

プレキャストセグメントを用いた外ケーブル式 P C はりの曲げ性状および靱性改善に関する研究

睦好宏史¹・山口統央²・MATUPAYONT Songkiat³・徳山清治⁴

¹正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

²正会員 工修 鹿島建設(株) 建設総事業本部土木設計本部 (〒107 港区赤坂6-5-30)

³Ph.D. International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand

⁴正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所第一研究部第一研究室長 (〒182 調布市飛田給2-19-1)

本研究は、プレキャストセグメントを用いた外ケーブルPC梁の曲げ性状を実験及び解析的に明らかにしたものである。単純梁の荷重実験結果から、プレキャストセグメントを接合する場合、樹脂を使用した場合と使用しない場合では両者の曲げ性状に大きな相違は見られないこと、梁内部に引張鉄筋が連続して配筋されていないため脆性的な破壊性状を示したが、コンクリート圧縮部に拘束筋を配置することにより部材の変形能と破壊性状は大幅に改善されること等が明らかになった。さらに、2スパン連続はりにも適用してその曲げ性状を実験的に明らかにした。

Key Words : *externally prestressed concrete, precast segment, external cable, confined concrete*

1. はじめに

近年コンクリート構造物の省力化施工、高耐久性および生産性の向上が叫ばれている。このような要望に応える構造形式として、外ケーブル式プレストレストコンクリート(以下PC)、プレキャストコンクリート等があげられる。外ケーブル式PCは、シースをコンクリート断面内に配置する必要がないことから、施工を省力化することができ、さらにケーブルの再緊張や取り替えが可能である等の利点を有している。一方、プレキャストコンクリート構造物はコンクリートセグメントを工場や現場の製作ヤードで製造できることから、高品質のコンクリートが製造できるとともに工期の短縮、現場における省力化施工等が可能である。これら二つの構造形式を組み合わせることによって、両者の利点を生かした構造物が可能となる。例えば、プレキャストセグメントを用いた外ケーブルPC(以下PEPC)構造物は、上で述べた利点以外に、ケーブルをウェブ内に配置する必要がないことから外ケーブルPC用プレキャストセグメントとデビエータを規格化して製品化することが可能となる。プレキャストセグメントと外ケーブルを組み合わせたPC橋梁は、海外においていくつかの施工例があるが、わが国ではまだ施工実績はなく、現在日本道路公団が施工している

四国縦貫自動車道の重信川高架橋がわが国で初めてのプレキャストセグメントと内外併用ケーブルを用いた本格的なPEPC橋梁となる。

一般に曲げを受ける外ケーブル部材の破壊は、外ケーブルが降伏する前にコンクリートの圧壊によって決まり脆性的であることが既往の研究によって報告されている¹⁾。緊張材をすべて外ケーブルとしたPEPCの場合には、連続した鋼材が配置されないため、セグメントの接合方法によっては、連続鉄筋を配筋した1体打ちの外ケーブルPC部材よりさらに脆性的な破壊性状になることが考えられる。我が国のような地震国にPEPC構造物を適用していくためには、PEPC桁にもある程度の靱性が必要であると考える。例えば、PEPCをラーメン高架橋のような不静定構造物に適用した場合、地震力により桁にも外力が作用する。この場合、桁の破壊は構造物の崩壊を意味するため、桁には十分な耐力とともにある程度の変形能が必要とされる。従って、一般のRCやPCのように、PEPCを靱性的な構造物に改善できるかが大きな課題となってくる。PEPC構造物を今後我が国において本格的に適用していくためには、上で述べたような問題点を解決しておく必要がある。しかしながら、PEPC部材の変形能に着目した研究はわが国はもちろん海外においてもほとんど行われていない。

本研究では、先ずPEPC単純はりの載荷実験を行い、各種要因が基本的力学的性状に及ぼす影響及び解析手法を明らかにした。次に、PEPC単純はりの靱性能（回転能）を改善する手法を提案して部材実験を行い、靱性能の改善効果を実験的に検証した。さらに、同手法をPEPC2スパン連続梁に適用して、その基本的力学的性状を実験により明らかにした。

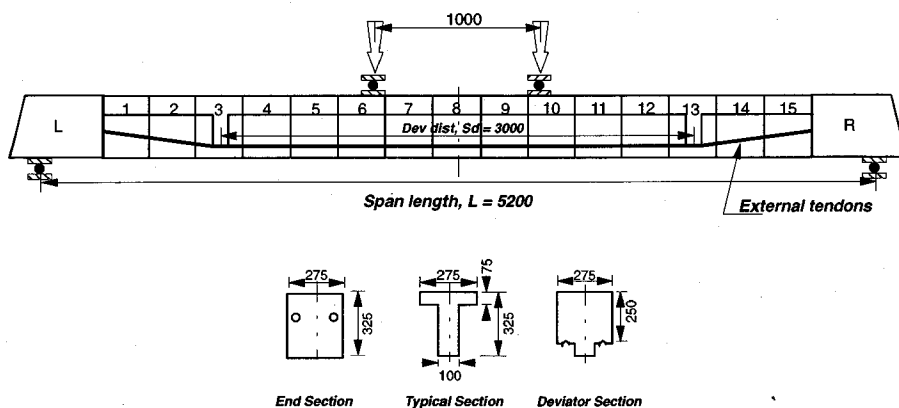
2. PEPC単純はりの載荷実験

(1) 実験概要

供試体の形状寸法及び外ケーブルと補強筋の配置をFig.1に示す。プレキャストセグメント（以下セグメント）の高さはいずれも32.5cmで長さは30.0cm（一部材の全セグメント数15個）または60.0cm（全セグメント数8個）の2種類で、いずれの場合も、はり両端に定着用セグメントを設けている。セグメントに配置した補強筋は、引張鉄筋比0.56%（D10, 3本）、圧縮鉄筋比0.33%（D6, 4本）とし、せん断補強筋にはD6を8cm間隔で配置した。セグメントの接合面の形状は、Fig.2に示すように雄または雌の

