

(109) 大偏心外ケーブルPC橋の新構造形式に関する解析的研究

住友建設(株) 技術研究所 正会員 ○梅津 健司
 同 上 正会員 藤田 学
 同 上 正会員 大館 武彦
 日本大学 理工学部 正会員 山崎 淳

1. はじめに

エクストラードズド橋を含めて大偏心外ケーブル方式PC橋の特長として、桁橋に比べて、PCケーブルの偏心が大きいくにより桁高を低くできること、それにより桁重量の軽減が図れること、また斜張橋と比べた場合には、斜張ケーブルに関して活荷重による応力変動が斜張橋より低いことにより、疲労を考慮した応力制限値が斜張橋より高く設定できること等が挙げられる。またエクストラードズド橋の主塔があまり高くない特徴が、景観性や環境条件を考慮して橋梁種を選定する際に有利になることもある。

このように大偏心外ケーブル方式の有利性について明確に示されつつあるものの、その構造特性に関しては未解明な点も多い。筆者らはかつて大偏心外ケーブルPC連続はりの基礎的特性を把握することを目的として、室内試験体による載荷実験と非線形解析による研究を行い、その構造が十分な曲げ耐力を有していること及び経済性に優れていることを確認した。¹⁾ そこで本研究では、実橋規模の支間を有するPC橋のモデルを対象に、PCケーブルの配置量及び偏心量が供用荷重時と終局荷重時における主桁の性能に及ぼす影響を求めるために、パラメーター解析を実施した。その結果について以下に報告する。

2. 検討モデル

従来のエクストラードズド橋は、中間支点上に偏向塔を建て、PCケーブルの偏心を大きくすることにより、主桁に生じる負の曲げモーメントに効率的に対処する構造である。一方、正の曲げモーメントに効率的に対処する構造として、支間の下側にストラットを配置し、ケーブル偏心を大きくした張弦梁構造がある。このように支点上側と支間下側の偏心外ケーブルは、主桁曲げモーメントを効率良く打ち消すという意味において、同様の効果を有す。本研究で設定した検討モデルを図-1に示すが、支点及び支間においてケーブルを共に桁高外の配置とし、エクストラードズド橋と張弦梁の両者の構造を採り入れた形式を大偏心ケーブルモデルとした。検討モデルは支間75m及び125mの3径間連続の等桁高箱桁橋とした。

構成部材の材料を表-1に示す。

表-1 使用材料 (N/mm²)

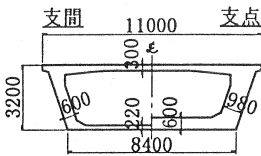
コンクリート	設計基準強度	40
PC鋼材	PC鋼より線 12S15.2 SWPR7B	引張強度 1860
鉄筋	SD345	引張強度 345

モデルの設定条件を以下に示す。

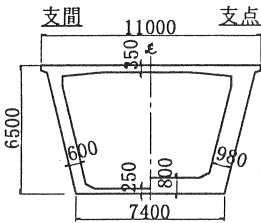
- ①主方向に配置されているPC鋼材は全て外ケーブルとした。ケーブルの有効引張応力度は引張強度の50%とした。
- ②主桁には最小鋼材量0.15%を満足すべく、主桁断面積の0.17~0.25%の量の鉄筋を配置した。
- ③"1.0Apモデル"は、ケーブルを内ケーブルのように部材内に配置した従来モデルである。ただし解析では、外ケーブルのように付着なしのケーブルとして扱った。
- ④"0.76Ap"等の各モデルの名称は、中間支断面における外ケーブルの合計断面積Apに着目し、従来モデル(1.0Ap)のApに対する各モデルのApの比を示したものである。
- ⑤支間75mの0.22~0.96Apモデル、支間125mの0.40Ap~1.0Ap'では、ケーブルをコンコーダント配置とした。
- ⑥支間下側に設けたストラットは、ケーブル偏向内角を2等分する方向に設置した。これはケーブル張力の分力を支持するストラットを、軸力卓越の部材とするためである。大偏心モデルでは、外ケーブルは配置区間の両端で主桁に定着し、偏向塔またはストラットにおけるデビエータでは、外ケーブルは可動とした。

