

(2) 外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する研究

首都高速道路公団 正会員 ○ 柄川 伸一  
 同 上 沼田昌一郎  
 同 上 一樹 久允  
 同 上 若林 登

1. はじめに

近年、わが国においても外ケーブル方式に対する関心は高まってきているが、諸外国に比べて、その基準化の遅れは否めない。特に、曲げ終局耐力の算定法については、道路橋示方書およびコンクリート標準示方書において、外ケーブル(アンボンドケーブル)構造は、従来のボンドケーブル構造の70%と規定されているのみである。本研究では、外ケーブル構造の曲げ終局耐力を、外ケーブルひずみとその位置におけるコンクリートひずみについて、部材長方向の変形適合条件を導入した精算法<sup>1)</sup>により算定した。その精度をスパン10mのT断面桁による静的曲げ破壊試験によって検証した。さらに、外ケーブル構造の曲げ終局耐力が低下するメカニズム、および外ケーブル構造では荷重状態の相違によって曲げ終局耐力が変化するメカニズムを明らかにした。

2. アンボンド構造による耐力低下機構

PC構造物においても、図-1に示すように、クラック発生荷重以後はRC構造物と同様に、断面内のアーム長 $a$ は有効高 $d$ に近づき、ほぼ一定となる。そして、コンクリートの圧縮合力 $C$ とPC鋼材張力 $T$ が曲げモーメントの増加に伴って増大することにより、外力に抵抗する。

換言すれば、スパン中央断面において、曲げびび割れ発生以後、同一載荷モーメント時のPC鋼材張力は、ボンドケーブル、アンボンドケーブル、外ケーブルいずれの場合も等しくなると仮定できる。<sup>2)</sup>

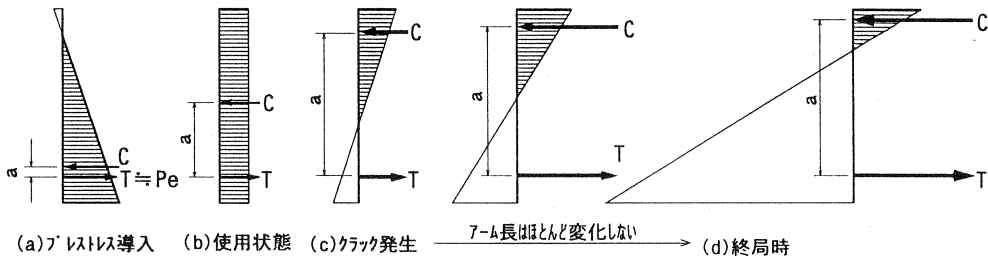


図-1 荷重の増加に伴うPC断面のひずみ分布遷移

2. 1 アンボンド構造

外ケーブルおよびアンボンドケーブル構造では、ケーブルに付着がないために、PC鋼材位置のコンクリートひずみとPC鋼材ひずみは一致せず、断面における平面保持の仮定が成立しない。

外ケーブル構造のPC鋼材ひずみ増加量分布は、付着がないために矩形分布となり、その値は先の仮定よりボンドケーブルの最大値と等しくなる。載荷モーメントによるPC鋼材位置のコンクリートひずみ分布は桁端部でほぼゼロであり、そのひずみ分布面積(全伸び量)は部材長方向の変形適合条件からPC鋼材ひずみ分布面積と等しくなり、図-2に示すようにクラック発生断面において外ケーブルひずみよりも大きくなる。つまり、外ケーブル構造のコンクリートひずみは、ボンドケーブル構造のそれに比べて大きくなるこ

とがわかる。

中央断面(クラック発生断面)における高さ方向のひずみ分布を図-3に示す。

外ケーブル構造は、ボンドケーブル構造と比べてPC鋼材ひずみが等しく、PC鋼材位置でのコンクリートひずみが大きくなる。断面内の釣合い条件から、張力Tが等しいので、圧縮合力Cも、両者は等しくなる。すなわち、外ケーブル構造の中立軸はボンドケーブル構造

