

# 大偏心外ケーブルPC桁の曲げ性状に関する研究

睦好 宏史<sup>1</sup>・Thiru ARAVINTHAN<sup>2</sup>・濱田 譲<sup>3</sup>・渡辺 宗樹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

<sup>2</sup>正会員 工博 Lecturer, Faculty of Eng. and Surveying, Univ. of Southern Queensland (Toowoomba, QLD 4350, Australia)

<sup>3</sup>正会員 工博 ドーピー建設工業(株) 技術センター (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6)

<sup>4</sup>正会員 三井建設(株) 土木本部土木設計部 (〒261-0023 千葉県美浜区中瀬 1-9-1)

本研究は、大偏心を有する外ケーブルPC単純および連続桁の曲げ性状ならびに設計の考え方を、実験及び解析により明らかにしたものである。大偏心外ケーブルPC桁は、ケーブルを桁高内に配置した従来の外ケーブル式PCに比べて、ケーブルの高強度を有効に活用することが可能である。また、外ケーブルを多径間にあわせて連続的に配置すれば、架設現場の状況等に応じて、外ケーブルの配置に自由度を持たせた設計が可能である。さらに、従来の外ケーブル式PCの曲げ解析手法が大偏心外ケーブルPC単純および連続桁にも適用できること等が明らかとなった。

**Key Words :** external prestressing, prestressed concrete, large eccentricity, linear transformation, deviator, continuous span girder, moment redistribution

## 1. はじめに

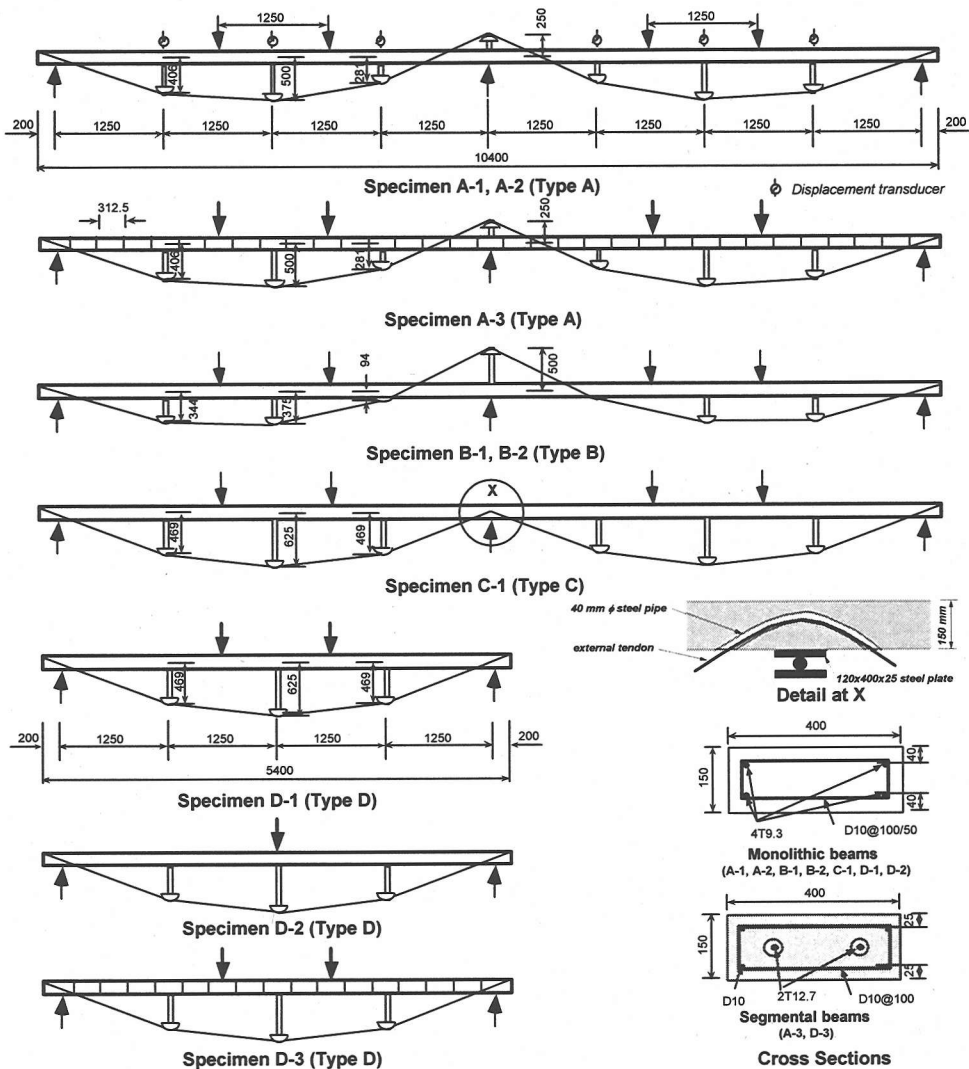
近年、外ケーブル式プレストレストコンクリート(以下、PC)構造物の研究・開発が精力的に行われ、プレキャストセグメントを用いた外ケーブル式PC構造、PC桁のウェブに波形鋼板あるいはトラス構造を用いた外ケーブル式PC構造等いろいろな構造形式が開発され、実用化されている。外ケーブル式PCは従来の内ケーブル方式に比べ、1) ケーブルに腐食が生じても取り替えることが可能である、2) 部材の断面外にPC鋼材を配置することから、部材厚を減少させることができ、桁の軽量化、工費の節減が可能である、3) プレキャストセグメントと組み合わせることによって施工が合理化できる等の利点がある。一方、コンクリートとケーブルに付着がないため、曲げ終局耐力が内ケーブル方式に比べて小さくなることがよく知られている。外ケーブルを桁高内に配置した通常の外ケーブルPC構造では、(スパン/桁高)比が大きい場合には、終局時において外ケーブルの張力増分は小さくなり、一般に降伏に至ることはない。このことは、ケーブルの高強度特性を有効に活用していないことを示唆している。このようなことを改良するために、ケーブルをデビエータで固定する方法<sup>3)</sup>、ケーブルを桁外に配置して偏心量を増やす方法<sup>17)</sup>(以下、大偏心)が

考えられている。大偏心外ケーブルPC構造に関しては、負の曲げモーメントに対して外ケーブルを大偏心させたものは、エクストラドーズド(Extradosed)PC橋として既に実用化されている<sup>17)</sup>。また、正の曲げモーメントに対して大偏心させたPC単純桁に関する曲げ性状については既に明らかにされており<sup>6), 12)~15)</sup>、Truc de la Fare橋<sup>18)</sup>、Villa Bedretto橋<sup>17)</sup>等の実際のPC構造物が既に建設されている。しかし、大偏心外ケーブル構造を連続スパンに適用した例はなく、その曲げ性状ならびに設計の考え方はほとんど明らかにされていない。さらに、プレキャストセグメントと組み合わせた構造形式についてもその挙動は解明されていない。

