

## 論文 外ケーブル式 PC 桁の曲げ耐力算定式の提案

井上 智之<sup>\*1</sup>・睦好 宏史<sup>\*2</sup>・Eakarat WITCHUKREANGKRAI<sup>\*3</sup>・今野 洋一<sup>\*4</sup>

要旨：外ケーブル PC はりに関する既往の曲げ実験結果を用いて、これまで提案されている外ケーブル PC はりの終局時における応力増分算定式の精度の検討を行った。また変形の適合条件を用いた曲げを受ける外ケーブル PC はりの非線形解析手法により、大偏心外ケーブル PC はりの数値解析を行い、既往の外ケーブル PC はり応力増分算定式の大偏心はりへの適用性を検討した。これにより大偏心を含む外ケーブル PC はりの応力増分算定式を提案した。その結果、提案した算定式を用いることで、大偏心を含む外ケーブル PC はりの終局時における外ケーブル応力増加量および曲げ耐力を精度良く推定できることが明らかになった。

キーワード：大偏心外ケーブル，終局曲げ耐力，数値解析

### 1. はじめに

外ケーブル式 PC 構造は、耐久性や施工性などの利点から近年実構造物に多く採用されてきている。しかしコンクリートとケーブルの間に付着がないため、一般に終局時に外ケーブルは降伏せず、内ケーブル式 PC に比べ曲げ終局耐力が小さくなることが知られている。これを改善し、鋼材の高強度を有効に利用できる方法として、ケーブルを桁断面の外に大きく偏心配置させる方法（以下、大偏心）が提案され、その曲げ性状もかなり明らかにされてきている。<sup>1)</sup>

一方、外ケーブル PC 橋の曲げ設計においては、コンクリートとケーブルの間に付着がないために通常の曲げ理論が適用できず、曲げ耐力の算定には終局時のケーブル応力とケーブル位置を推定する必要がある。外ケーブルの終局時応力および曲げ耐力を厳密に算定するには材料非線形と変形の適合条件を用いた非線形解析により精度良く算定することが可能であるが、実設計を行うためには簡易な曲げ設計手法が必要であり、これを解決する方法として過去に様々な終局時曲げ耐力算定手法が提案されている。

しかしそのほとんどがケーブル応力増分のみに関するものである。さらに大偏心外ケーブル PC はりに対しての曲げ耐力設計法は明らかにされていない。

本研究では、まずこれまでに行われた外ケーブル式 PC 単純はりの曲げ載荷試験結果を用いて既往の応力増分算定式の精度の検討を行った。また変形の適合条件を用いた非線形解析を用いて、大偏心を含めた外ケーブル PC はりの数値実験を行い、既往の算定式の大偏心 PC はりへの適用性を検討し、さらに大偏心を含めた外ケーブル PC の曲げ耐力算定手法を提案した。

### 2. 既往の算定式の精度の検討

#### 2.1 既往の算定式の概要

表 1 に今回検討を行った既往の外ケーブル式 PC 構造（またはアンボンド式 PC 構造）の曲げ終局時における緊張材の応力算定式を示す。ここで、ACI<sup>2)</sup>、BS<sup>3)</sup>、AASHTO<sup>4)</sup>の式はアンボンドはりの式であるが、外ケーブルはりにも適用されているため検討に加えた。全ての式においてスパン有効高さ比 ( $L/d_{ps}$ ) が考慮されており、

\*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*3 埼玉大学大学院 理工学研究科生産科学専攻 工修 (正会員)

