

(53) 外ケーブルを用いたコンクリートはりの補強設計法の一提案

埼玉大学大学院 新津正義  
 埼玉大学 工学部 正会員 睦好宏史  
 埼玉大学大学院 Aravinthan T.  
 ショーボンド建設(株) 曳村俊貴

1.はじめに

近年、経年変化によるコンクリート橋梁の耐久性の低下、あるいは道路構造令の改正による設計荷重の増大により多くの橋梁に補修あるいは補強が必要とされている。補強工法の中でも最近、外ケーブルを用いた工法が注目を浴びている。しかしながら、補強に必要な外ケーブル量あるいは外ケーブルにより補強したはりの曲げ耐力を簡易に求める方法はいまだに確立されていない。これは、外ケーブル式PCにおいては、終局時における緊張材の応力増加量およびその位置変化に関しボンド式PCと同様の扱いができないためである。

本研究は、最近提案された簡易な外ケーブル式PCはりの曲げ耐力算定式を用いて、既設コンクリート橋梁を外ケーブルで補強した場合の補強程度と曲げ耐力の関係を実設計に供することを目的として明らかにしたものである。

2.外ケーブル式PCはりの曲げ耐力算定

2.1.算定式

外ケーブル式PCは任意断面において平面保持の仮定が成り立たないため、終局時の緊張材応力増加量がボンド式PCに比べ小さくなることがよく知られている。また部材の変形に伴いケーブル偏心量が変化する。著者らはこれらの影響を考慮した外ケーブル式PCはり部材の曲げ耐力算定式を提案した<sup>2)</sup>。ここでは提案式を外ケーブルにより補強されたコンクリートはりに適用した。はりの曲げ耐力は終局時の緊張材応力とケーブル偏心量が求まれば通常の曲げ理論より容易に求められる。一般に、終局時の緊張材応力は有効プレストレスと応力増加量から次のように示される。

$$f_{ps,e} = f_{pe,e} + \Delta f_{ps,e} \dots \dots (1)$$

ここに、 $f_{ps,e}$  : 終局時外ケーブル緊張材応力(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $f_{pe,e}$  : 有効プレストレスによる応力(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\Delta f_{ps,e}$  : 終局時外ケーブル緊張材応力増分量(kgf/cm<sup>2</sup>)。今回用いた算定式では終局時の緊張材応力を以下のような式を用いて求めている。

$$f_{ps,e} = f_{pe,e} + E_{ps,e} \Omega_u \epsilon_{cu} \left( \frac{d_{pu,e}}{c} - 1 \right) \dots \dots (2)$$

ここに、 $E_{ps,e}$  : 外ケーブルのヤング係数(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $c$  : 中立軸(cm)、 $\epsilon_{cu}$  : コンクリートの終局ひずみ、 $\Omega_u$  : ひずみ低減係数  $d_{pu,e}$  : 終局時有効高さ(ケーブル偏心量)(cm)。

なお、ひずみ低減係数、終局時有効高さは以下の式で与えられる。

$$\Omega_u = \frac{2.31}{(L/d_{ps,e})} + 0.21 \times \left( \frac{A_{ps,i}}{A_{ps,t}} \right) + 0.06 \dots \dots (3)$$

$$d_{pu,e} = R_d \cdot d_{ps,e} \dots \dots (4)$$

ここに、 $L$  : スパン長(cm)、 $d_{ps,e}$  : 外ケーブル有効高さ(cm)、 $A_{ps,i}$  : 内ケーブルの総断面積(cm<sup>2</sup>)、 $A_{ps,t}$  : 緊張材総断面積(cm<sup>2</sup>)、 $R_d$  : 有効高さ低減係数。

有効高さ低減係数は次のように与えられる

$$R_d = 1.25 - 0.010 \times \left( \frac{L}{d_{ps,e}} \right) - 0.38 \times \left( \frac{S_d}{L} \right) \dots \dots (5)$$

ここに、 $S_d$  : デビエーター間隔(cm)、 $L$  : 支間長(cm)。

以上のような算定式を用いて終局時の緊張材応力と有効高さを求め、通常の曲げ理論から外ケーブル式PCはりの曲げ終局耐力は容易に算定することができる。本算定式はこれまでに提案されている設計式の中で最も精度が良いことが示されている<sup>2)</sup>。