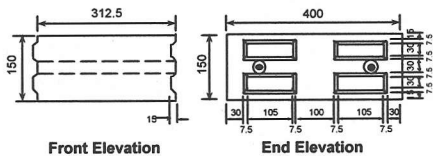
本研究は、大偏心外ケーブルPC連続桁を実構造物に供するために、実験および解析を行い、その曲げ性状を明らかにしたものである。さらに、このような構造形式を実構造物に適用する場合における設計の考え方についても明確にした。

## 2. 実験概要

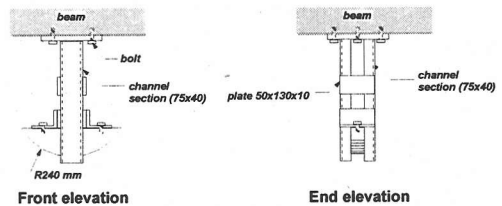
大偏心外ケーブルPC連続はりの曲げ性状を明らかにするため、合計9体のはり供試体を製作し、載荷実験を行った。Fig.1にはり供試体の形状寸法を示



(a) Dimension of specimens (in mm)



(b) Shear-key (in mm)



(c) Deviator

Fig.1 Details of test specimens

す。6体(タイプA, BおよびC)の供試体は2径間連続はりであり, 3体(タイプD)は比較用の単純はりである。供試体の断面形状は幅400mm, 高さ150mmの矩形断面である。2径間連続はり供試体においては, 各支間を5.0mとし, 外ケーブルを大偏心させるために図に示すように7個のデビエータを設

置している( Fig.1参照)。デビエータは鋼製であり, Fig.1(c)に示す形状のものを用いた。単純はり(タイプD)は支間長5.0mであり, 連続はりと同様に1.25mの間隔で3個のデビエータを配置している。タイプDはタイプCと同様の外ケーブル配置をもつ単純はり供試体である。供試体A-3およびD-3がプレ

Table 1 Experimental variables

No.	Description of specimen	Method of casting	Loading		Tendon eccentricity (mm)		Confinement reinforcement (Vol. ratio)	Prestressing tendons	
			Left span	Right span	Mid span	Center support		Internal tendon	External tendon
A-1	2-span continuous beam	Monolithic casting	100%	100%	500	250	-	1T9.3*4(4 x 50 kN) (56% $f_{pm}$ )	
A-2			100%	50%				1T12.4*2(2 x 100 kN) (62% $f_{pm}$ )	
A-3		Precast segments	100%	100%					
B-1		Monolithic casting	100%	100%	375	500	D10@50 (3.2%)	1T9.3*4(4 x 50 kN) (56% $f_{pm}$ )	
B-2			100%	50%				1T10.8*1 (25 kN) (21% $f_{pm}$ )	
C-1			100%	100%	625			0	
D-1	Single span beam		two point		625	-	-	1T9.3*4(4 x 50 kN) (56% $f_{pm}$ )	
D-2			one point						
D-3		Precast segments	two point						

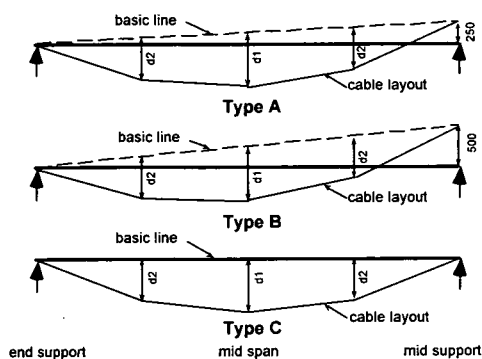


Fig.2 Linear transformation of tendon layout

キャストセグメント製である以外は全て一体打ちである。実験要因をTable 1に示す。表中の拘束鉄筋とは、供試体B-1、B-2およびC-1において、塑性ヒンジが生じる支間中央部および中間支点の塑性変形を向上させるために<sup>2)</sup>、D10の帯鉄筋を50mm間隔で配置したことを表わしている。なお、他の断面にはD10の帯鉄筋を100mm間隔ではり全長にわたって配置している。

外ケーブルの配置形状は以下のようにして定めた。本実験に用いるはりの断面形状およびスパンについて、PC鋼材を経済的かつ効率的に用いるために試設計を行った結果から<sup>14)</sup>、単純はり(タイプD)において、最大偏心量を625mm(スパン/偏心量=8)とし、配置形状がほぼ放物線形状となるようにデビエータ位置を決定した。タイプCは、中間支点上の偏心量を零としてタイプDと同じ配置形状とした。タイプAおよびBに対しては、Fig.2に示すように、直線移動則(Law of Linear Transformation<sup>8),16)</sup>に従い、はりの端支点および中間支点における外ケーブル位置を結ぶ直線から各断面の外ケーブル位

Table 2 Mechanical properties of prestressing tendons

Type of tendon	Sectional area (mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (GPa)	Yield force (kN)	Ultimate force (kN)
SWPR7A-φ 9.3 mm	51.61	196.2	76	89
SWPR7B-φ 10.8 mm	69.68		102	120
SWPR7B-φ 12.4 mm	92.90		136	160

置までの距離がタイプCと等しくなるように決定した。タイプBの外ケーブル配置形状はプレストレスによる不静定力が発生しないいわゆるコンコダントなケーブル配置形状になっている。この場合の中間支点上での偏心量は500mmで、支間中央においては375mmである。タイプAは、中間支点上の偏心量をタイプBの半分(=250mm)とし、支間中央を500mmとした。以上のように外ケーブルを配置した結果、プレストレスによる不静定モーメントは、タイプCが最も大きくなり、タイプBが最も小さくなる。

一体打ち供試体では、内ケーブルとして直径9.3mmのPC鋼より線(SWPR7A)を4本配置し、プレテンション方式によりプレストレスを導入した。一方、プレキャストセグメント製供試体(A-3、D-3)では、内ケーブルとして直径12.4mmのPC鋼より線を2本配置し、ポストテンション方式によりプレストレスを導入した。PC鋼より線の機械的性質をTable 2に示す。内ケーブルに導入したプレストレス力は、外ケーブルを緊張するまでの運搬、設置時等に作用する自重による曲げモーメントに抵抗できるように約240kN(有効プレストレス力200kN)とした。