⑥本モデルのケーブル量は、供用荷重時曲げ応力度が許容値を満足する分を配置した。主要断面におけるケーブル偏心量は、引張縁のプレストレスが全モデルで等しくなるよう設定した。供用荷重時における引張縁合成応力度を表-2に示す。各モデルの主要断面における外ケーブルの合計断面積と偏心量の関係を図-2に示す。

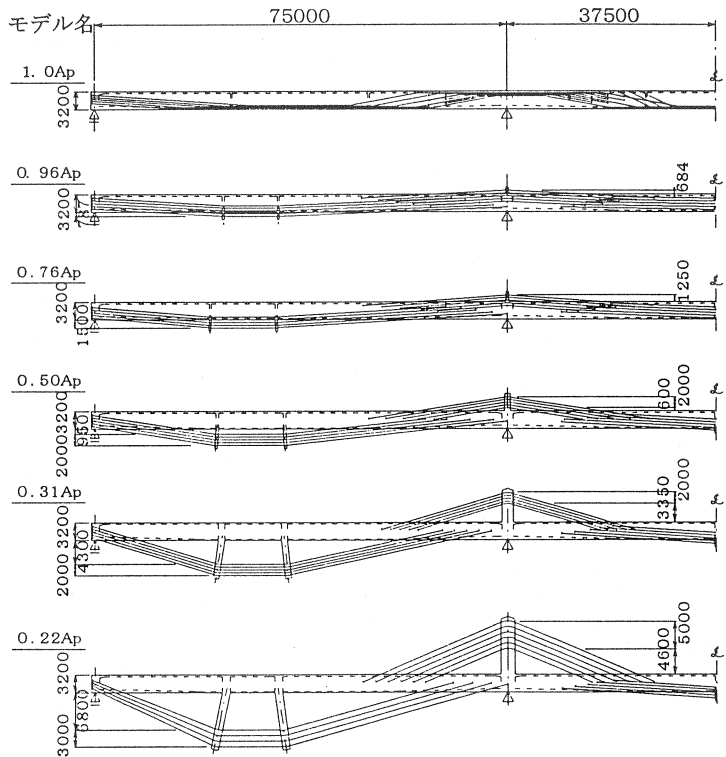
支間75mモデル



支間125mモデル



支間75mモデル



支間125mモデル

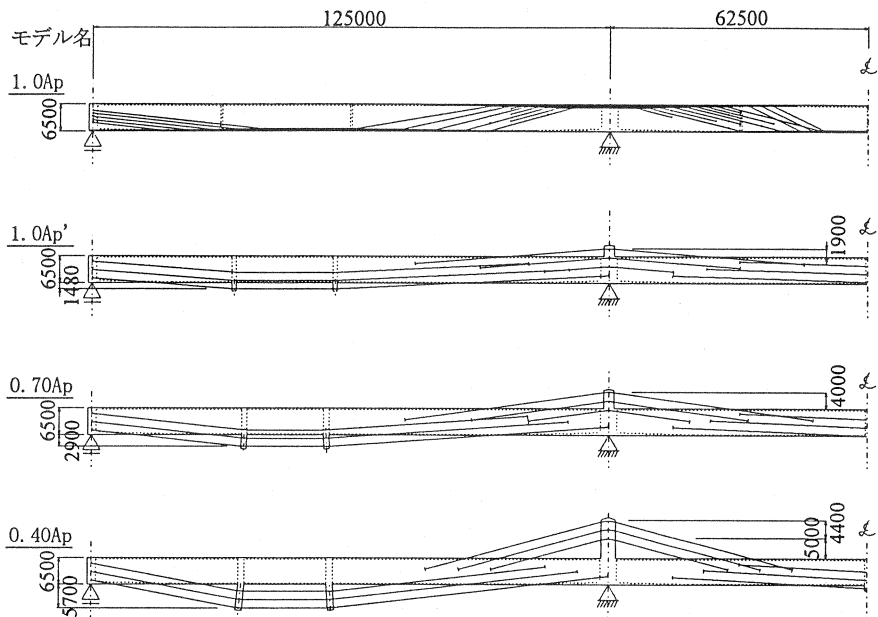


図-1 検討モデルの構造図

3. 線形解析

3.1 供用荷重時における活荷重による応力振幅

線形解析により求めたB活荷重により生じるケーブルの応力変動を表-3に示す。これより応力変動は、ケーブル配置量が少ないモデルほど大きい。またどのモデルも支点ケーブルより支間ケーブルの方が大きいことが分かる。ちなみにケーブル引張応力度の供用荷重時許容値を引張強度の60%を採用しているエクストラード橋である小田原ブルーウェイブリッジや衝原橋では、活荷重による応力変動は 37N/mm^2 である。²⁾ 活荷重による応力変動の大きなケーブルでは、偏向部のフレッチングも含めた疲労に対する安全性を配慮して設計することが必要と思われる。³⁾

3.2 終局荷重時

従来モデル(1.0Ap)の終局荷重時の曲げ破壊安全度を表-4に示す。このように、PCケーブルを付着有の内ケーブルとみなして算定した場合には、安全度は1.25~1.33であるが、外ケーブルとして張力増加を見込まない方法で算定した場合には安全度が0.71~0.80となり不足する。

表-4 終局荷重時における曲げ破壊安全度 ($\times 10^3\text{kN}\cdot\text{m}$)

支間	モデル	検討断面	*1 付着有鋼材と仮定		*2 付着無鋼材と仮定		