に比べ上方に位置し、圧縮合力Cが等しくなるという条件の為には、桁上縁ひずみはボンドケーブル構造よりも外ケーブル構造の方が大きくなる事が分かる。

以上より、外ケーブル構造(アンボンドケーブル構造)は、原理的にボンドケーブル構造に比べて、コンクリートひずみが卓越する構造といえる。

さらに外ケーブル構造では、アンボンドケーブル構造に対して、図-4に示すように、桁の変形に伴い、デビエータ間においてPC鋼材と桁図心軸との偏心距離が変化する。このために、外ケーブル構造桁の曲げ終局耐力は、コンクリート内にPC鋼材が配置されてアンボンドケーブル(インナー)いるアンボンドケーブル構造桁よりも低下するものと考えられる。

## 2.2 実験による検証

スパン長10m、桁高70cmのT桁において、グラウトによる付着(ボンド)を有する内ケーブル構造桁と中間保持点(デビエータ)を2ヶ所有する外ケーブル構造桁の静的曲げ破壊試験を行った。荷重スパンは1.4mとし、2点荷重である。図-5に試験体形状を示す。

中央断面における、PC鋼材ひずみ増加量とコンクリート上縁ひずみをそれぞれ図-6、図-7に示す。

荷重によるPC鋼材ひずみ増加量は、ボンドケーブル構造(No.1)、外ケーブル構造(No.2)ともにほぼ等しく、先の仮定が検証された。計算値は、No.1に関しては、従来通りの中央断面における平面保持の仮定から算出しており、No.2に関しては、部材長方向の変形適合条件から鋼材ひずみを算出したものである。計算値と実験値はよく一致している。