シアーキーを一断面に6個設けており、せん断によるずれ、あるいはひびわれが生じないように設計した。セグメントの製作方法は、Fig.3に示すように最初に偶数番号のセグメントを打設し、型枠を取り外した後、硬化したセグメントの接合面を型枠として残りの奇数番号のセグメントを打設する方法を採用した（マッチキャスト方式）。セグメントを組み立てる場合には、セグメント接合面にエポキシを塗布する場合（エポキシジョイント）と何も塗布しない場合（ドライジョイント）の2種類とし、エポキシを塗布した場合には、セグメントをはりの形状に組み立てた後、セグメントを固定するために外ケーブルによりプレストレス（約10kgf/cm²）を導入した。接合に使用したエポキシの圧縮強度は420kgf/cm²および引張強度は193kgf/cm²であった。

実験要因を、Table 1に示す。No.2は、セグメント接合面の接着方法による影響を調べるためドライジョイントとし、他はすべてエポキシジョイントとした。No.3はセグメント長の影響を調べるためセグメント長を60cmとした。No.4は部材変形にともなう外ケーブルの位置変化を防ぐ目的で、梁中央部にもデビエータを設置したもので、計3ヶ所デビエータ



(All dimensions in mm.)

Fig.1 Dimensions of test specimen

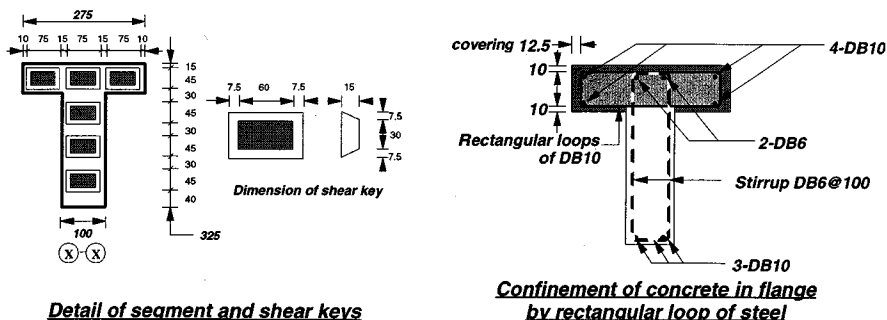


Fig.2 Dimensions of shear key and confinement of concrete (mm)

Table 1 Experimental variables

No.	Description of specimens	Joint condition	Length of segment (cm)	Number of deviators	Type of confinement	Type of tendons	Concrete strength (kg/cm ²)	
1	External PC	Epoxy	30	2	-	SWPR7A-2φ 15.2	369	
2		Dry					356	
3		Epoxy	60	3			385	
4			30	2			D10@50 ^{*1}	351
5							D10@100 ^{*2}	363
6								329
7	Combination of external and bonded internal PC	Monolithic	-	2	-	SWPR7A-2φ 12.4 (ext.) SWPR7A-1φ 12.4 (int.)	333	
8	External PC					SWPR7A-2φ 15.2	385	
9						3	350	
10	Combination of external and bonded internal PC					2	SWPR7A-2φ 12.4 (ext.) SWPR7A-1φ 12.4 (int.)	350

*1 volumetric ratio of confinement reinforcement to that of concrete core = 6.0 %

*2 volumetric ratio of confinement reinforcement to that of concrete core = 3.0 %

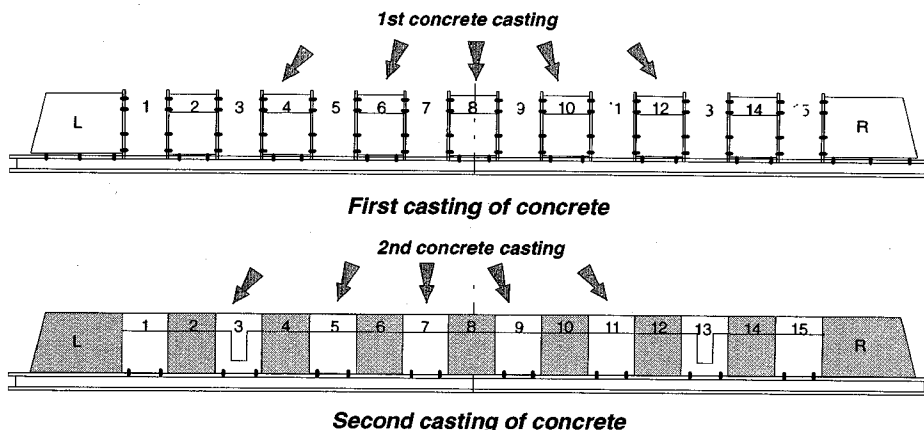


Fig.3 Construction method of precast segmental beam

を有する外ケーブルはりである。PEPCはりの変形能(靱性)を高めるために、コンクリート圧縮部の靱性を改善する手法を採用した。すなわち、コンクリート圧縮部を拘束筋により拘束することによりコンクリートの靱性を改善し、はりの曲げ変形能を改善することを試みた。供試体No.5, No.6では、スパン中央のセグメント5個に圧縮部コンクリートを拘束するための拘束筋が配筋された。No.7は、内ケーブルと外ケーブルを併用した供試体である。内ケーブルについては、セグメントをエポキシにより接合完了後プレストレスを導入しグラウトを行った。上記PEPCはり部材と比較するために、軸方向筋が配置された一体打ちの外ケーブルはり部材が製作された。供試体No.8はデビエータを2個有する通常の供試体で、No.9はデビエータを3個有するもの、No.10は内外ケーブルを併用したものである。外ケーブルに用いたPC鋼より線は全外ケーブルの場合、SWPR7A φ 15.2を2本使用し、内外ケーブル併用型供試体には、全外ケーブルのみの場合とケーブル総断