プレキャストセグメントは、ロングラインマッチキャスト方式にて製作し<sup>2)</sup>、実験室にてエポキシ樹脂を塗布して接合した後、内ケーブルにて一体化し

Table 3 Summary of experiment results

No.	Cracking load (kN)			Ultimate load (kN)		Maximum deflection (mm)		Ultimate tendon force (kN)		Average stress increase (N/mm <sup>2</sup> )	Concrete strength (N/mm <sup>2</sup> )	Failure mode	
	Left span	Center support	Right span	Left span	Right span	Left span	Right span	Left end	Right end			Concrete	External tendon
A-1	39.2	36.8	39.2	107.9	108.6	82.7	82.6	117.1	116.6	1,306	51.9	crushing of concrete	yielded
A-2	34.2	39.2	-	88.1	47.6	112.7	-24.6	88.3	84.4	870	58.6		no yielding
A-3	38.7	37.7	44.9	97.6	104.0	80.1	80.0	113.3	111.5	1,275	60.3		yielded
B-1	39.6	37.0	39.4	108.1	107.6	110.2	110.2	118.3	118.1	1,328	57.4		no yielding
B-2	36.8	41.7	-	90.8	49.6	150.2	-31.4	96.1	86.3	1,070	59.4		no yielding
C-1	41.7	36.8	41.6	109.7	110.9	80.2	80.0	114.4	115.6	1,290	54.0		no yielding
D-1	37.0 (34.7) *			94.5 (88.6)*		130.3		117.9	118.3	1,340	57.2		yielded
D-2	29.2 (36.5) *			82.2 (102.8)*		120.1		117.6	117.9	1,371	56.9		yielded
D-3	36.3 (34.0) *			86.3 (80.9)*		100.2		114.4	114.1	1,300	70.1		yielded

\* Equivalent moments (in k·Nm) are given in ( ).

た。コンクリートの設計基準強度は14日強度で50MPaとした。載荷実験時の強度をTable 3に示す。外ケーブルには直径10.8mmのPC鋼より線(SWPR7B)を1本用い、設計緊張力は緊張時にひび割れが発生しないように25kNとした。この場合、設計緊張力はPC鋼より線の引張耐力の約21%である。これは、本研究に用いたはり供試体の断面寸法が小さいにも拘わらず実構造物に用いられているPC鋼線を使用したためである。実際の大偏心外ケーブルPC構造物においては、一般のPC構造物と同等の緊張力が導入される。外ケーブルとデビエータ間の摩擦をできるだけ取り除くために、テフロンシートを挿入した。

載荷はFig.1に示すように、供試体A-1, A-3, B-1およびC-1は、連続はりの基本的曲げ性状を明らかにするために対称載荷とし、供試体A-2およびB-2は、活荷重が単径間に載荷された場合を想定して非対称載荷とした。非対称載荷においては右支間における荷重は左支間の50%とした。これは右支間における負の曲げモーメントによる破壊を防ぐために必要な最低限の荷重である。実構造物においては自重の影響が大きいため、荷重条件が本実験と若干異なるが、実構造物の場合の挙動は後に述べる解析により詳細に求めることが可能である。単純はり供試体においては2つの載荷タイプを適用した。すなわち、Fig.1に示すように、供試体D-1およびD-3においては連続はり供試体と同様の2点載荷とし、D-2においては支間中央における1点載荷とした。なお、供試体D-3は、セグメント構造において、断面内にも外ケーブルを用いた全外ケーブル構造を想定して、内ケーブルをアンボンド方式とした。計測項目は、荷重、変位、ケーブル張力、各支点反力、コンクリート及び内ケーブルのひずみ等である。

### 3. 実験結果

#### (1) 荷重・変位特性

##### a) 一体打ち供試体

Fig.3に実験から得られたはり供試体の荷重一変位曲線を示す。図中の変位は、プレストレス導入時からの変位を示している。従って、荷重が0の時には負の変位を示している。また、実験結果をTable 3に示す。Fig.3(a)は単純はり供試体の荷重一変位関係を示したものである。2点載荷の供試体(D-1)および1点載荷の供試体(D-2)のひび割れ発生モーメントはともに35kN・mであり、終局曲げモーメントは供試体D-1は89kN・mで、D-2は103kN・mであった。終局曲げモーメントにおける相違は、破壊断面における外ケーブルの偏心量の違いによるものである。すなわち、D-1では、破壊断面は荷重点下における断面となり、この時の外ケーブルの偏心量は547mmである。一方、D-2の破壊断面は同様に載荷点下となり、この時の偏心量は625mmである。

Fig.3(b), (c)に2スパン連続はり供試体の荷重一スパン中央変位の関係を示す。対称に載荷された供試体A-1, B-1およびC-1では、片側荷重が約37kNの時、中間支点上にひび割れが生じ、約40kNの時、支間中央付近でひび割れが生じた。一方、非対称載荷された供試体A-2およびB-2では、左支間の荷重が約35kNの時、左支間中央付近においてひび割れが生じ、40kNの時中間支点上でひび割れが発生した。また、対称載荷供試体の終局荷重は約109kNに対して、非対称載荷では約90kNであった。これは、主として終局状態における外ケーブル応力の増加量の違いによるものである。後述するように、非対称載荷における応力増加量は対称載荷よりかなり小さな値となる。直線移動則により設計された供試体A-1, B-1およびC-1の荷重一変位性状は破壊に至るまで殆ど同一の

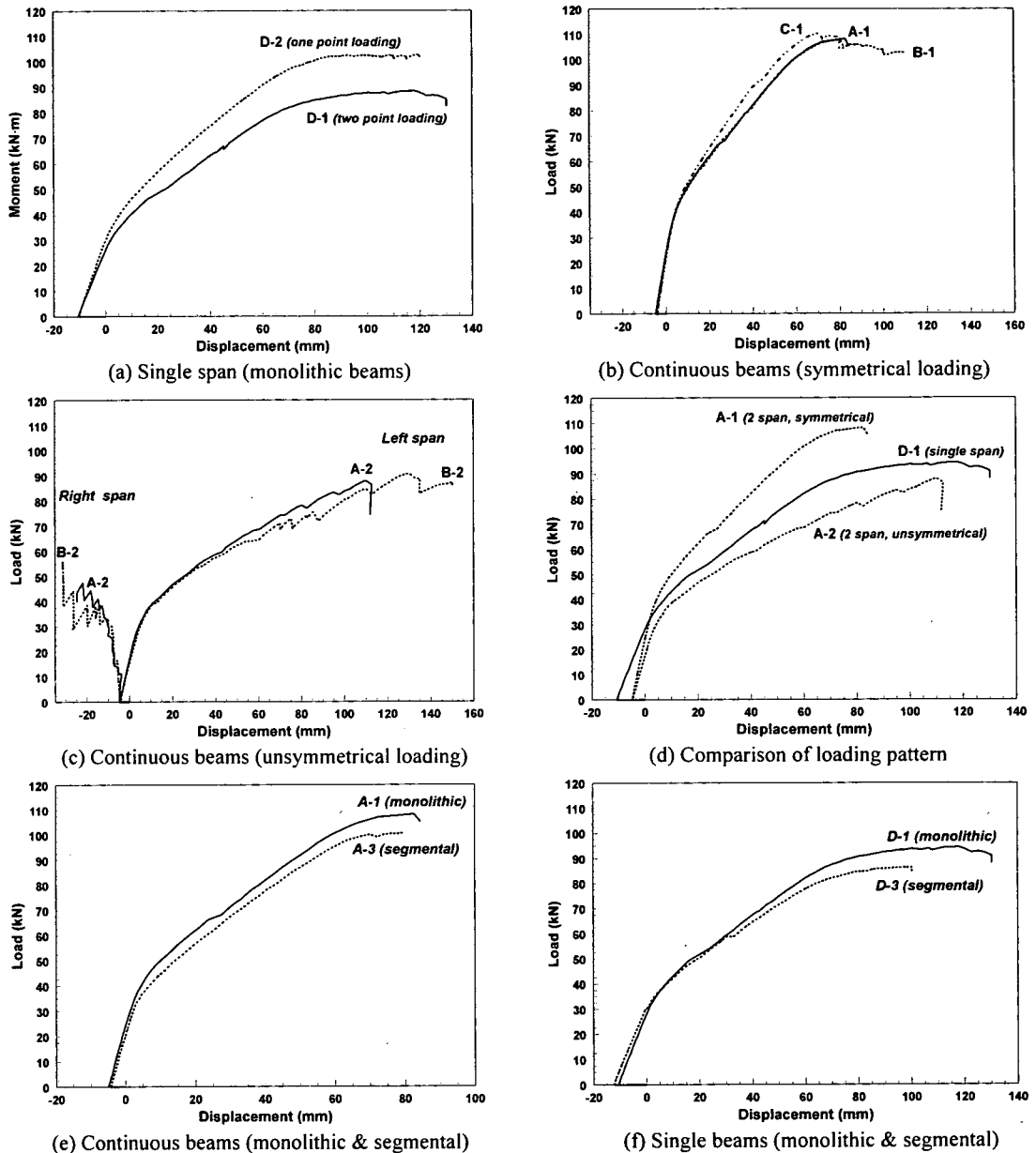
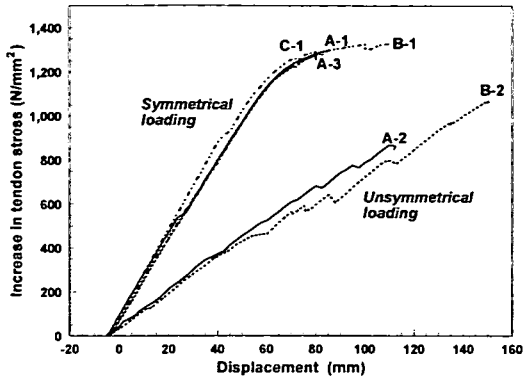