2.2.外ケーブルにより補強したはりの曲げ耐力

上で述べた曲げ耐力算定式を用いて、外ケーブルで補強したコンクリートはりの曲げ耐力を

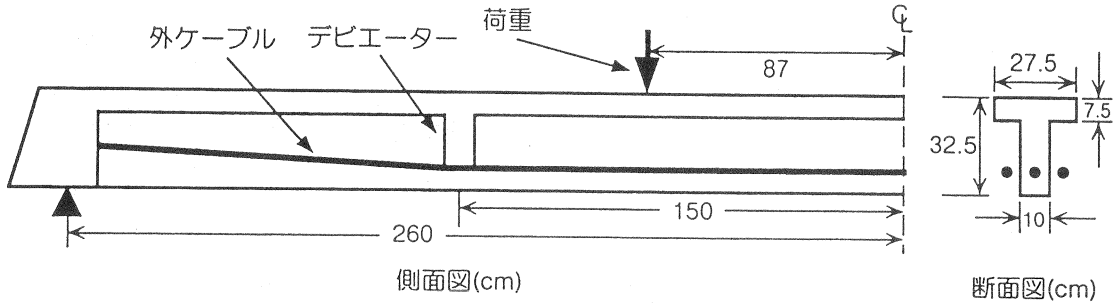


図-1 計算に用いたコンクリートはり

計算した。なお、曲げ耐力算定式を適用するに当たり以下の仮定を用いた。

- ①終局時には内ケーブル、軸方向鉄筋ともに降伏するものとする。
- ②導入プレストレスは緊張材の規格降伏強度の60%とする。(表-1)
- ③コンクリートの終局ひずみは0.0035とする。

計算に用いたコンクリートはりの断面を図-1に、材料特性を表-1に示す。図に示すように、はりはT形ポストテンションPCはりで、補強後は内外ケーブルを併用した構造となる。偏向部は2ヶ所に設置されており、載荷は2点で行われている。計算要因は外ケーブル量およびケーブル位置とした

### 3. 外ケーブルにより補強したはりの曲げ耐力

表-2は外ケーブルによる補強量とケーブル位置を変化させた場合、上で述べた算定式を用いて求めた、終局時外ケーブル応力、曲げ耐力および曲げ耐力の増加率(λ=補強後曲げ耐力/無補強曲げ耐力)をそれぞれ示したものである。ここに、外ケーブル補強係数は以下の式によって表される。

$$\text{外ケーブル補強係数} = \frac{\rho_{ps.e} f_{ps.e}}{f_c'} \dots (6)$$

ここに、 $\rho_{ps.e} = \frac{A_{ps.e}}{bd_{ps.e}}$ 、 $f_c'$ : コンクリート強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $A_{ps.e}$ : 外ケーブル面積(cm<sup>2</sup>)、 $b$ : 断面幅(cm)。

図-2は補強位置を変化させた場合において外ケーブル補強係数と耐力増加率λの関係を示したものである。終局時には、外ケーブルの偏心量が変化し、これが耐力に影響を及ぼすが、図に示されている計算要因の範囲内においては、耐力増加率は外ケーブル補強係数に比例して大きくなっている。

表-1 材料特性

	内ケーブル	外ケーブル
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.9×10 <sup>6</sup>	1.9×10 <sup>6</sup>
降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.5×10 <sup>4</sup>	1.5×10 <sup>4</sup>
面積 (cm <sup>2</sup> )	0.929	外ケーブル比率ごとに変化