Table 2 Mechanical properties of cables

Type of Tendon	Sectional Area (mm ²)	Yielding Load (tf)	Ultimate Load (kN)
SWPR 7A φ 12.4	92.9	13.9	16.3
SWPR 7A φ 15.2	138.7	20.8	24.5

面積が等しくなるようにPC鋼より線SWPR7A φ 12.4を内ケーブルに1本、外ケーブルに2本使用した。導入したプレストレス量は全供試体に対し27tfとした。この場合、各ケーブルのプレストレス導入率(導入プレストレス/ケーブルの引張強度)は約55%である。この値は、コンクリート標準示方書⁹⁾および実構造物の設計例¹⁰⁾から定められたものである。Table 2にケーブルに用いたPC鋼より線の材料特性を示す。

載荷方法は油圧ジャッキによる一方向静的載荷で、載荷点間隔を100cmとした。測定項目は、はり中央部、デビエータ位置のたわみ、スパン中央部のセグメントの圧縮縁のひずみ、接合部の開口量、外ケーブルの張力とひずみとした。

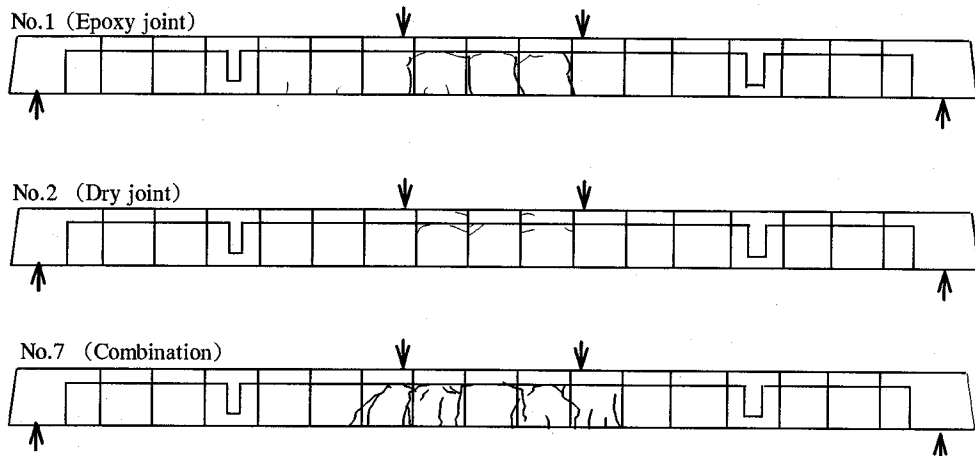


Fig.4 Crack pattern

3. 実験結果

(1) ひびわれ性状

Fig.4 にひびわれ状況を示す。エポキシジョイントの場合、エポキシの引張強度はコンクリートの引張強度よりも大きいため、接合面ではひびわれが生じず、セグメント内に配筋した引張鉄筋の先端部と接合面の間、即ち補強筋がないコンクリート部でひびわれが生じ、これが圧縮縁に向かって進展していった。ドライジョイントの場合では、ひびわれ（または開口）は当然の如く接合面から生じ、荷重の増大とともに接合面が開いていった。内外ケーブル併用型では上記の場合に比べ、ひびわれが分散する傾向がみられた。

(2) 荷重－変位関係

Fig.5(a)は、供試体No.1（エポキシジョイント）、No.2（ドライジョイント）、No.8（一体打ち）の荷重－変位曲線を示したものである。セグメントを用いた供試体は、一体打ち供試体と比べ軸方向筋が連続に配筋されていないため、その耐力はNo.8の80%弱であり、終局時の変位も小さくなるのがわかる。また、接着剤の有無は部材の曲げ性状にほとんど影響を及ぼさない。

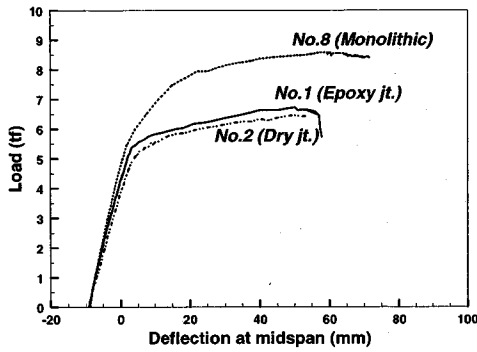
Fig.5(b)はNo.1（セグメント長=30cm）、No.3（同60cm）、No.8の荷重－変位曲線を示したものである。No.3の荷重－変位性状はNo.1とほぼ同様であるが、No.3では変位が45mmを越えたあたりから、耐力が減少しコンクリートの圧壊により破壊に至った。これは、No.3の载荷スパン内にセグメントの継手が1箇所しかないため、この点で回転が集中し、梁上部のコンクリート圧縮部に応力が集中したため圧壊が小さい変位で起こったからであると考えられる。

Fig.5(c)はデビエータをスパン中央にも配置した

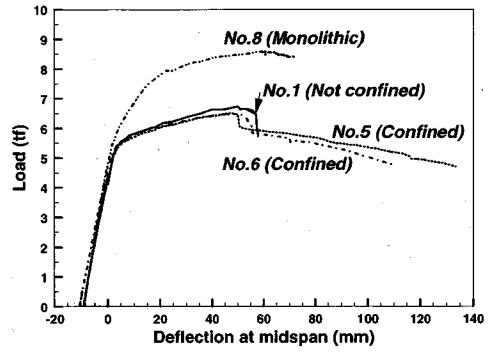
PEPCはり（No.4）と一体打ち外ケーブルPCはり（No.9）の荷重－変位関係とデビエータを2個有する場合の荷重－変位関係とを比較したものである。デビエータを3個有する場合には、外ケーブルの位置変化が生じないため、2個有する場合よりも耐力が大きくなる。ここでは、一体打ちの場合にはこのような現象は認められたが、PEPCはりの場合には顕著な傾向は認められなかった。しかし、終局変位はデビエータを3個有する場合には、ケーブル位置変化による2次モーメントの発生を抑えることができることから、一体打ちおよびPEPCはりの終局変位はデビエータを2個有する場合よりも大きくなることが認められた。