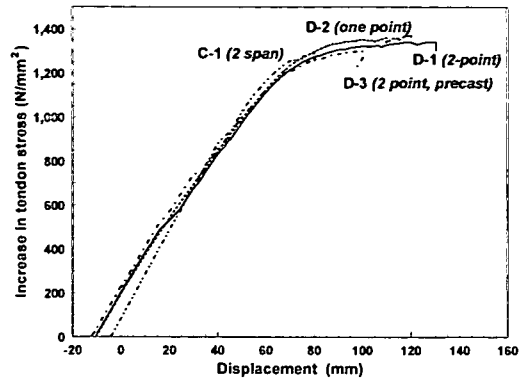
Fig.3 Load-displacement characteristics

挙動を示している。また、Table 3に示すように、ひび割れ発生荷重、終局荷重はほぼ同じ値であった。拘束鉄筋を配置した供試体B-1においては、支間中央部においてコンクリートのかぶりが剥がれた後も荷重は低下せず、変形が増加する傾向を示した。しかし、同様に拘束鉄筋を配置した供試体C-1の変形量はそれ程大きな値となっていない。この理由として、供試体C-1は中間支点上の断面内においてケーブルを偏向させているため、コンクリート断面内に偏向用のパイプが埋め込まれている (Fig.1参照)。

このため、中間支点上の有効実断面積が他の供試体と比較して小さいため、コンクリートの圧壊が早い段階において生じたためであると考えられる。非対称載荷供試体A-2およびB-2においても同様の曲げ挙動が観察されたが、拘束鉄筋を配置したB-2の方が拘束鉄筋を配置していないA-2より大きな変形性能を示した。Table 3に示した最大変形量 (コンクリートが圧壊した時の変位) の値から、拘束鉄筋を配置した供試体B-1およびB-2は非拘束供試体のA-1およびA-2より約33%大きな塑性変形量を示していること



(a) Continuous beams



(b) Single span beams

Fig. 4 Stress increase in external tendons with mid-span deflection

が分かる。破壊形式は、単純はりと同様に対称荷重供試体は、外ケーブルの降伏後、荷重点直下においてコンクリートの圧壊が生じた。なお、供試体C-1においては既に述べたように中間支点上の断面が外ケーブルの配置用パイプにより断面欠損していたため、この断面下縁で圧壊が生じた。

以上のことより、直線移動則に従い、端支点と中間支点における外ケーブルの偏心位置を結ぶ直線を基準とした偏心量を等しくすれば、外ケーブルの配置形状によらず、連続はりの曲げ性状はほぼ同等となることが明らかとなった。このことは、本構造形式を用いて実際の橋梁を架設する場合、現場の状況あるいは景観を考慮して、外ケーブルの配置に自由度を持たせた設計が可能であることを示している。直線移動則は、桁高さ内に配置されたケーブル構造に適用しても、上述したような利点が発揮されないが、大偏心外ケーブル構造では大きな利点となる。

**b) プレキャストセグメント供試体**

Fig.3(e), (f)は一体打ち供試体とセグメント供試体の荷重-変位曲線を比較したものである。セグメント供試体のひび割れ発生荷重は一体打ち供試体とほぼ同じ値であった。しかし、ひび割れの分布に関しては、一体打ち供試体においては広く分散するのに比べ、セグメント供試体では接合面付近に集中して発生することが確かめられた。連続はりセグメント供試体A-3の最大荷重は一体打ち供試体A-1より6%ほど小さくなった。これは、セグメント供試体における内ケーブルの断面積が一体打ち供試体のそれより若干小さいからである。また、単純はり供試体D-3の最大荷重が一体打ち供試体D-1に比較して約9%小さい値を示していることも、上と同じ理由に加えて、内ケーブルがアンボンドであることによるものである。また、D-3の終局変位はD-1よりも小さな値を示している。これは上で述べたように、D-3には

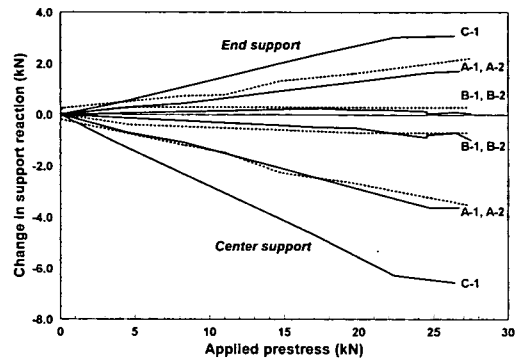
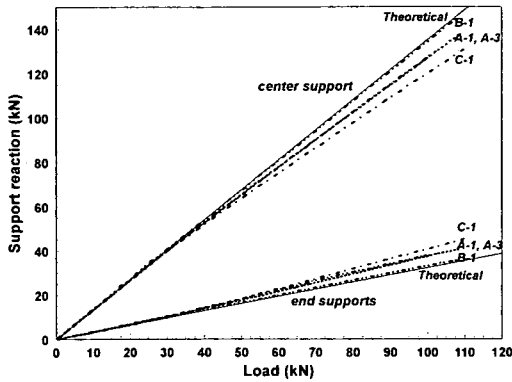