また、荷重モーメントによるコンクリート上縁ひずみについては、外ケーブル構造(No.2)の場合、

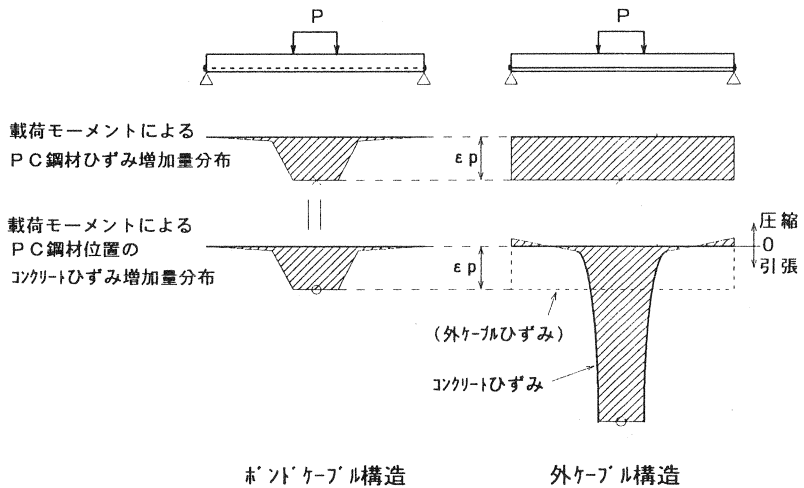


図-2 荷重モーメントによるひずみ増加量分布

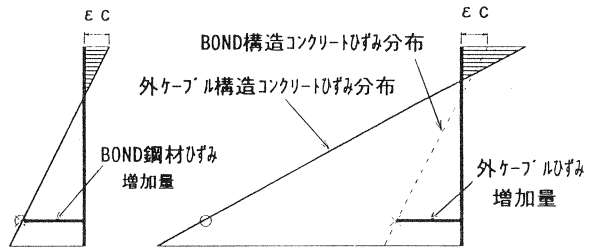


図-3 スパン中央断面におけるひずみ分布

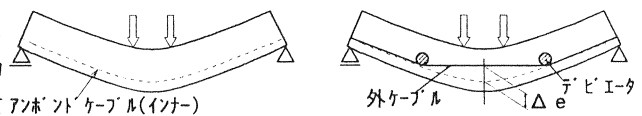


図-4 偏心量の変化による終局モーメント補正の概念

クラック発生後の急激な増大が顕著である。さらに、桁の変形に伴うケーブル偏心距離の影響を考慮した計算値は実験値をよく再現している。

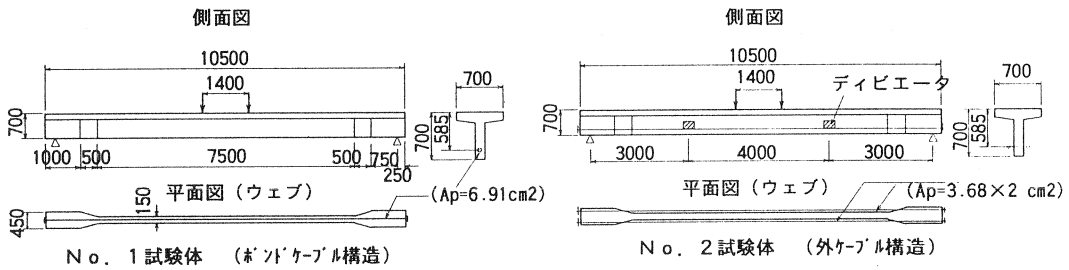


図-5 試験体形状

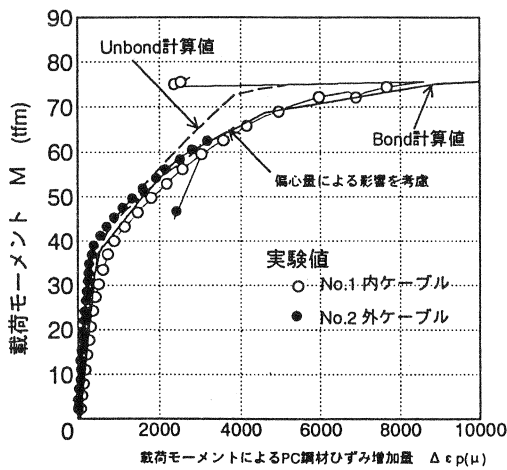


図-6 中央断面におけるPC鋼材ひずみ増加量

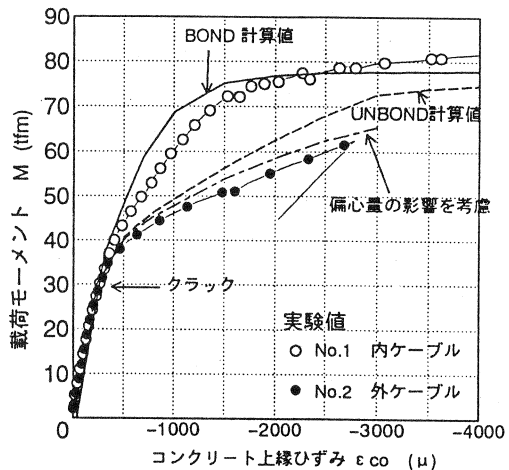


図-7 中央断面におけるコンクリート上縁ひずみ

なお、実験結果の解析では、以下に示す各種曲げ終局耐力算定法の比較を行った。

- A: 外ケーブルをボンドケーブルと仮定
- B: Aで算定した耐力の70%の耐力  
(道路橋示方書等)
- C: 初期導入張力を外力扱い。外ケーブル張力の増加を無視 (SETRA等)
- D: 部材長方向の変形適合条件を適用した精算法

表-1 曲げ終局耐力の比較

	実験値 Mu (tf・m)	計算値 (tf・m)				
		A ボンド と仮定	B A×0.7 道示	C 外ケーブル 外力扱い SETRA	D 精算法 アボント と仮定	
No. 1	87.5	83.4	—	—	—	—
No. 2	68.2	86.1	60.3	47.3	79.5	71.1
(計/実)	(1.00)	(1.26)	(0.88)	(0.69)	(1.17)	(1.04)

曲げ終局耐力について、実験値と各種計算法を比較したものが表-1である。精算法による計算値Dを、さらに、前出図-4で示したPC鋼材の偏心量の減少(実験結果をフィードバック)を考慮して補正を行った計算値D'は実験値とよく合致しており、外ケーブル構造の曲げ終局耐力算定において最も精度の良い算定法であると考えられる。