Fig.5(d)は部材の靱性能を改善し、脆性的な破壊を防ぐために、セグメントに拘束筋を配置したPEPCはりNo.5と6、拘束筋を配置していないNo.1および一体打ちのNo.8の荷重－変位曲線を示したものである。曲げを受ける外ケーブル式PC部材の終局破壊性状は一般にコンクリートの圧壊となるため、破壊性状は脆性的となり、靱性を期待することは難しい。ここでは、コンクリートを拘束することによってコンクリートセグメントの圧縮靱性を改善し、外ケーブル部材全体の変形能を高めることを目的とした。図より、拘束筋がないNo.1では65mm程度の変位で圧壊が生じ部材全体が急激に破壊したのに対し、拘束筋を配置したNo.5および6では、耐力は一旦低下するものの、拘束筋により圧縮部のコンクリートは破壊せず、その結果部材の変形能は大幅に改善されることが分かる。このことから、拘束筋を用いたPEPC部材は、従来の曲げ降伏型のPC部材と同様に靱性のある破壊性状を示すことが明らかとなった。

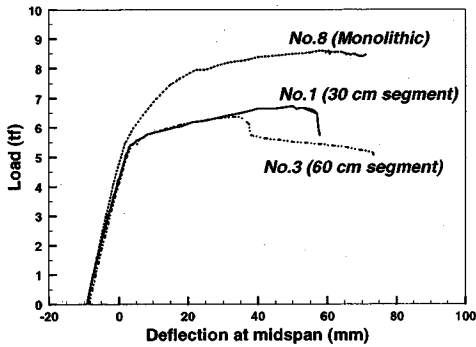
Fig.5(e)は内外ケーブル併用型のPEPCはりNo.7、全外ケーブルPEPCはりNo.1、一体打ち内外ケ



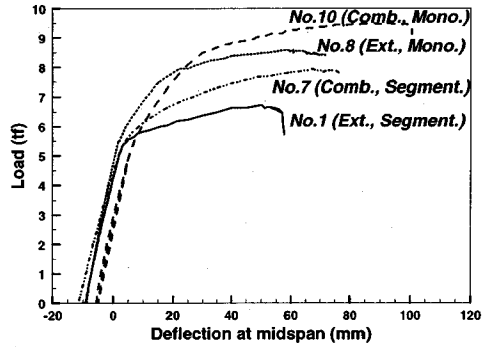
(a)



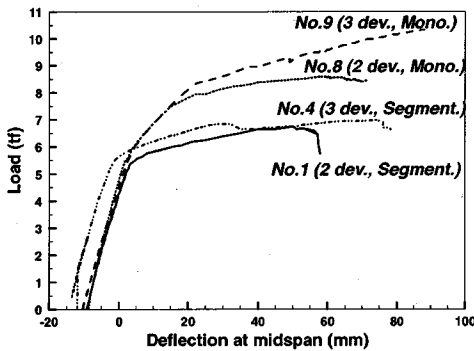
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig.5 Load-displacement curve

ケーブル併用はりNo. 8, 10の荷重-変位関係を示したものである。内外ケーブル併用はりでは、耐力および終局変位ともに大きくなる事が分かる。

(3) 破壊性状

PEPC部材では、荷重が5tf前後でひび割れが発生し、その後ひび割れの進展またはセグメントの開口と共に部材の剛性が小さくなり変形が大きく進行した。最終的な破壊はどの供試体もセグメント継ぎ目部におけるコンクリートの圧壊によるものであ

った。圧縮部コンクリートに拘束筋のないエポキシジョイントを用いた供試体では、コンクリート上縁部のコンクリートが圧壊するとともに荷重が減少し、部材が急激に崩壊した。ドライジョイントによるNo. 2では、最終的に個々のセグメントがバラバラになり崩壊した。これらの供試体の破壊は急激かつ危険なものである。

これに対し、拘束筋を配筋した供試体No. 5, 6では拘束筋より上のかぶりコンクリートが剥落し、荷重がやや低下した後、変位が大きく増大していった。拘束筋がない供試体と比較して、その破壊性状は緩慢であり、最後は変形のみ増大して崩壊には至らなかった。すなわち拘束筋を配置することにより曲げじん性を大幅に改善できることが明らかとなった。

4. 曲げを受けるPEPC部材の解析

(1) 解析概要

外ケーブル式PCはりとは通常のパンド式PCはりとは異なり、コンクリートとケーブルの間に付着が無いためケーブルの歪とケーブル位置のコンクリート歪は一致しない。また、変形の増大に伴うケーブル位置の変化が生じ、これを解析に考慮する必要がある。ここでは著者が既に開発した一体打ち外ケー

Table 3 Comparison of test results with calculated values

No.	Cracking load (tf)			Flexural strength (tf)			Tendon force (tf)		
	Exp.	Cal.	Exp./Cal.	Exp.	Cal.	Exp./Cal.	Exp.	Cal.	Exp./Cal.
1	5.0	5.3	0.94	6.7	6.7	1.00	35.5	37.6	0.94
2	4.8	5.1	0.94	6.5	6.7	0.97	34.3	36.9	0.93
3	5.0	5.3	0.94	6.4	6.8	0.94	32.6	37.0	0.88
4	5.3	5.5	0.96	7.0	8.7	0.80	38.5	42.2	0.91
5	5.2	5.3	0.98	6.5	6.9	0.94	39.9	40.8	0.98
6	5.1	5.2	0.98	6.5	6.5	1.00	38.5	38.3	1.01
7	4.9	5.4	0.91	7.9	7.6	1.04	39.0~	41.7	-
8	5.5	5.3	1.04	8.6	8.6	1.00	37.9	37.7	1.01
9	5.5	5.3	1.04	10.3	10.6	0.97	41.8	42.3	0.99
10	5.0	5.3	0.94	9.5	9.6	0.99	40.7~	41.3	-