			作用モーメント Md	抵抗モーメント Mu	安全度 Mu/Md	抵抗モーメント Mu	安全度 Mu/Md
75	1.0Ap	側径間Mmax.	245	318	1.30	175	0.71
		中間支点	289	385	1.33	229	0.79
125	1.0Ap	側径間Mmax.	880	1101	1.25	682	0.78
		中間支点	1085	1415	1.30	863	0.80

*1) $Md = 1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重} + \text{衝撃}) + \text{プレストレス不静定力}$

*2) 部材の変形に伴うPC鋼材の張力増加を見込まない方法により算定。

4. 非線形解析

4.1 解析条件

終局荷重時の解析には、材料非線形を考慮したファイバーモデルプログラム"Say-NAP"⁴⁾を用いた。入力に用いた材料の応力度-ひずみ関係は、土木学会コンクリート標準示方書に従った。コンクリートの引張強度は0とした。

解析は、死荷重D(=自重+橋面荷重)と図-3に示す載荷形態のB活荷重L及び衝撃Iを静的に漸増させた解析を行い、供用荷重時から材料の終局に至るまでを追跡した。荷重の漸増ケースは、道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編に示されている終局荷重時の荷重組合せを参考にして次とした。

荷重の漸増ケース1) $\gamma \times (D + L + I)$

" ケース2) $1.3 \times D + \gamma \times (L + I)$

ここに、 γ : 荷重漸増係数 (≥ 1.0)

このように荷重を漸増させていき、主桁のいずれかの断面において、コンクリート圧縮縁が終局ひずみ(=0.0035)に達した時点曲げ破壊として、計算を停止した。

表-2 供用荷重時における主桁断面の合成曲げ応力度 (N/mm^2)