Fig.5 Change in support reaction with introduced prestress

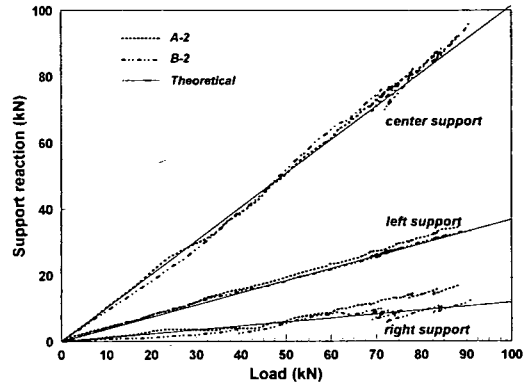
内ケーブルがアンボンドであるため、終局時に降伏しなかったことによるものと思われる。上記による差を除けば、一体打ち供試体とセグメント供試体の曲げ性状はほぼ同じであると言える。

**(2) 外ケーブルの張力増分**

連続はり供試体における外ケーブル応力の増加量と支間中央変位の関係をFig.4(a)に、また、終局時（コンクリートが圧壊した時）における応力増分量をTable 3に示す。外ケーブル応力の増加量は対称荷重供試体（A-1, A-3, B-1, C-1）の方が非対称荷重供試体（A-2, B-2）より大きな値を示した。これは、対称荷重においては両支間が共に下方に大きく変位するため外ケーブルも著しく伸びるが、非対称荷重においては左支間は下方に変位するが、右支間では上方に変位するため、外ケーブル全体の伸びは小さくなるためである。対称荷重供試体においては外ケーブルは降伏したが、非対称荷重供試体では降伏に至らなかった。本実験では、外ケーブルが降伏するまでの対称荷重におけるケーブル応力の増加量は、非対称荷重の約2倍であった。

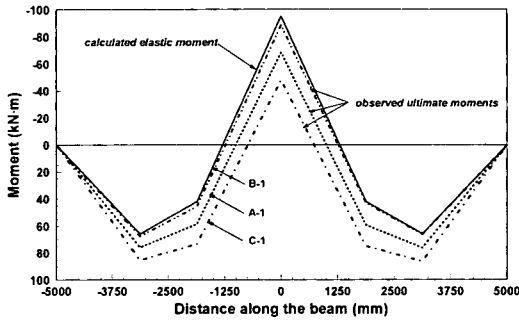


(a) Symmetrical loading

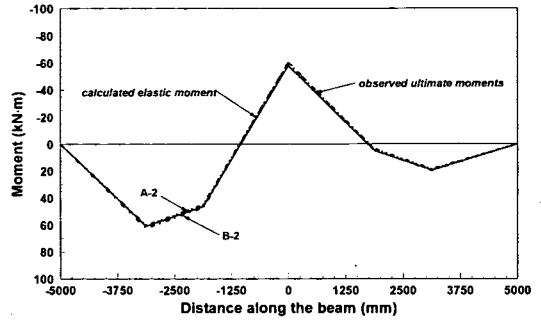


(b) Unsymmetrical loading

Fig. 6 Change in support reaction with applied load



(a) Symmetrical loading



(b) Unsymmetrical loading

Fig. 7 Moment redistribution in continuous beams

Fig.4(b)は単純はり供試体 (D-1, D-2, D-3) における外ケーブル応力の増加量を示したものである。なお、図には比較のために対称載荷連続はり供試体 C-1 の値も示している。図より、単純はり供試体における外ケーブル応力の増分量は、一体打ちとプレキャストセグメント、2点載荷と1点載荷に関わらずほぼ同様の挙動を示している。また、単純はり供試体と対称載荷連続はり供試体の外ケーブル応力増分量の挙動はほぼ同様である。桁高さ内に配置された一般的な外ケーブル部材の設計では、非線形解析などを行わない場合、終局時の外ケーブル張力増加量として $200\text{N}/\text{mm}^2$ 程度を見込むことが認められている<sup>19)</sup>。各供試体の外ケーブル張力増加量は、この値を大きく上回るものであり、ケーブルの高強度特性を有効に活用していることが分かる。

一般に、連続はりにおいてはプレストレスングにより支点反力が生じ、これにより不静定曲げモーメントがはりに作用することになる。Fig.5は、外ケーブルにプレストレスを導入した時に生じる支点反力と緊張力の関係を示したものである。支点反力には供試体自重と計測機器類の重量を取り除いている。緊張力の増加と共に端支点反力が増大するにつ

れて中間支点反力は減少しているのが分かる。この傾向はタイプCにおいて最も顕著であり、タイプBにおいて最も少ない。これは、外ケーブルの配置形状の違いによるものであり、タイプBにおいては外ケーブルをコンコーダントに近い配置にしたためである。

### (3) 連続はりにおけるモーメント再分配

不静定連続はりにおいては、ある断面が降伏すると、曲げモーメントの再分配が生じる。連続はりが弾的に挙動している間は、荷重の増加に対して支点反力は線形的に増大する。支点反力の変化が線形でなくなった時、降伏断面から非降伏部分へ曲げモーメントが再分配されることになる。この現象を実験から求めるために、ロードセルにより支点反力の計測を行った。Fig.6は実験および弾性としたはり理論から得られた荷重と支点反力の関係を示したものである。対称載荷の場合 (Fig.6(a)) には、初期において、実験値は理論値とほぼ等しく弾性挙動を表している。その後、ひび割れが発生してすぐに内ケーブルが降伏すると (約 $40\sim 50\text{kN}$ )、モーメントの再分配が生じている。すなわち、荷重が増加する

Table 4 Ultimate moment and moment redistribution

No.	Loading type	Observed plastic moments $M_p$ (kN·m)			Calculated elastic moments $M_e$ (kN·m)			Moment redistribution $[1 - M_p / M_e]$ (%)		
		Left span	Center support	Right span	Left span	Center support	Right span	Left span	Center support	Right span
A-1	Symmetrical	75.8	-68.5	76.2	65.8	-95.2	65.8	-15.2	28.0	-15.7
A-2	Unsymmetrical	60.0	-60.2	-	60.8	-58.1	-	1.3	-3.7	-
A-3	Symmetrical	69.9	-63.7	69.8	58.6	-93.8	58.6	-19.3	32.0	-19.1
B-1	Symmetrical	67.7	-88.5	66.2	65.4	-94.6	65.4	-3.5	6.4	-1.2
B-2	Unsymmetrical	62.4	-60.8	-	62.7	-59.9	-	0.6	-1.6	-
C-1	Symmetrical	85.3	-48.1	86.3	67.0	-96.9	67.0	-27.3	50.4	-28.7