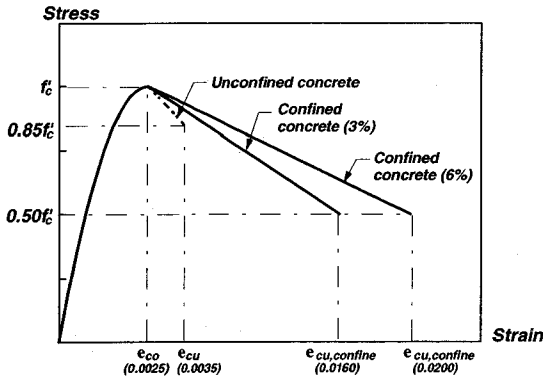


Fig.6 Stress-strain curve for confined concrete

ブル式PCはりの解析手法¹⁾をPEPCはりにも適用し、その挙動を解析により明らかにした。

一体打ち外ケーブル式PCはりの解析手法をPEPCに適用するにあたり、以下の仮定を新たに設定した。

(a) ドライ接合の場合、コンクリートおよびセグメント内に配筋された鉄筋の引張力は無視した。エポキシ接合の場合、コンクリートおよび鉄筋はひび割れが生じるまで引張力を受け持つものとした。なお、いずれの場合も、せん断力によるセグメント間のずれ等は生じないものとした。

(b) 拘束筋を配したコンクリートの応力-ひずみ関係はFig.6⁸⁾に示すようにモデル化した。なお、No.5とNo.6では拘束鉄筋比が異なるので、それぞれの鉄筋比に応じて応力-ひずみ関係をモデル化した。

(2) 解析結果

Table 3 に実験結果と解析結果を示す。ひび割れ発生荷重では解析値は実験値とほぼ等しく、最大曲げ耐力においても(実験値/解析値)の値は、供試体No.4を除きよい一致を示している。終局変位では、解析値は全体的に大きな値となっており、特にセグメント長60cmの供試体No.3では実験値と大きく異なっている。これは、前に述べたように、セグメント

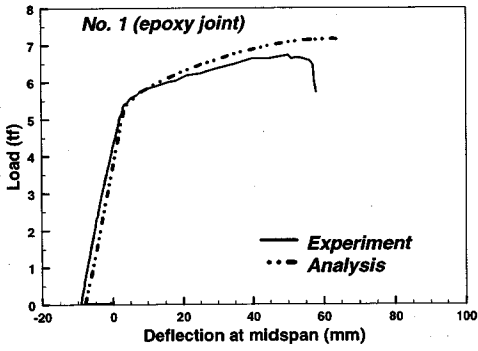
継ぎ目が荷重スパン内に一箇所しかなく、そこに変形が集中したことによるものである。終局時のケーブル張力については(実験値/解析値)の値は88~101%の範囲にありよく一致している。Fig.7 は解析および実験から得られた荷重-変位関係を示す(No.1,2,3,5,6,7)。No.3 (セグメント長が60cm)における変位を除いて、解析結果は実験値と概ね良く一致している。セグメントを拘束したNo.5,6においても、拘束したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いることによって最大耐力以降の性状をよく表しているといえる。Fig.8 は解析および実験から得られた荷重-ケーブル張力関係を示したものである。解析結果は実験結果と良く一致している。

以上述べてきたように、PEPC部材の曲げ性状は、先に提案された外ケーブルPC部材の解析手法をプレキャストセグメント用に修正することにより精度よく計算できることが明らかとなった。

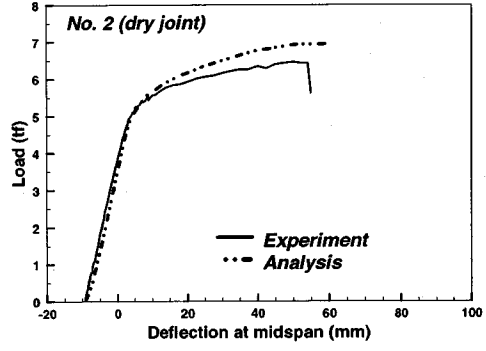
5. 曲げ耐力の検討

PEPC部材の曲げ性状および曲げ耐力は、前章までに述べてきた方法により精度良く求めることが可能である。しかし、実際の設計には複雑であるため、より簡便で精度の良い曲げ耐力算定式を確立する必要がある。しかしながら、現状では外ケーブル式PC部材の曲げ耐力は、アンボンドPC部材の設計法に基づいている場合がほとんどである。ここでは、既往のアンボンド式PCはりの曲げ耐力算定式の中で、最も精度がよいと言われるNaaman等による提案式⁶⁾、陸好らが提案した外ケーブル式PCはりの曲げ耐力算定式⁴⁾、土木学会による方法、前章で示した精算法を用いてPEPCはりの曲げ耐力を検討した。

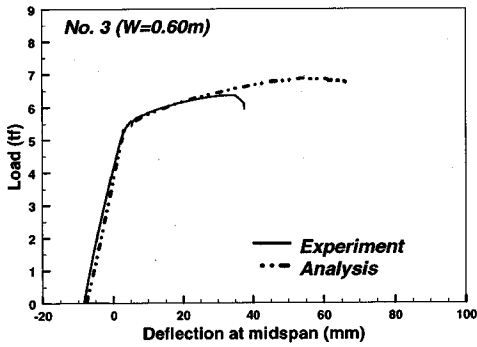
Table 4 は曲げ耐力の計算値および実験値を示したものである。Naaman式による値は実験値よりかなり大きくなるのが分かる。これは、変位の増加に