\*4 埼玉大学 工学部建設工学科

表1 外ケーブル(またはアンボンドケーブル)曲げ終局時応力算定式

コードまたは研究者	刊行年	算定式
ACI 318-95	1995	$f_{ps} = f_{pe} + 10,000 + \frac{f_c'}{k\rho_{ps}} \leq f_{pe} + C, \text{ and } f_{ps} \leq f_{py}$ $k = 100 \text{ and } C = 60,000 \text{ for } L/d_{ps} \leq 35$ $k = 300 \text{ and } C = 40,000 \text{ for } L/d_{ps} > 35$
BS8110	1985	$f_{ps} = f_{pe} + \frac{7000}{(L_2/d_{ps})} \left( 1 - \frac{1.7f_{pu}A_{ps}}{f_{cu}bd_{ps}} \right) \leq 0.7f_{pu} \text{ (MPa)}$
AASHTO (Naaman and Alkhari)	1994	$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_{ps}}{c} - 1 \right) \frac{L_1}{L_2} \leq 0.94f_{py}$ <p style="text-align: right;">単純桁: <math>\frac{L_1}{L_2} = 1</math></p> $c = \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y' + 0.85f_c'(b - b_w)h_f}{0.85f_c' b_w \beta}$ <p style="text-align: right;">歪低減係数: <math>\Omega_u = \frac{3}{L/d_{ps}}</math></p>
栗根、幸左、安田、若狭	1997	$f_{ps} = f_{pe} + \frac{\alpha d_{ps} E_{ps}}{70L_2}$ <p>= 3 : ひび割れ分散性が良好な場合 = 4 : ブロック桁などひび割れ分散性が良好でない場合</p>
小坂、川田、津野	1999	$L_2/d_{ps} > 50 \text{ の場合 } f_{ps} = 0$ $L_2/d_{ps} \leq 50 \text{ の場合 } f_{ps} = k/(L_2/d_{ps})$ <p style="text-align: right;">単純桁: <math>k = 6000</math></p>
Aravinthan、睦好、藤岡、日紫喜	1997	$f_{ps} = f_{pe} + \lambda_u \Omega_u E_{ps} \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_{ps}}{c} - 1 \right)$ <p style="text-align: right;">単純桁: <math>n = 1</math></p> <p>歪低減係数 : <math>\Omega_u = 2.31/(L/d_{ps}) + 0.21(A_{ps,int.}/A_{ps,tot.}) + 0.06 \leq 0.50</math></p> <p>終局時有効高さ : <math>d_{pu} = R_d d_{ps}</math></p> <p>有効高さ低減係数 : <math>R_d = 1.25 - 0.010(L/d_{ps}) - 0.38(S_d/L) \leq 1.00</math></p>
提案式	2002	<p>有効高さ低減係数 : <math>R_d = 1.05 - S_d/d_{ps} (0.0282 - 2.91\rho_{ps}) \leq 1.00</math></p>

$f_{ps}$ : 終局時における外ケーブル引張応力度,  $f_{ps}$ : 外ケーブルの応力増分

$f_{pe}$ : 外ケーブルの有効引張応力度,  $f_{py}$ : PC 鋼材の降伏点強度,  $E_{ps}$ : ケーブルのヤング係数

$f_y$ : 引張鉄筋の降伏点強度,  $f_y'$ : 圧縮鉄筋の降伏点強度,  $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度,  $\rho_{ps}$ : PC 鋼材比

$A_{ps}$ : ケーブルの断面積,  $A_s$ : 引張鉄筋の断面積,  $A_s'$ : 圧縮鉄筋の断面積,  $d_{ps}$ : PC 鋼材の有効高さ

$L$ : 支間長,  $L_1$ : 載荷支間長,  $L_2$ : PC 鋼材の定着間距離,  $S_d$ : デビエータ間隔

$b$ : はり断面の幅,  $b_w$ : ウェブ幅,  $h$ : はりの高さ,  $h_f$ : フランジ幅,  $c$ : 圧縮縁から中立軸までの高さ

$\beta$ : コンクリート圧縮ブロック低減係数,  $\varepsilon_{cu}$ : コンクリートの終局ひずみ

特に栗根らの式<sup>5)</sup>と小坂らの式<sup>6)</sup>はそれを主要因とした簡易式である。著者らが過去に提案した式<sup>7)</sup>は Naaman ら<sup>8)</sup>の考えに基づいたもので、AASHTO 式と同じく中立軸位置と応力増分についての連立式を解く形となっており、さらにこれらの式の中で唯一、終局時の外ケーブル有効高さ  $d_{ps}$  の変化を考慮している。