につれて、実験から得られた支点反力は理論値からはずれていくのが分かる。なお、ケーブルの降伏は、ケーブルに貼付したひずみゲージの値から判断した。一方、非対称載荷においては、対称載荷のような明瞭なモーメント再分配は見られなかった。対称載荷供試体においては中間支点付近に最初の塑性ヒンジが形成され、非対称載荷供試体では左支間（全載荷側）の載荷点直下で最初の塑性ヒンジが生じた。終局時において、支点反力の実測値から求まる終局モーメント ( $M_p$ ) と、実際の終局荷重から弾性計算によって得られる曲げモーメント ( $M_e$ ) を求め、各連続はり供試体のそれぞれの曲げモーメント分布を Fig.7に示す。また、これらの値とモーメント再分配率 ( $1 - M_p / M_e$ ) を Table 4に示す。Table 4より、対称載荷供試体では、支間中央付近において塑性モーメントが弾性モーメントを上回り、モーメント再分配率は負となった。一方、中間支点における塑性モーメントは弾性モーメントを下回り、再分配率は正となっている。非対称載荷供試体では、再分配率はかなり小さいものの対称載荷の場合と逆の傾向を示している。再分配率の大きさを比較すると、タイプC供試体で最も大きく、タイプB供試体で最も小さい値となった。タイプB-1とC-1においては、塑性ヒンジが生じる箇所に拘束筋を配しているため、ヒンジ部には十分な塑性変形が生じたものと思われる<sup>2)</sup>。従って、タイプBとCにおけるモーメント再分配率の相違は、主に外ケーブルの配置形状の違いによるものと考えられる。すなわちタイプBはコンコダントなケーブル配置であるため、2次モーメントが最も小さく、一方、タイプCでは2次モーメントが最も大きくなるからである。以上のことより、連続はりにおけるモーメントの再分配は各支間の載荷方法だけでなくケーブル配置形状によっても影響を受けることが明らかとなった。

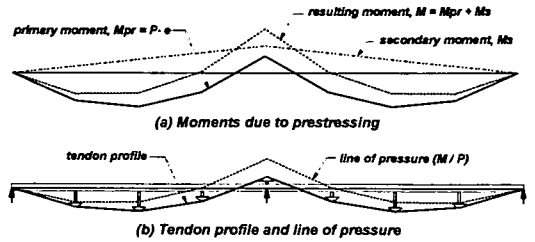


Fig. 8 Effect of secondary moment in a 2-span beam

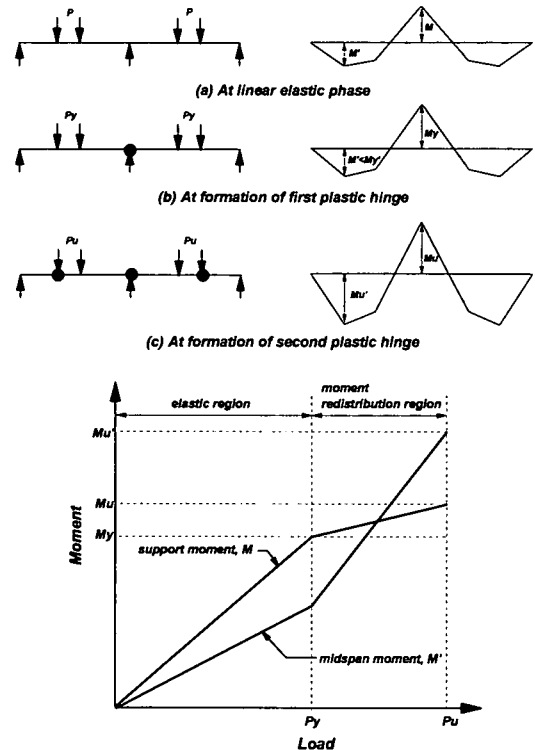


Fig. 9 Model of moment redistribution



#### 4. 大偏心外ケーブルPCの解析

##### (1) 解析方法

ケーブルを桁高内に配置した通常の外ケーブルPCはりの曲げ性状を解析的に求める手法として、1) 変形の適合条件を考慮したファイバーモデルによる方法<sup>1,2)</sup>、2) 材料非線形と幾何学的非線形を考慮した平面骨組みモデルによる方法等がある<sup>16)</sup>。これらの解析手法により、外ケーブル式PC単純はりの曲げ挙動を精度よく求められることが既に明らかにされている。ここでは、1) の手法を大偏心外ケーブルPC単純および連続はりに適用することにする。一般の外ケーブルPCでは、外ケーブルは断面の高さ内に配置されるため、ケーブル位置にコンクリートが存在する。しかし、大偏心外ケーブルPCでは、ケーブルを断面の外に配置するため、ケーブル位置においてコンクリートは存在しない。そこで、1) の手法を適用するに当たり、ある断面の下縁（または上縁）から外ケーブル位置まで仮定のコンクリート断面を仮定して、コンクリートおよびケーブルのひずみを計算した。なお、断面における力の釣り合いには、仮想断面のコンクリートによる力は考慮されていない<sup>9)</sup>。本手法は材料非線形と幾何学的非線形が考慮されている。また、コンクリートの応力-ひずみ関係は、拘束筋による拘束域（拘束筋内側のコンクリート）では、これを考慮した応力-ひずみ関係を<sup>2)</sup>、また非拘束域（拘束筋外側のコンクリート）では通常の応力-ひずみ関係を用いた。なお、本実験では、デビエータとケーブル間の摩擦をとるためにテフロンシートを挿入した。このため、本解析ではこのような摩擦を考慮していない。さらに本解析手法を連続はりに適用する場合、プレストレス導入による2次モーメントの影響と、ある断面に塑性ヒンジが生じた場合、曲げモーメントの再分

配を新たに考慮する必要がある。

Fig.8はプレストレス導入による2次モーメントの影響を示したものである。不静定連続はり供試体にプレストレスが導入されると、中間支点および他の両端支点にも反力が生じ、この結果曲げモーメントがはりに生じることになる（2次モーメント）。解析においては、このような2次モーメントを全荷重段階に渡って考慮する必要がある。

連続はりの曲げモーメント再分配後の挙動を求めるために、ここでは以下の手法を用いた。Fig.9(a), (b), (c)は、対称荷重における連続はりの降伏ヒンジが生じる過程を示したものである。はり断面のモーメントは、降伏モーメント ( $M_y$ ) に達するまでは、先に述べた方法によって計算することができる。また、終局モーメント ( $M_u$  および  $M_u'$ ) は、コンクリートの終局ひずみ ( $\epsilon_{cu}=0.0035$ ) を仮定して同様の方法により求めることができ、これから  $P_u$  を計算することができる。さらに、ある断面の降伏から、連続はりの終局に至るまでの過程を簡便に逐一求めるために、降伏モーメントに達した断面のモーメント-荷重関係をFig.9(d)に示すようにバイリニアと仮定した。このように仮定した理由は、モーメント-荷重関係と同様の関係である支点反力-荷重関係 (Fig.6) がバイリニアに近似できるからである。

