストレスト・コンクリート構造物の補修方法に関する調査研究報告書(その2)」, 1990.3

【1991年7月1日受付】

◀刊行物案内▶

PC 斜 張 橋

(本誌第29巻第1号特集号)

現在、世界的にも、また我が国でも有力な橋梁施工法として台頭し初めたPC斜張橋を特集した本書は、その歴史、変遷から始まって、将来展望に関する座談会、斜張ケーブルの現状、既に実施された、または計画中的の代表的な斜張橋（白屋橋、東名足柄橋、猪名川第2橋梁、衝原大橋、呼子大橋、新丹波大橋）の報告等、多岐にわたり収録してあります。PC橋梁の設計・施工関係技術者にとっては必携の参考書と確信します。

体 裁：B5判108頁

定 価：1500円（送料：150円）