## 2.2 既往の終局時応力算定式の精度の検討

既往の外ケーブル終局時応力算定式の精度を、これまでに行われた外ケーブル式 PC はりの曲げ載荷試験結果を用いて検討した。検討には埼玉大学を始めとする国内外の研究機関における実験結果、計 64 体を用いた。<sup>1) 9) 10) 11) 12) 13) 14)</sup>

<sup>15) 16) 17)</sup> 検討項目として、最大荷重時の外ケーブル応力増分  $f_{ps}$ 、外ケーブル応力  $f_{ps}$  および最大曲げモーメント  $M_u$  について行った。

表2 算定式と実験値の比較(算定値/実験値)

算定式	$f_{ps}$		$f_{ps}$		$M_u$	
	平均	変動係数	平均	変動係数	平均	変動係数
ACI	0.652	0.413	0.870	0.128	0.978	0.096
BS	0.791	0.801	0.905	0.168	0.992	0.095
AASHTO	1.002	0.283	0.996	0.082	1.063	0.116
栗根ら	2.023	0.767	1.229	0.268	1.163	0.185
小坂ら	1.412	0.819	1.055	0.238	1.065	0.127
Aravinthan	0.967	0.357	0.997	0.089	0.958	0.117
解析結果	1.083	0.142	1.024	0.048	0.984	0.051

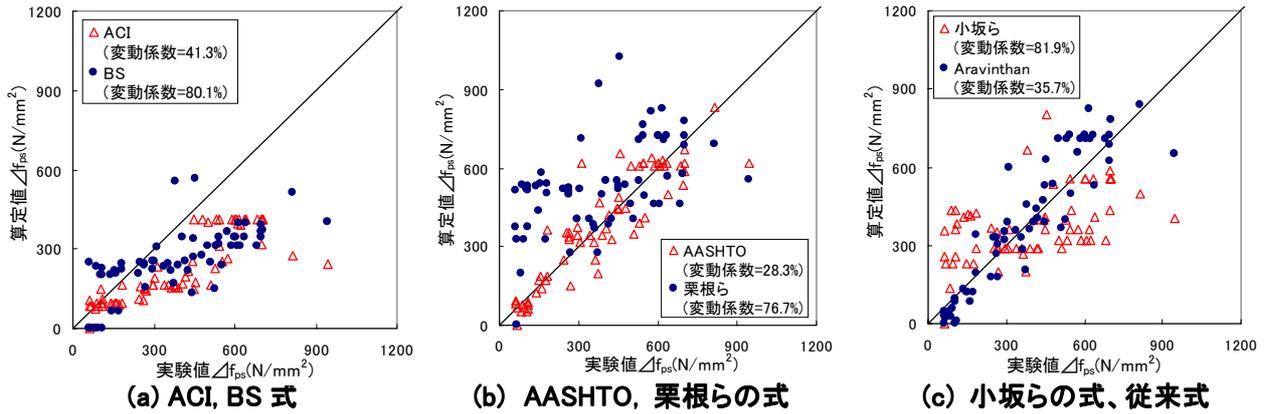


図1 実験値と算定値の比較( $\Delta f_{ps}$ )