モデル		側径間Mmax. 断面		中間支点断面	
		上縁	下縁	上縁	下縁
支間 75 m	1.0Ap	12.0	-1.1	0.4	11.5
	0.96Ap	11.2	-1.0	0.1	11.7
	0.76Ap	9.0	-1.0	0.0	9.3
	0.50Ap	6.3	-0.9	0.0	6.3
	0.31Ap	4.1	-1.4	0.0	4.0
支間 125 m	0.22Ap	3.6	-1.4	0.0	3.5
	1.0Ap	13.9	0.0	0.1	12.9
	1.0Ap'	14.5	-1.0	0.0	13.0
	0.70Ap	11.4	-1.0	0.0	9.0
	0.40Ap	8.0	-0.9	0.0	5.0

許容応力度 支間: $-1.5 < \sigma < 14 \text{ N/mm}^2$

支点: $0 < \sigma < 14 \text{ N/mm}^2$

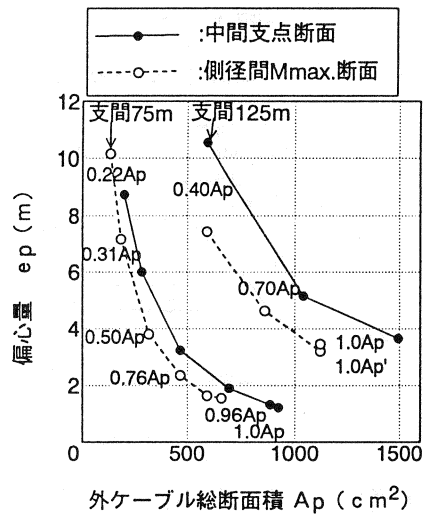


図-2 各モデルの主要断面における外ケーブルの総断面積と偏心量の関係

表-3 活荷重による外ケーブルの応力変動 (N/mm^2)

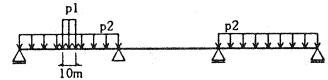
モデル	支点ケーブル	支間ケーブル	
支間 75 m	1.0Ap	7	20
	0.96Ap	5	17
	0.76Ap	6	21
	0.50Ap	11	28
	0.31Ap	14	43
支間 125 m	0.22Ap	20	54
	1.0Ap	6	14
	1.0Ap'	4	12
	0.70Ap	5	14
	0.40Ap	9	19

4. 2 解析結果

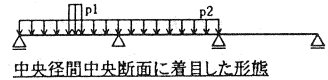
(1) 主桁たわみと曲げ耐力

図-4に支間75m 0.50Apモデル、支間125m 0.40Apモデルの側径間Mmax.断面に着目した活荷重載荷形態のケースによる、破壊時の主桁たわみ分布、曲げモーメント分布を示す。このケースに限らず全モデルのいずれの載荷ケースでも、破壊した断面は中間支点断面であった。これは支点ケーブルが支間ケーブルより張力増加が少ないために、支点断面の曲げ耐力が向上しなかったことが原因と推察される。また本モデルではモーメント再分配があまり生じず、曲げモーメントの線形解と非線形解の差は少なかった。

側径間Mmax.断面に着目した形態



中間支点断面に着目した形態



中央径間中央断面に着目した形態

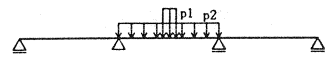
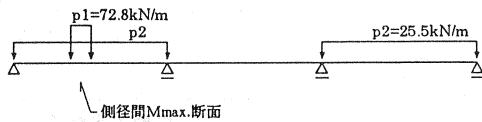
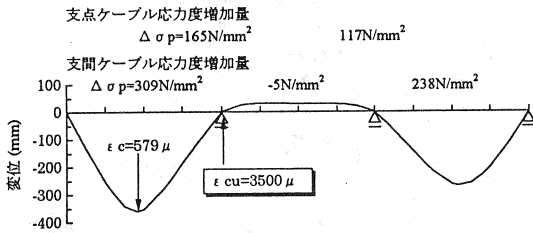