### 3. 荷重状態が曲げ終局耐力におよぼす影響

#### 3.1 荷重状態による影響

全く同一の外ケーブル構造桁に、中央断面における荷重モーメントが同一となるように、一方にはスパン中央集中荷重、もう一方には荷重スパンを広くとった荷重状態におけるPC鋼材位置のコンクリートひずみ分布の概念図を図-8に示す。

同一荷重モーメントにおいて、ひびわれ発生断面におけるPC鋼材張力増加量は、前述のようにボンド構造、外ケーブル構造いずれの場合も等しくなると仮定すると、図-8の両者の外ケーブル張力は等しく、ケーブルひずみは図中に点線で示す矩形分布となる。この矩形分布の面積(荷重荷重によるPC鋼材伸び量)と等しくなるようなPC鋼材位置のコンクリートひずみは、

実線で示すように中央集中荷重の方がより卓越することになる。したがって、コンクリート上縁ひずみも同様に卓越する。以上のことから、外ケーブル構造では、ボンドケーブル構造とは異なり、荷重状態(荷重スパン)の相違によって曲げ終局耐力は変化し、荷重スパンが小さくなるにしたがい小さくなると考えられる。

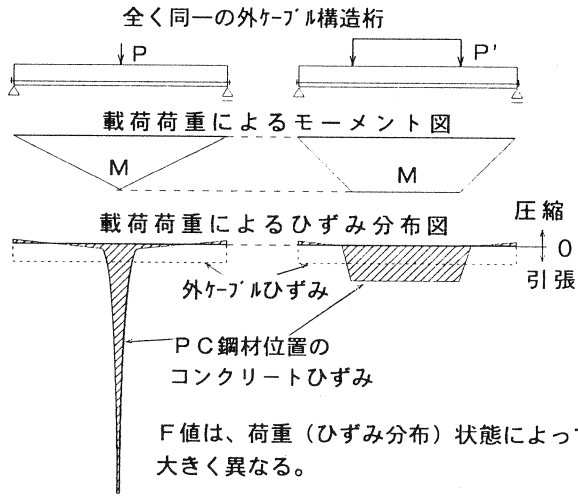


図-8 荷重モーメントによるひずみ増加量分布

#### 3.2 実験による検証

試験体は、前出図-5と同桁であるが、図-9に示すように荷重スパン長を0.3m、1.4m、4.0mとした外ケーブル桁3体と荷重スパン長1.4mのグラウトによる付着を有する内ケーブル桁1体による静的曲げ破壊試験を行った。なお、外ケーブル桁には、1スパン内にローラー付きのデビエーターを4個配置し、荷重に伴う外ケーブル偏心量の変化による影響および外ケーブル~デビエーター間の摩擦の影響を排除している。これにより、外ケーブル桁は、桁内に付着のないPC鋼材を配置したアンボンドケーブル桁と同等となり、アンボンドとしての計算結果を補正することなく適用できると考えた。以下、実験結果および解析結果を示す。

図-10に荷重モーメントとPC鋼材ひずみ増加量の関係を示す。PC鋼材ひずみ増加量は、同一荷重モーメント時と比較すると、全ての試験体においてほぼ等しいものとなった。なお、図中の計算値は、精算法によるものである。また、PC鋼材の初期導入ひずみは全て4600 $\mu$ であり、降伏ひずみは材料試験結果より約8800 $\mu$ であったことから、ひずみ増加量が4200 $\mu$ に達した時に、PC鋼材は降伏したと推察される。