※コンクリート圧縮強度として  $f_c' = 350 \text{ kgf/cm}^2$  を用いた。

表-2 計算結果一覧

補強位置 $d_{ps.e}/h$	外ケーブル補強係数	終局時外ケーブル緊張材応力 $f_{ps.e}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	終局曲げ耐力 (tf)	終局曲げ耐力増加率
0.75	0.000	降伏	3.47	1.0
	0.004	降伏	3.78	1.1
	0.009	降伏	4.16	1.2
	0.015	降伏	4.65	1.3
	0.024	降伏	5.31	1.5
	0.036	降伏	6.23	1.8
	0.053	13881	7.30	2.1
1.00	0.083	12366	8.78	2.5
	0.000	降伏	3.47	1.0
	0.003	降伏	3.91	1.1
	0.007	降伏	4.45	1.3
	0.011	降伏	5.15	1.5
	0.018	降伏	6.08	1.8
	0.027	降伏	7.39	2.1
	0.040	降伏	9.34	2.7
1.25	0.062	14474	12.31	3.5
	0.000	降伏	3.47	1.0
	0.002	降伏	4.03	1.2
	0.005	降伏	4.74	1.4
	0.009	降伏	5.64	1.6
	0.014	降伏	6.85	2.0
	0.021	降伏	8.55	2.5
	0.032	降伏	11.08	3.2
	0.050	降伏	15.31	4.4

#### 4. 外ケーブルによる補強設計法

##### 4.1. 応力の制限値について

外ケーブルによる補強を行う際に、導入プレストレスによってひび割れ発生などの、部材の使用性を損なうような問題が生じてはならない。また、コンクリートに生じる圧縮応力度の制限値に対しても考慮する必要がある。ここでは外ケーブルによって導入されるプレストレスによって生じるコンクリートの引張応力が引張強度以下となること。また、圧縮応力が圧縮強度の40%以下となるような制限値を設けた<sup>3)</sup>。すなわち、外ケーブル補強量の限界はそれによる応力度が以上のような制限値を越えないように定められる。

##### 4.2. 補強設計法の一提案

以上述べたことに基づいて、外ケーブルによりコンクリートはりを補強する場合の簡易な設計の考え方の一手法を示すことにする。なお、既設コンクリート橋梁のモデルは図-1に示すものである。いま、既設コンクリート橋梁に耐力低下が生じていると判断されたとする。この場合、残存耐力は設計時の曲げ耐力を100%として80,60,40%であると仮定する。また、耐力低下は認められないものの設計時の耐力をさらに増大させることが必要な場合も考えられる。このことから残存耐力を40,60,80,100%とした場合について補強する場合を考えてみる。

表-3は、4.1.で述べたように、応力が制限値に達する時の計算結果を示したものである。すなわち外ケーブル補強係数、曲げ耐力（あるいは、耐力増加率 $\lambda$ ）の制限値を示しており、これらを越えて補強することはできない。ここではこれを補強限界と呼ぶことにする。耐力の増加率を見ても、外ケーブルの位置がはり高内にある方が効率よく補強できることを示している。図-3は外ケーブルの補強位置を変化させた場合における、外ケーブル補強係数と耐力増加率の関係を示したものである。図には4.1.で述べた応力の制限値による補強限界も示している。図から、既設コンクリート橋梁の耐力低下度が分かった場合に、補強によって期待する耐力の増加率とこれに相当する外ケーブル量が図から判読でき、簡略的に補強設計を行うことが可能である。