図-3 活荷重及び衝撃の載荷形態

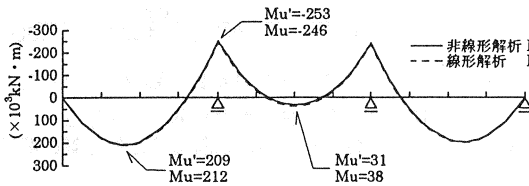
支間75m 0.50Apモデル



(a)B活荷重及び衝撃の載荷形態

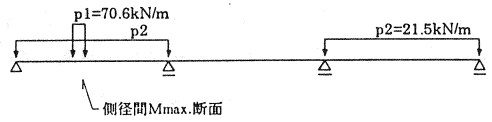


(b)破壊時の主桁たわみ分布

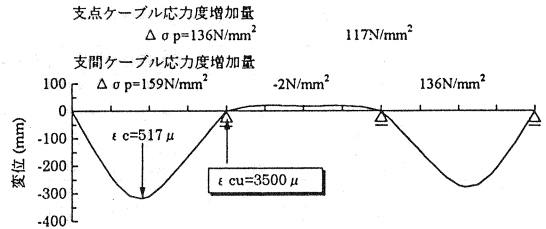


(c)破壊時の曲げモーメント分布

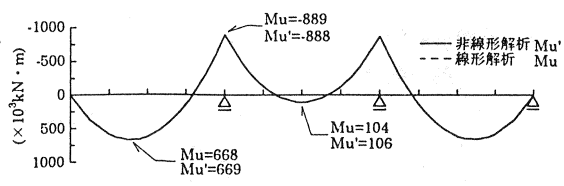
支間125m 0.40Apモデル



(a)B活荷重及び衝撃の載荷形態



(b)破壊時の主桁たわみ分布



(c)破壊時の曲げモーメント分布

図-4 破壊時の主桁たわみ、曲げモーメント分布

図-5に側径間Mmax断面に着目したケースにおける、各モデルの荷重漸増係数と主桁たわみの関係を、図-6に各モデルにおける中間支点断面が曲げ破壊したときに、着目断面に発生している曲げモーメント(曲げ耐力)を示す。大偏心モデルのほとんどが従来モデル(1.0Ap)と比較して、おおむね同等の破壊時係数 γ や曲げ耐力、変形性能を有している。

全外ケーブル方式である本モデル橋では、 $\gamma \times (D + L + I)$ の漸増ケースにおいて $\gamma = 1.7$ に至らずに曲げ破壊しているが、これはケーブル配置量を供用荷重時の所要量で決定しているためであり、所要の γ を満足するための検討は、「5. 終局荷重時の安全性を満足するケーブル量の検討」に示す。また、終局荷重時の荷重組み合わせとしては、 $1.3 \times D + \gamma \times (L + I)$ より $\gamma \times (D + L + I)$ の方が厳しい結果となった。