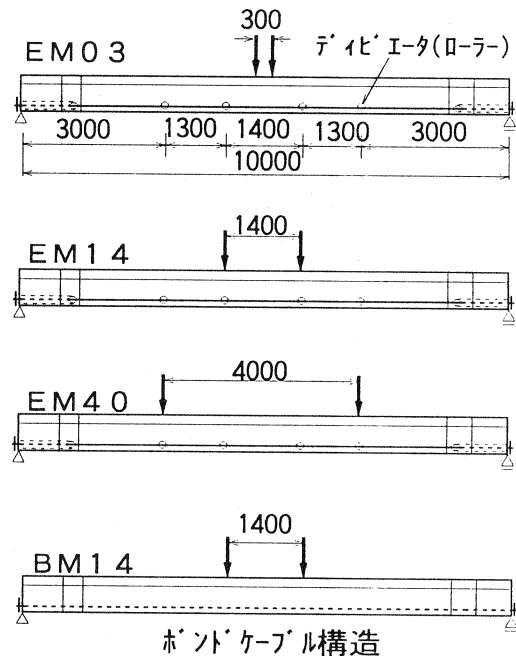


図-9 試験体形状

図から、曲げ破壊時において、EM03桁の外ケーブルは降伏しておらず、EM40桁の外ケーブルは降伏していることがわかる。EM40桁のように、PC鋼材に付着を有しない外ケーブル構造であっても、載荷スパンが大きくなれば、曲げ破壊時において外ケーブルは降伏し、ボンドケーブル構造と等しい曲げ耐力を有することが確認された。

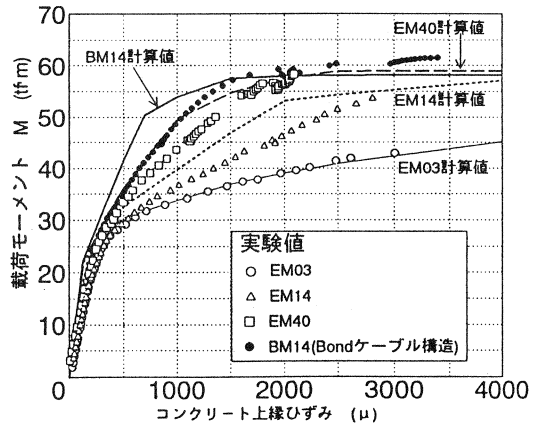
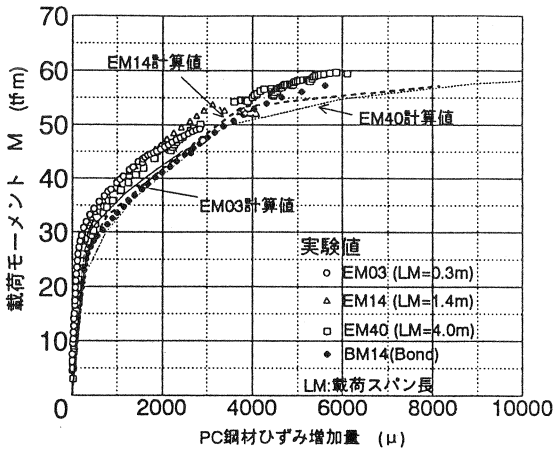


図-10 載荷モーメントとPC鋼材ひずみ増加量 図-11 中央断面におけるコンクリート上縁ひずみ

図-11に、中央断面におけるコンクリート上縁ひずみを示す。

クラック発生モーメントは、いずれの試験体も24tf·m程度であり、計算結果とほぼ一致した。外ケーブル構造では、クラック発生後から急激にコンクリートひずみが増加し、載荷スパンが小さい程その傾向は顕著である。精算法により求めた計算値は、これらの傾向を定性的、定量的によく表している。

なお、精算法におけるひずみの適合条件係数F値を求めるためには、非常に煩雑な収束計算を要する。そこで、このF値をより簡易に求める近似解法の提案を試みた。すなわち、クラック発生断面を載荷スパン内のみと仮定し、せん断スパン内のPC鋼材位置でのコンクリートひずみをゼロと仮定すると、PC鋼材位置でのコンクリートひずみ分布は、図-12に示す長方形と近似することができ、部材長方向の変形の適合条件から、次式が得られる。

$$F = \epsilon_p / \epsilon_{cp}$$

$$\lambda = L_m / L$$

$$= \epsilon_p / \epsilon'_{cp} \approx F \quad (L_m \cdot \epsilon'_{cp} = L \cdot \epsilon_p)$$