##### (2) 実験および解析結果の比較

Fig.10は、実験および解析から得られた代表的な供試体の荷重-変位関係を示したものである。対称荷重および非対称荷重ならびに、連続はりおよび単純はり供試体において、解析値は各供試体の曲げ挙動を精度よく表していると言える。Fig.11は、実験および解析から得られた代表的な供試体のケーブル応力-変位関係を示したもので、解析値と実験値はよく一致していると言える。Table 5に、終局曲げ耐

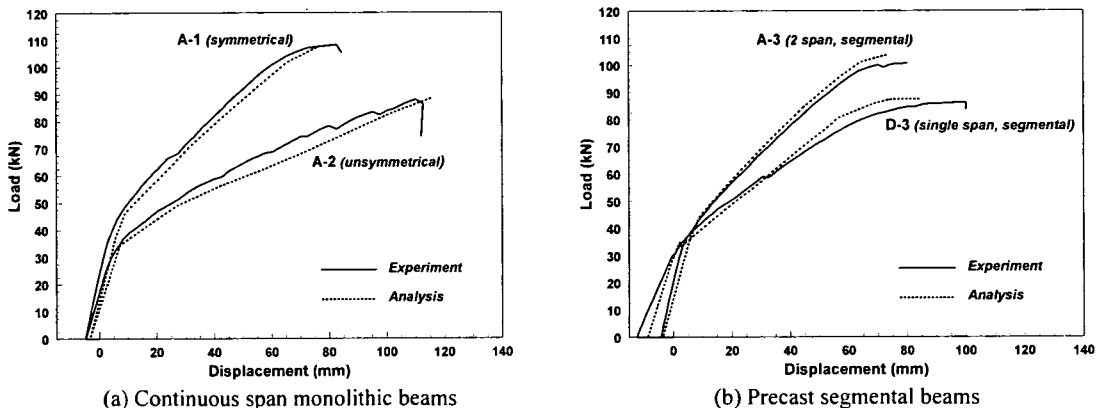
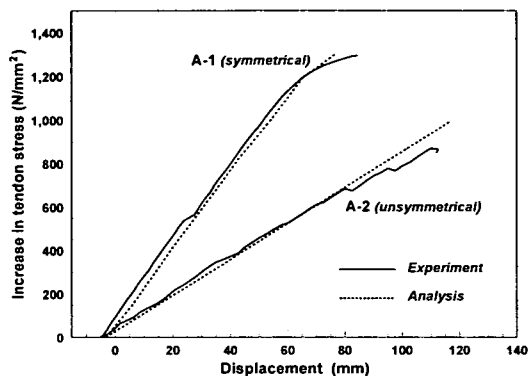


Fig. 10 Comparison of load-displacement characteristics

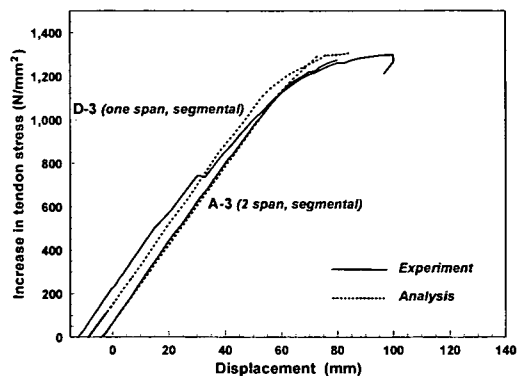
Table 5 Comparison of analytical and test results

No.	Description of specimens	Maximum Strength (kN)			Stress increase in ext. tendon (N/mm <sup>2</sup> )		
		Experiment	Analysis	Correlation	Experiment	Analysis	Correlation
A-1	2 span. symmetrical	108.3	107.7	0.99	1.306	1.302	1.00
A-2	2 span. unsymmetrical	88.1	88.8	1.01	870	987	1.13
A-3	2 span. segmental	97.6	103.9	1.07	1.275	1.302	1.02
B-1	2 span. symmetrical	107.9	108.5	1.01	1.328	1.334	1.01
B-2	2 span. unsymmetrical	90.8	89.5	0.99	1.070	1.145	1.12
C-1	2 span. symmetrical	110.3	108.7	0.99	1.290	1.322	1.03
D-1	single span. two point	94.5	95.0	1.01	1.340	1.323	0.99
D-2	single span. mid point	82.2	79.9	0.97	1.371	1.339	0.99
D-3	single span. precast	86.3	87.6	1.02	1.300	1.307	1.01

\*correlation given is the ratio of analysis/experiment



(a) Continuous span monolithic beams



(b) Precast segmental beams

Fig. 11 Comparison between displacement and stress increase in external tendons

力の実験値および本解析手法から得られた計算値を示す。すべての供試体における終局曲げ耐力の(実験値/解析値)の平均値は1.00、変動係数は2.49%となり、解析値は実験値を精度よく表している。また、各供試体の終局時におけるケーブル応力増分の実験値および解析値を見てみると、対称荷重を行った連続はり供試体および単純はり供試体の解析値は実験値とよく一致している。一方、非対称荷重を行った連続はり供試体の解析値は実験値よりも大きな値である。これは、Table 3の終局時におけるはり両端の外ケーブルの張力に示すように、非対称荷重のはり(A-2、B-2)では、デビエータとケーブルの摩擦により張力が損失して、左右のスパンに違いが生じたためであると考えられる。従って、大偏心外ケーブルPC連続はり構造を実構造物に適用する場合には、活荷重の荷重方法によってデビエータとケーブルの摩擦により、ケーブル張力がスパンによって異なる可能性があることを考慮する必要がある。以上のように、本研究で用いた解析手法により、大偏心外ケーブル単純はりおよび連続はりの曲げ性状を精度よく計算できることが明らかとなった。

## 5. 実構造物への適用

本研究成果に基づいて、実際の大偏心外ケーブルPC 2スパン橋が架設されたので簡単に紹介する。既に述べたように、大偏心外ケーブルPC単純桁橋梁はすでにいくつか建設されているが、外ケーブルを連続スパンに連続配置した大偏心外ケーブルPC橋はこれまでに建設された例が無く、世界で初めての橋である。Fig.12は完成後の写真を示したものである<sup>11)</sup>。本橋は、外ケーブルPC鋼線の高強度の有効利用、自重の軽減、景観への配慮等を考慮して設計・施工された。本橋の外ケーブルの配置は、ここで述べた直線移動則により、現場の架設条件ならびに景観等を配慮して決められた。また、本橋は現場におけるコンクリートの一体打ちで建設された。