### 2.3 精度の検討結果

表2に各算定式の算定値と実験結果の検討結果を示し、図1(a), (b), (c)に応力増分についての実験値と算定値の比較を示す。その結果から、AASHTO式とAravinthan式が特に良い精度で実験値の傾向を捕らえていることが分かる。つまりこれら2式に共通した、中立軸位置と応力増分についての連立式を解く手法により、外ケーブル応力に影響する様々な要因を適切に評価でき、終局時応力を精度良く算出できることが明らかになった。しかし終局曲げモーメントについては、AASHTO式は平均で6.5%危険側に評価してしまう結果となった。これは、特にデビエータ間隔が広く終局時までのケーブル偏心量低下が大きい場合の設計において、応力増分を適切に見積ったとしても、外ケーブルの有効高さ低下を考慮しない場合には、曲げ耐力を危険側に見積る可能性が生じることを示している。一方で、Aravinthan式は終局時の有効高さ低下を有効高さ低減係数を用いて考慮しているため、終局曲げモーメントの平均値も若干安全側ではあるが、AASHTOより精度の良い結果となった。このことから終局時の外ケーブルの有効高さ低下を考慮することの必要性が改めて確認された。

## 3. 通常の外ケーブルPCはりから大偏心

### 外ケーブルPCはりに至る数値解析

#### 3.1 数値解析の概要

実験値との比較により歪低減係数と有効高さ

低減係数を取り入れたAravinthanらの手法が終局時外ケーブル応力と曲げ終局モーメントを最も精度良く算定できることが明らかになったが、比較に用いた供試体のうち大偏心はりは2体のみで、既往の算定式が大偏心はりに適用できるかどうかの検討はされていない。そこで変形の適合条件を用いた清算法曲げ解析プログラム<sup>9)</sup>を用いて、通常の外ケーブルPCはりから大偏心外ケーブルPCはりまでを含めた数値解析を行った。ここで表2の下段に本プログラムの実験値に対する精度の検討結果を示す。その結果、本プログラムが外ケーブル式PCはりに関して十分な精度で解析可能であることが確認できた。

#### 3.2 解析モデルと変動要因

図2に数値解析に用いた外ケーブル式PCはりの形状寸法を示す。また図3に解析に用いた材料の応力-ひずみ関係を、表3に変動要因を示す。桁高さ60cm、幅50cmのT型断面単純はりで、デビエータ間隔は、3個のデビエータを

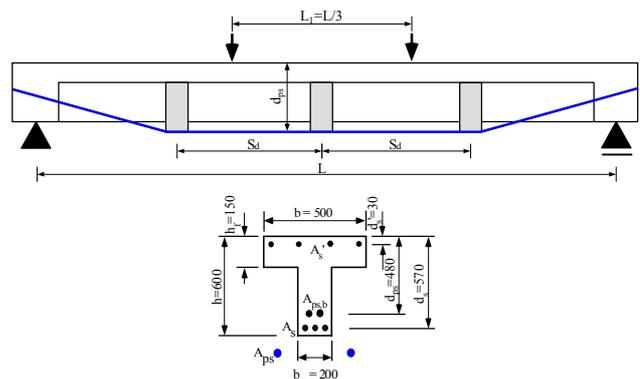


図2 解析モデル形状および断面形状

図2のように等間隔に配置した場合を  $S_d/L=0.25$  とし、 $S_d/L=0.33, 0.67$  はデビエータが2個ある場合、 $S_d/L=1.0$  はデビエータを配置しない場合とした。また、他の要因は全て表3にあるように変化させた。このうち  $L/d_{ps} < 10$  となる場合など実設計には用いられないと判断したケースは除外し、計960通りの数値解析を行った。導入プレストレスは外ケーブルの引張強度の50%を基本とし、大偏心はりの場合、導入プレストレスによりコンクリート上縁にひび割れが生じると判断された場合のみ30%、10%と低減させて解析を行った。

### 3.2 解析結果

図4(a), (b), (c)に終局時外ケーブル応力増分についての解析結果と各算定式の結果の比較を示す。その結果、多くの式は通常の偏心量の場合を前提にしており、また使用鋼材量等の影響を算定式に取り入れていない簡易式であるため、大偏心はりでは小さすぎる応力増分を与えた。しかしながら、AASHTO式とAravinthan式では解析結果の傾向を良く評価できており、特にAravinthan式はばらつきが少なく、精度良く応力増分を算定できていることが分かる。このことから歪低減係数を用いて中立軸位置と応力増分に関する連立式を解く方法ならば、大偏心はりであるか否かに関わらず、様々な条件のほりに対してその応力増分を精度良く推定できることが明らかになった。