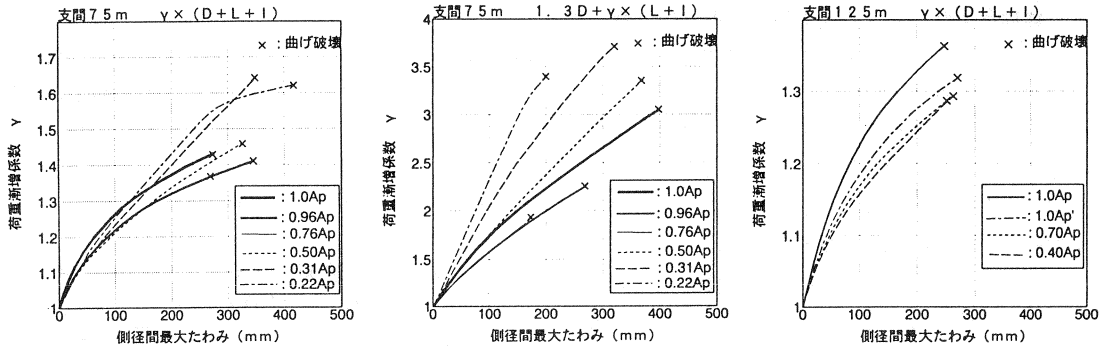


図-5 荷重漸増係数と主桁たわみの関係

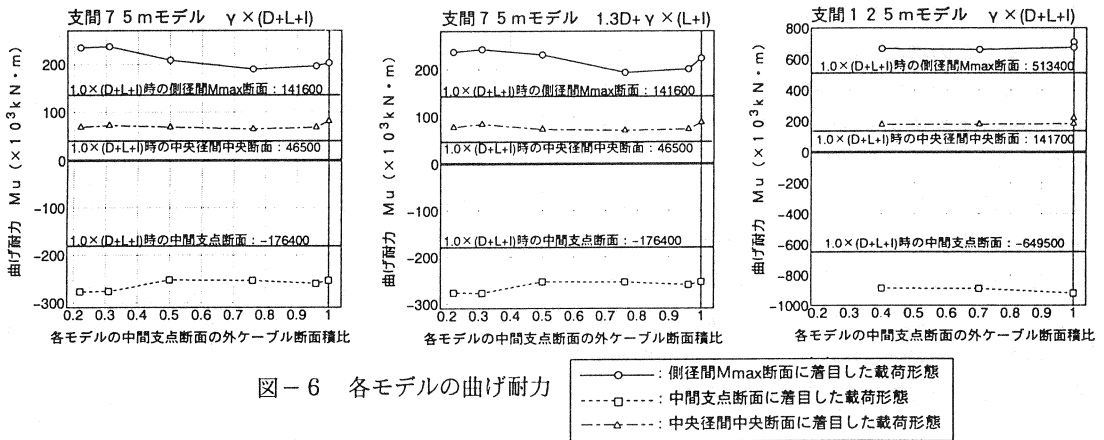


図-6 各モデルの曲げ耐力

(2)外ケーブルの応力度増加

図-7に各モデルの外ケーブルの有効引張応力度から主桁が曲げ破壊するまでの応力度増加量を示す。これより、ケーブル配置量が少ないモデルほどケーブルの応力度増加が大きく発揮した。その量は破壊断面を通過する中間支点ケーブルに着目すると、支間75mでは70~440N/mm²、支間125mでは40~140N/mm²であった。0.22Apモデルでは、降伏域に達するほどの応力増加が見られた。

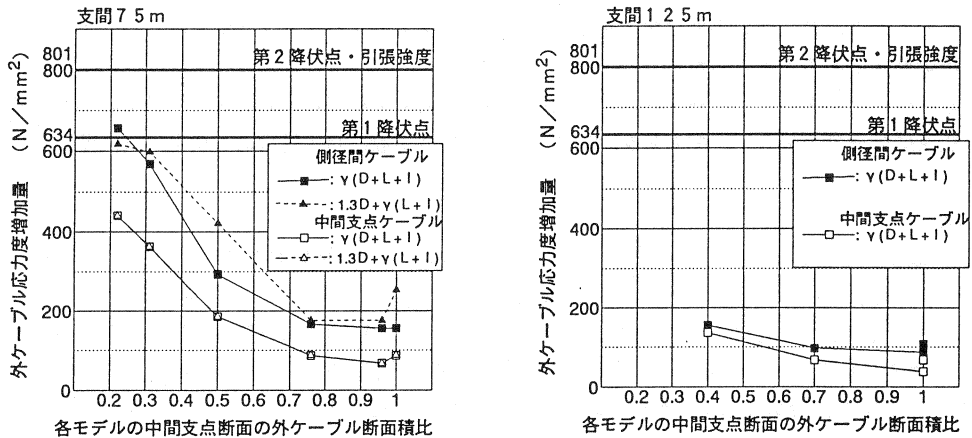


図-7 各モデルの曲げ破壊時の応力度増加

5. 終局荷重時の安全性を満足するケーブル量の検討

本モデル橋では、前述したように終局荷重時の荷重組み合わせに対し、曲げ破壊に対する安全度を満足していない。全外ケーブル方式である本モデルについて、供用荷重時と終局荷重時の安全性を共に満足させるためには、終局荷重時に着目してケーブル配置量を設定する必要がある。主桁の曲げ耐力を向上させるためには、次のふたつの方策が考えられる。