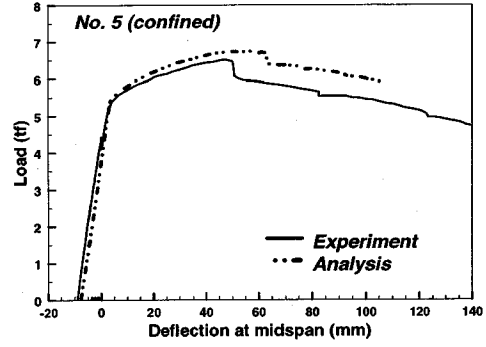
(a)



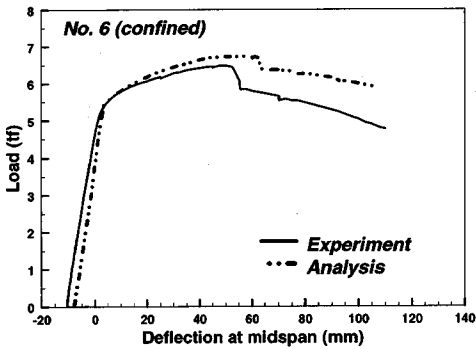
(b)



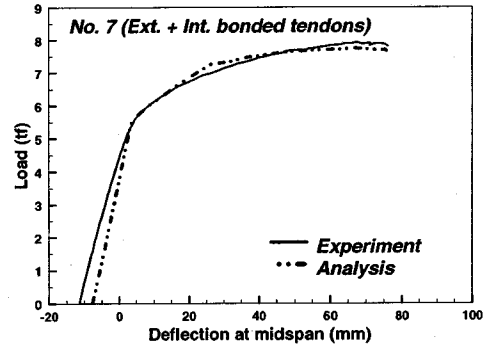
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig.7 Load-displacement curve

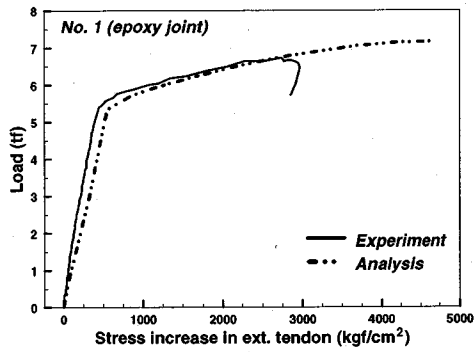
対するケーブル位置の変化すなわち偏心量の変化が計算式に考慮されていないためである。睦好らによる式では同様にして計算値は実験値よりもやや大きな値を示している。現在の示方書ではアンボンドPCの曲げ耐力の考え方のみ明記されており、計算式は確立されていない。従って、示方書による計算値は実験値よりも小さな値となっている。また、プレキャストセグメント用に修正した精算法では、計算値は実験値と概ねよい一致を示している。外ケーブルPC部材の終局時におけるケーブルの張力増分量

は無視できない大きさであり、これを耐力の算定に考慮することが必要である。また、外ケーブルPC、PEPC、内外ケーブル併用型等の構造物毎に精度よい設計法を今後確立する必要がある。

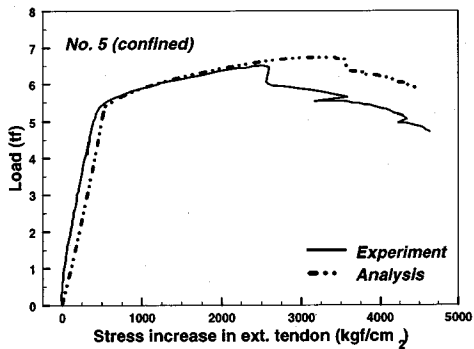
6. 2スパンPEPC連続はりへの適用

(1) 概要

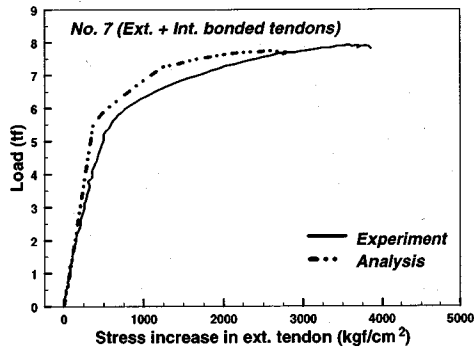
PEPCを実際の構造物に適用する場合、経済性、車の走行性等から連続桁あるいは高架橋への適用が



(a)



(b)



(c)

Fig.8 Load-stress increase of external cable

考えられる。桁を設計する場合、死荷重および活荷重等による上載荷重に対して耐力あるいは応力により照査され、設計が行われることが一般的である。しかし、ラーメン高架橋のような場合では、地震力により桁にも外力が作用する。従って、このような場合には桁においても耐力のみならずある程度の変形能が必要になってくる。ここでは、PEPC構造物が高架橋のような不静定構造物に適用される場合を考えて、2スパン連続はりを製作して載荷実験を行い、基本的曲げ性状、拘束筋を配したセグメントが部材が降伏した後の回転性能におよぼす影響等を実験的に明らかにした。

(2) 実験概要

供試体の形状寸法及びケーブルの配置をFig.9に示す。セグメントの長さは30cmで(全セグメント数25個)、はり両端に定着用セグメントを設け、梁中央支点セグメントにはコンクリート製のデビエータを設置した。セグメントに配置した補強筋、接合面の形状及び製作方法は、単純梁と同一である。ケーブルの有効高さは、スパン中央で22.5cm、中央支点上で17.5cm(梁上面から15cm)とした。