## 6. 結論

大偏心外ケーブルPCはり供試体の曲げ挙動を明らかにするために、単純はり、2スパン連続はりを製作し、荷重方法を変化させて実験を行うとともに、



Fig. 12 View of the completed bridge

材料非線形，プレストレスによる2次モーメントの影響，モーメント再分配を考慮した解析を行った。本研究から以下のことが言える。

- 1) 大偏心外ケーブルPC連続はりにおいて，直線移動則に従い，端支点と中間支点における外ケーブルの偏心位置を結ぶ直線を基準とした偏心量を等しくすれば，外ケーブルの配置形状によらず，連続はりの曲げ性状はほぼ同等となることが明らかとなった。このことは，本構造形式を用いて実際の橋梁を架設する場合，現場の状況あるいは景観を考慮して外ケーブルの配置に自由度を持たせた設計が可能であることを示している。
- 2) プレキャストセグメント工法で製作された大偏心外ケーブルPCはり供試体の曲げ挙動は，一体打ち工法で製作されたものとほぼ同様の挙動をすることが明らかとなった。
- 3) 連続はりにおける外ケーブルの応力増分は，載荷方法により影響を受けることが明らかとなった。また，対称載荷を行った連続はりとは単純はりでは，応力増分量はほぼ同じであった。
- 4) 非対称載荷を行った連続はり供試体の終局曲げ耐力は，対称載荷を行った供試体より約20%小さくなった。これは，非対称載荷では，終局時におけるケーブルの応力増分量が対称載荷の場合より小さくなるからである。また，非対称載荷を行った供試体では，ケーブルとデビエータの摩擦により，左右スパンのケーブル張力に違いが生じた。
- 5) 対称載荷を行った連続はりのモーメント再分配は，スパン中央で負のモーメント再分配を示し，中間支点では正のモーメント再分配を示した。また，モーメント再分配率は，ケーブル配置により違いが生じた。さらに，非対称載荷を行っ

た連続はりのモーメント再分配率は，対称載荷を行ったはりと比較して小さくなることが明らかとなった。

- 6) ケーブルを桁高内に配置した通常の外ケーブル式PCの解析手法を用いて，大偏心外ケーブルPC単純はりの曲げ挙動を精度よく推定できることが明らかとなった。また，本解析手法に，プレストレスによる2次モーメントの影響，モーメント再分配を考慮することで，大偏心外ケーブルPC連続はりの曲げ挙動を破壊に至るまで精度よく計算できることが明らかとなった。

謝辞：本研究は埼玉大学，ドービー建設工業（株），三井建設（株）との共同研究で行ったものである。本研究を行うに当たって，埼玉大学大学院のWitchukreangkrai Eakarut 君，原健悟君，井上智之君に多大なご協力を頂いた。また，（株）シーイーサービスから実構造物に関する貴重な情報を提供して頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 睦好宏史，土田一輝，Matupayont, S., 町田篤彦：外ケーブルPC部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究，土木学会論文集，No. 508/V-26, pp. 67-77, 1995.
- 2) 睦好宏史，山口統央，Matupayont, S., 徳山清治：プレキャストセグメントを用いた外ケーブル式PCはりの曲げ性状および靱性改善に関する研究，土木学会論文集，No. 544/V-32, pp. 155-165, 1996.
- 3) 藤岡篤史，睦好宏史，Aravinthan, T., 新津正義：外ケーブルをデビエータ部定着したPC梁に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 1209-1214, 1997.

- 4) Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Fujioka, A. and Hishiki, Y.: Prediction of the Ultimate Flexural Strength of Externally Prestressed PC Beams, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1233-1238, 1997.
- 5) Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Niitsu, T. and Chen, A.: Flexural Behavior of Externally Prestressed Beams with Large Eccentricities, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.673-678, 1998.
- 6) Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Hamada, Y. and Watanabe, M.: Experimental Investigation on the Flexural Behavior of Two Span Continuous Beams with Large Eccentricities, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.961-966, 1999.
- 7) 篠崎裕生, 渡辺宗樹, 松井敏二, 睦好宏史: 大偏心ケーブルトラス PC 連続桁構造の振動・クリープ特性について, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.535-540, 1999.
- 8) 田村 聖, Aravinthan, T., 三上 浩, 睦好宏史: 大偏心ケーブルを有する 2 径間連続はりの曲げ性状に関する実験的研究, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.563-568, 1999.
- 9) Witchukreangkrai, E., Mutsuyoshi, H., Aravinthan, T. and Watanabe, M.: Analysis of the Flexural Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams with Large Eccentricities, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.817-822, 2000.
- 10) 原健悟, 睦好宏史, Aravinthan, T., 渡辺宗樹: 大偏心外ケーブルを用いたプレキャストセグメント PC 桁の曲げ性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp.823-828, 2000.
- 11) Mutsuyoshi, H., Aravinthan, T., Tamura, S., Watanabe, M. and Shinozaki, H.: New PC Truss Bridge Using External Tendons with Large Eccentricity, *Congress Report - 16<sup>th</sup> Congress of IABSE*, pp.124-125, 2000.
- 12) 小宮正久: 大偏心ケーブル PC 橋の特徴とその設計, プレストレストコンクリート, Vol. 39, No. 2, pp. 40-52, Mar. 1997
- 13) 小川篤生, 本間淳史: 道路橋における大偏心 PC ケーブル橋, プレストレストコンクリート, Vol. 39, No. 2, pp. 23-30, Mar. 1997
- 14) 濱田譲, 竹本伸一, 渡辺宗樹, 篠崎裕生: PC ケーブルトラス桁の曲げ性状に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会 第7回シンポジウム論文集, pp.437-442, 1997
- 15) 前田文男, 崎元達郎, 小幡大輔, 渡辺浩, 伊藤雪: 張弦 PC 橋に関する基礎研究, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 5, pp.31-39, Sep. 1998.
- 16) 小坂寛巳, 川田成彦, 津野和男: 外ケーブルを用いた PC 橋の終局曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 42, No. 613, pp.147-164, 1999.
- 17) 睦好宏史: 大偏心外ケーブル PC 橋の現状, コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.10-16, 2000.
- 18) Virlogeux, M.: The Truc de la Fare Bridge, *Proc. of FIP XIIIth Congress*, Vol.1, Part F, pp.133-138, 1994.
- 19) 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案), (社)プレストレストコンクリート技術協会, 1996.

(2001.1.31 受付)

## FLEXURAL BEHAVIOR OF PC GIRDERS WITH LARGE ECCENTRIC EXTERNAL TENDONS

Hiroshi MUTSUYOSHI, Thiru ARAVINTHAN, Yuzuru HAMADA  
and Muneki WATANABE

An innovative continuous PC girder with large eccentric external tendons was developed for bridge structures. Experimental and analytical investigations were carried out on the flexural behavior of such girders in order to identify the design considerations of such girders. It was found that the structural performance of PC girders with large eccentric external tendons is improved compared with the conventional use of external tendons, by effective use of materials. In addition, considerable flexibility can be achieved in the design of cable layout to suite various site conditions. Further, the analytical methodology developed for external tendons can be extended for these girders as well.