- ①主方向PCケーブルを、全外ケーブル方式から内ケーブルと外ケーブル併用方式に変えること。
- ②外ケーブル配置量を増やすこと。

ここでは、外ケーブル群の偏心は変えずに②を行い、非線形解析により破壊時荷重係数 γ が所定値(1.7 または 2.5)を満足させることを確認した結果を表-5に示す。これより各モデルは、ケーブル量を15~40%増加させる必要があるという結果になった。またこの増加率は、モデルによって大きく変わるものではないので、この検討結果からも大偏心モデルが従来モデルと同等な性能を有することが分かる。

表-5のハッチで示した支間75mの0.50Apモデルを例にした場合、供用荷重時と終局荷重時の安全性を満足するためには、配置ケーブル量は0.65Ap(=0.50Ap×1.30)必要となるものの、従来の1.0Ap内ケーブル配置型と比べれば、ケーブル量が35%減少するので、経済的な橋梁形式であると言える。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①外ケーブル配置量の少ないモデルほど、載荷に伴う張力増加が大きい傾向が顕著に見られた。支間75mの0.22Apモデルの側径間ケーブルでは、主桁の曲げ破壊時に降伏域に達した。
- ②いずれのモデルの載荷ケースでも、曲げ破壊が生じたのは中間支点断面であった。
- ③外ケーブルを支点・支間において大偏心配置させた方式は、部材の変形に伴う外ケーブルの張力増加が発揮されることにより、所要の曲げ耐力を確保しながら従来方式よりケーブル量を減じることができる経済的な橋梁形式であると考えられる。
- ④大偏心外ケーブル方式は、ケーブルの活荷重による応力変動や終局荷重時の応力、ひずみ等に留意しながら、任意にケーブル偏心量・配置量を設定することができる設計自由度のある構造と言える。

参考文献

- 1) 梅津、藤田、玉置、山崎：外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力について、プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集 pp.303~308、1995.10
- 2) 山崎、山縣、春日：斜材により補強されたコンクリート橋の構造特性、橋梁と基礎、1995.12、pp.33~38
- 3) 梅津、藤田、新井、上田：外ケーブル偏向部のフレッチング疲労特性に関する研究、プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集 pp.281~286、1996.10
- 4) 玉置、新井、板井、山崎：非線形解析プログラムの外ケーブル構造の適用と今後の標準化について、プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集 pp.309~314、1995.10

表-5 終局荷重時の安全度を満足させるための外ケーブル配置量の増加率

モデル	荷重の漸増ケース	ケーブル元配置	ケーブル配置量を増加させた場合		
		破壊時荷重係数 γ	配置量増加率	破壊時荷重係数 γ	
支間75m	1.0Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.42	×1.25	1.71
		$1.3D+\gamma(L+I)$	2.21		4.58
	0.96Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.39	×1.27	1.71
		$1.3D+\gamma(L+I)$	1.98		4.45
	0.76Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.34	×1.35	1.76
		$1.3D+\gamma(L+I)$	1.60		4.93
	0.50Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.40	×1.30	1.78
		$1.3D+\gamma(L+I)$	2.09		5.03
	0.31Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.54	×1.15	1.74
		$1.3D+\gamma(L+I)$	3.10		4.71
	0.22Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.54	×1.20	1.75
		$1.3D+\gamma(L+I)$	2.90		4.28
支間125m	1.0Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.34	×1.32	1.71
		$1.3D+\gamma(L+I)$	1.83		6.90
	1.0Ap'	$\gamma(D+L+I)$	1.29	×1.36	1.71
	0.70Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.26	×1.39	1.75
0.40Ap	$\gamma(D+L+I)$	1.26	×1.38	1.72	