載荷方法は油圧ジャッキによる一方向静的片スパン2点載荷とし、両スパン4点に荷重が均等にかかるように載荷した。

実験要因をTable 5に示す。供試体No.1は一体打ちした部材で、No.2は、拘束筋を用いていないセグメントによるPEPC部材、No.3ではスパン中央の3セグメント(セグメント番号5,6,7及び19,20,21)と中央支点上の3セグメント(12,13,14)の計3ヶ所を拘束したものである。使用したケーブルは、PC鋼より線SWPR7A ϕ 12.4を2本使用し導入プレストレスを18tfとした。

(3) 拘束筋が部材の荷重-変形関係におよぼす影響

Fig.10に実験より得られた各供試体の荷重-左スパンおよび右スパン中央の変位関係をそれぞれ示

Table 4 Comparison of flexural strength based on existing equations

Specimen No.	Flexural strength (tf)				
	Experiment	Mutsuyoshi	Naaman	Analysis	JSCE
1	6.7	7.2 (0.93)	8.3 (0.81)	6.7 (1.00)	6.1 (1.10)
2	6.5	7.2 (0.90)	8.2 (0.79)	6.7 (0.97)	6.1 (1.07)
3	6.4	7.3 (0.88)	8.3 (0.77)	6.8 (0.94)	6.1 (1.05)
4	7.0	7.0 (1.00)	8.2 (0.85)	8.7 (0.80)	6.1 (1.15)
5	6.5	7.3 (0.89)	8.2 (0.79)	6.9 (0.94)	6.1 (1.07)
6	6.5	7.1 (0.92)	8.1 (0.80)	6.5 (1.00)	6.0 (1.08)
7	7.9	-	-	7.6 (1.04)	-
8	8.6	9.6 (0.90)	9.9 (0.87)	8.6 (1.00)	7.3 (1.18)
9	10.3	11.1 (0.93)	9.9 (1.04)	10.6 (0.97)	7.3 (1.41)
10	9.5	-	-	9.6 (0.99)	-

(): Experimental values/Calculated values

Table 5 Experimental variables for 2-span continuous beam

No.	Description of specimens	Joint condition	Type of confinement	Type of tendon	Applied prestress force (tf)	Concrete strength (kg/cm ²)
1	Mono (monolithic beam)	Monolithic	D10@50	SWPR7A-2φ 12.4	18.13	396
2	Seg-NC (precast segment)	Epoxy	-		18.22	421
3	Seg-AC (precast segment)	Epoxy	D10@50		17.98	372

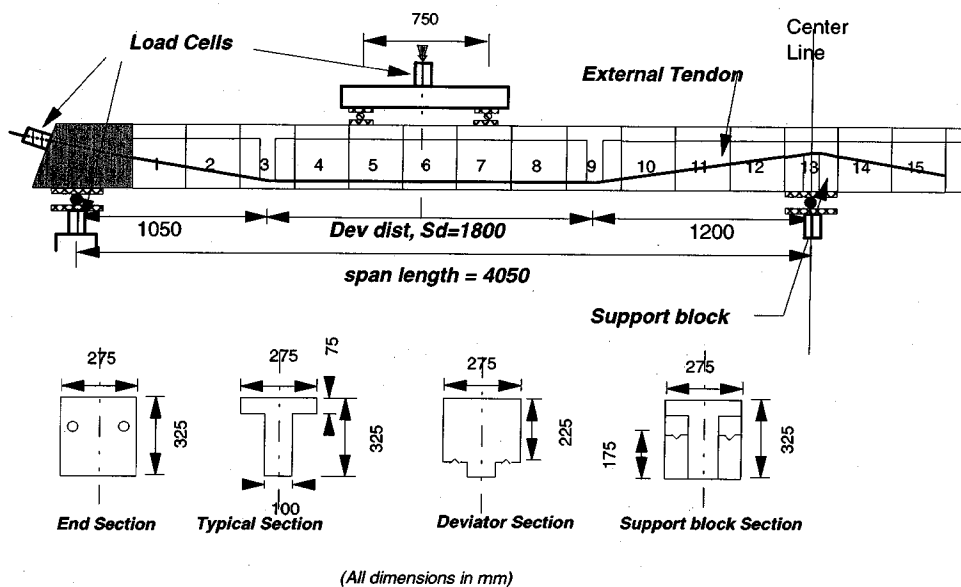


Fig.9 Dimensions of 2 span continuous beam

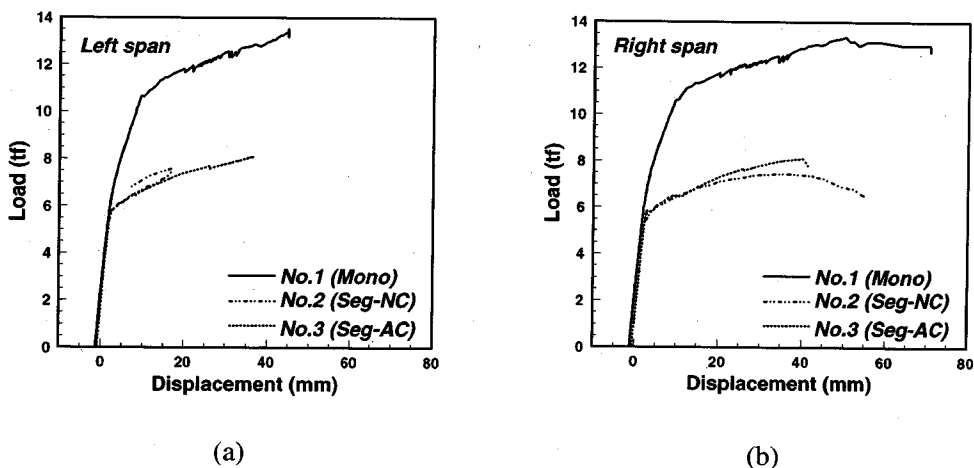


Fig.10 Load-displacement curve

す。一体打ち供試体 (No.1) では、ひび割れ発生、内部補強筋の降伏と変遷し、左右スパンとも十分な塑性変形能を示しているのがわかる。なお、No.1供試体には、引張鉄筋 (D10が3本) と圧縮鉄筋 (D6が4本) が配置されているので⁴⁾、その分耐力が他のPEPC部材よりも大きくなっている。PEPC部材でセグメントに拘束筋を配筋していない供試体