ここで、 $L_m$  : 載荷スパン長

$L$  : 桁全体のスパン長

$\epsilon_{cp}$ 、 $\epsilon'_{cp}$  : 中央断面におけるPC鋼材位置のコンクリートひずみ

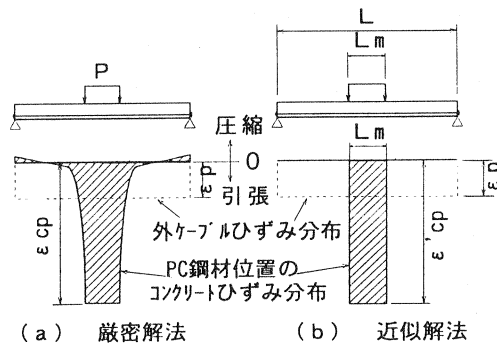


図-12 近似解法概念

以上のことから、F値は、近似的に載荷スパン長と全スパン長の比λで表すことができる。スパン中央集中荷重の場合にはゼロとなり、この場合には、外ケーブルは載荷モーメントによって全く張力増加しないことを表し、前出(C)の算定法と同値となる。

曲げ終局耐力について、実験値と各種計算法を比較したものを表-2および図-13に示す。曲げ終局耐力の算定法としては、従来の道路橋示方書(B)や初期導入張力を外力として扱うSETRA(C)では荷重状態の影響が全く評価されていないのに対して、部材長方向の変形適合条件を適用した精算法(D)は、荷重状態の影響も適切に評価し、定量的にも非常に信頼性が高いものであることが確認された。また、今回提案した近似解法(E)も、載荷スパンが小さくなると若干誤差が生じる傾向はあるが、曲げ終局耐力算定法としては、十分な精度を有していることが確認された。

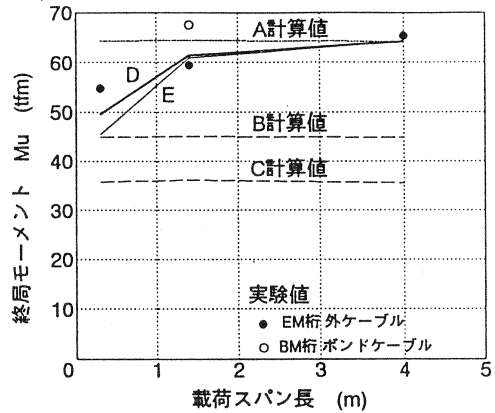


図-13 曲げ終局耐力の比較

表-2 曲げ終局耐力の比較 ( )は実験値に対する比率

	載荷スパン (m)	実験値 Mu (tf・m)	計算値 (tf・m)				
			A ボンドと仮定	B A×0.7	C 外力扱	D 精算法	E 近似解法
EMC3	0.3	54.8(1.00)	64.3(1.17)	45.0(0.82)	35.8(0.65)	49.6(0.91)	45.5(0.83)
EM14 外ケーブル	1.4	59.4(1.00)	64.4(1.08)	45.1(0.76)	36.2(0.61)	61.4(1.03)	60.9(1.03)
EM40	4.0	65.3(1.00)	64.2(0.98)	44.9(0.69)	35.6(0.55)	64.2(0.98)	64.2(0.98)
EM14 内ケーブル	1.4	67.5(1.00)	63.5(0.94)	—	—	—	—

#### 4. おわりに

本研究によって得られた知見を要約すると以下ようになる。

- ① 外ケーブル構造では、載荷スパンが小さくなるほど曲げ終局耐力は低下することが確認された。
- ② 曲げ終局耐力の算定法としては、部材長方向の変形適合条件を適用した精算法は、荷重状態の影響も適切に評価し、定量的にも信頼性が高いものであることが確認された。
- ③ 近似解法も十分な精度を有していることが確認された。今後、設計荷重に応じた荷重状態を適切に評価できるλを予め設定することができれば、外ケーブル構造においても、部材長方向の変形適合条件を簡易な方法で現設計手法に取り入れることが可能とされる。<sup>3)</sup>

なお、これに関する実験はP C建協に委託し、住友建設(株)技術研究所において実施した。

#### 参考文献

- 1)六車・渡辺・西山：70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, PP. 10~16, 1984
- 2)若林・沼田・一桝・玉置：外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, PP. 1021~1026, 1994
- 3)藤田・沼田・一桝・高野：荷重状態が外ケーブル構造の曲げ終局耐力におよぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, PP. 1027~1032, 1994