##### 4. まとめ

既往の外ケーブル曲げ終局耐力の算定式から外ケーブルを用いて補強を行ったはりの曲げ耐力を算定し、図表化した。またこれらを用いて簡略的に

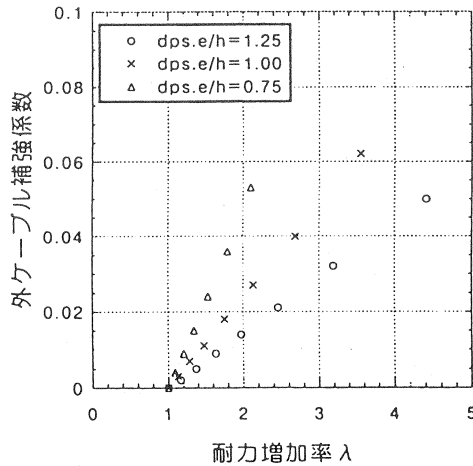
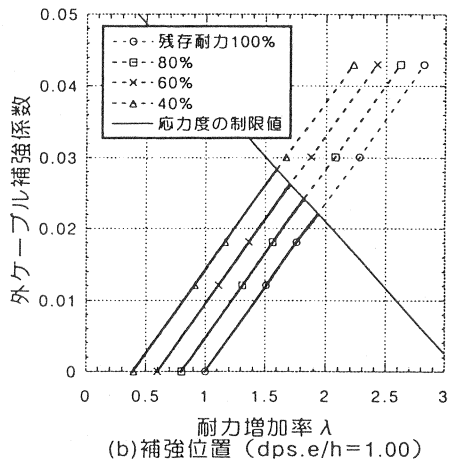
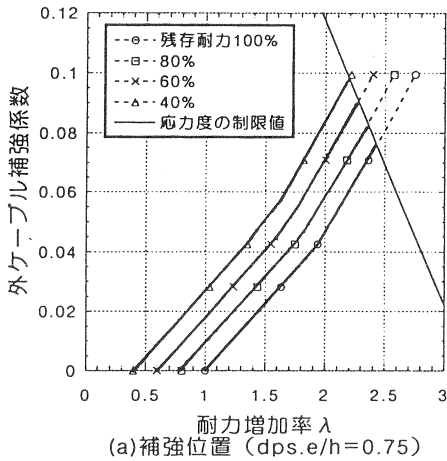


図-2 各補強位置における補強量と耐力増加量との関係

表-3 補強限界計算結果一覧

補強位置 (dps.e/h)	残存耐力 (%)	終局時緊張材応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	外ケーブル補強係数	終局耐力 (tf)	耐力増加率
0.75	100	12653	0.076	8.43	2.43
	80	12524	0.083	8.16	2.35
	60	12385	0.091	7.98	2.28
	40	12254	0.098	7.62	2.19
1.00	100	降伏	0.022	6.72	1.94
	80	降伏	0.024	6.33	1.82
	60	降伏	0.026	5.94	1.71
	40	降伏	0.028	5.55	1.60
1.25	100	降伏	0.010	6.00	1.73
	80	降伏	0.016	5.55	1.60
	60	降伏	0.013	5.09	1.47
	40	降伏	0.014	4.63	1.33



補強設計をする一手法を示した。以下に本研究から得られたことを述べる。

- ① 本研究で提案した、外ケーブル補強係数と耐力増加率λの関係をを用いれば、既設コンクリート橋梁を外ケーブルにより補強した場合、補強後に期待する曲げ耐力と、これに必要な外ケーブル量が簡易に求められる。
- ② 外ケーブルの位置(偏心量)によって、外ケーブル量、補強程度および応力の制限値による補強限界がかなり異なるため最適な補強設計を行うことが必要である
- ③ このような設計図表をより効果的に利用するためには既設橋梁の残存耐力を精度良く評価する方法の確立が今後必要である。

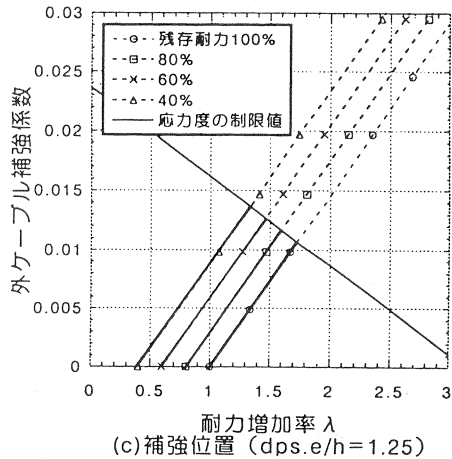


図-3 外ケーブル補強係数と耐力増加率の関係

参考文献

- 1) A.E.Naaman and F.M. Alkhairi : Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons:Part2 Proposed Methodology ACI Structural Journal Vol.88 No.6(1991.11) pp.683~pp.673
- 2) Aravinthan T.,H.Mutsuyoshi ,A.Fujioka and Y.Hishiki : Prediction of the Ultimate Flexural Strength of Externally Prestressed PC Beams JCI(1997.6) pp.1233~pp.1239
- 3) コンクリート標準示方書(設計編) 土木学会 平成8年度
- 4) 宮本雅文,原田哲夫,徳光卓,浜田直明: ノモグラムを用いた外ケーブルによる補強設計法 プレストレストコンクリート技術協会 5回シンポジウム論文集(1995.10) pp.327~pp.332