(No.2) では、中央支点上のセグメントに破壊が生じ、安定した塑性ヒンジが生成されなかったため片側のスパンにのみ破壊が集中し、左右アンバランスな荷重-変位性状となっているのがわかる。一方、セグメントを拘束した供試体 (No.3, 4) では、両スパンとも同様の変形性状を示している。このことは両スパン中央部 (あるいは載荷スパン内) および中央支点において良好な塑性ヒンジが生成されるとともに、拘束筋の効果により十分な塑性回転能が示されたと考えられる。今回の場合、左右スパン中央部と中間支点部においてほぼ同時に降伏モーメントに達したために、モーメント再分配の顕著な現象は確認できなかった。しかし、モーメントが最大となる箇所のセグメントを拘束することにより、十分な回転能を付与することができ、安定した塑性ヒンジの生成が期待できることが明らかとなった。

7. まとめ

プレキャストセグメントと外ケーブルPC部材の基本的曲げ性状を実験および解析から明らかにするとともに、このような部材の欠点である、回転能 (靱性能) が小さいことおよび破壊性状が脆性的であること等を改善するために、プレキャストセグメントの圧縮部のコンクリートを拘束することによって部材の靱性を高める手法を提案し、これを実証した。さらに、同部材を連続桁に適用し、その曲げ性状も明らかにした。本研究から以下のことが明らかとなった。

- 1) エポキシジョイントの場合、エポキシの引張強度はコンクリートの引張強度よりも大きいため、接合面ではひびわれは生じず、セグメント内に配筋した鉄筋の先端部と接合面の間でひびわれが生じた。ドライジョイントの場合では、ひびわれ (または開口) は接合面から生じた。
- 2) 一体打ちの供試体では、コンクリート内部に配筋した鉄筋が降伏するまで荷重が増加するのに対して、PEPCはりでは、引張補強筋が連続して配筋されていないため、ひびわれ発生後の荷重増加は少なく、最終的にはコンクリートの圧壊により破壊する。これに対し、拘束筋を配置したはりでは、拘束筋によ

り圧縮部のコンクリートは破壊せず、部材の変形能と破壊性状は大幅に改善されることが明らかとなった。

3) 内外ケーブル併用型のPEPCはりでは、ひび割れ性状はボンド式とほぼ等しくなり、変形能も全外ケーブル式PEPCはりに比べ大きく改善された。

4) 変形の適合条件および外ケーブルの位置変化を考慮した解析手法により、PEPCはりの曲げ挙動を計算により精度よく求めることが可能である。

5) PEPCを2スパン連続はりに適用し、上述した靱性改善効果を実験的に検討した。その結果、セグメントを拘束した部材では、靱性のある安定した塑性ヒンジが生成され、その効果が確かめられた。

謝辞： 本研究を行うにあたり、埼玉大学町田篤彦教授から貴重な御助言を、埼玉大学学生諸氏に実験のご協力を頂いた。また、(株)住友電工、ショーボンド建設 (株) から実験材料の一部を提供して頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 外ケーブル方式プレストレッシング (その1)、プレストレストコンクリート, Vol. 33, No. 4, pp65~89, 1991.
- 2) 例えば、若林、沼田、一樹、玉置：外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する一考察、第16回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 1021~1026, 1994.
- 3) 土田、睦好、MATUPAYONT、谷口：外ケーブル式PCはりの曲げ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集第16巻2号, Vol. 16, No. 2, pp. 1009~1014, 1994.
- 4) 睦好、土田、MATUPAYONT、町田：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.
- 5) 六車、渡辺、西山：アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 1, pp10~16, 1984.
- 6) Naaman, A.E. and Alkhairi, F.M.: Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons-Part 2: Proposed Methodology, *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov-Dec., pp. 683~692, 1991.
- 7) 梅原、田辺、吉田：鋼材の付着状態を考慮したPCラーメンの履歴挙動に関する研究、土木学会論文集, 第396号/V-9, pp. 89~98, 1988. 8.
- 8) Park, R. and Paulay, T.: *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons, 1995.
- 9) コンクリート標準示方書 [平成3年度版] 設計編, 土木学会.

10) 平成4年度 松山自動車道 PCプレキャストブ
ック工法に関する技術検討報告書, 財団法人 高
速道路技術センター, 平成5年3月

11) *External Prestressing in Bridges*, ACI, SP-120, 1990.

(1995.10.12 受付)

FLEXURAL BEHAVIOR AND IMPROVEMENT OF DUCTILITY OF PRECAST SEGMENTAL PC BEAMS WITH EXTERNAL TENDONS

Hiroshi MUTSUYOSHI, Tsunehisa YAMAGUCHI, Songkiat MATUPAYONT
and Seiji TOKUYAMA

This paper describes experimentally and analytically the flexural behavior of precast segmental externally prestressed beams. From the test results, it was observed that there is little difference in the flexural behavior between epoxy joint and dry joint. The failure modes of such beams are brittle due to non continuity of reinforcement across the segments. The ductility of the member and failure mode could be improved by confining the concrete in the compression zone. Using the above method, the flexural behavior of two span continuous beam was clarified experimentally.