ところでAravinthan式ではデビエータが2つの場合のみを想定しており、3つ以上の場合終局時での有効高さの低減を無視している。しかし実際にはデビエータ数が3つ以上の場合にも有効高さは変化し、デビエータ間隔が長くなるほどその影響は大きくなる。前述の実験値との検討からも外ケーブル式PCはりにおいて終局時のケーブル有効高さが終局曲げモーメントに影響を与えることが明らかになっており、より適切な算定式が求められる。そこで今回行った数値解析の結果をもとにAravinthan式を修正し、新たに有効高さ低減係数の算定式を提案する。

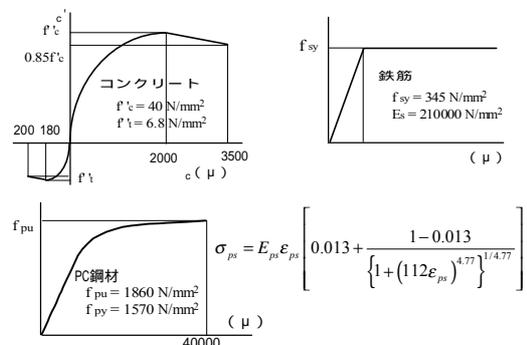
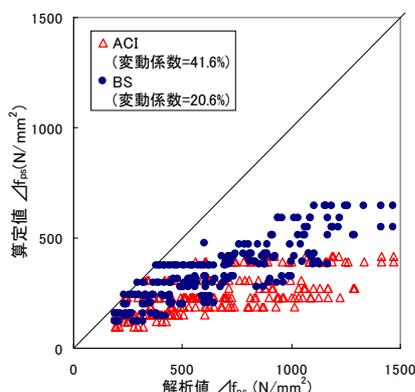


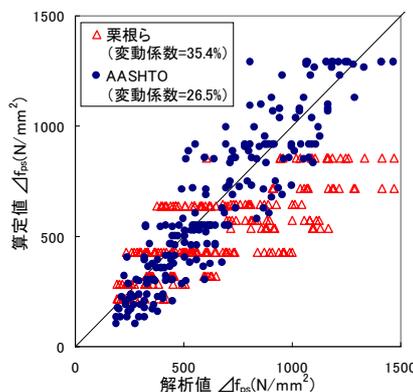
図3 材料の応力-ひずみ関係

表3 数値解析における変動要因

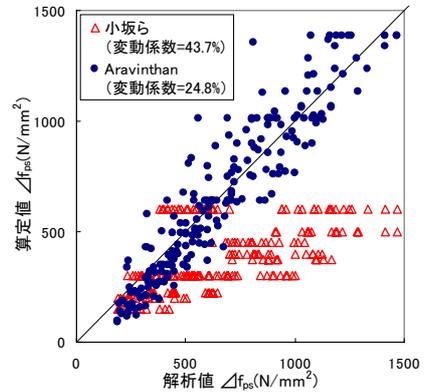
No.	変動要因	範囲
1	載荷方法	1点 or 2点載荷
2	スパン長 L (m)	4.8, 9.6, 14.4, 19.2
3	ケーブル有効高さ $d_{ps}$ (cm)	48, 72, 96, 120
4	デビエータ間隔/スパン $S_d/L$	0.25, 0.33, 0.66, 1.0
5	内外ケーブル比率 $A_{ps}/A_{ps, total}$ (%)	50, 100
6	内外合計PC鋼材比 $\rho_{ps} = A_{ps}/bh$ (%)	0.2, 0.4
7	引張鉄筋比 $\rho_s = A_s/bd_s$ (%)	0.2, 0.6, 1.0



(a) ACI, BS 式



(b) AASHTO, 栗根らの式



(c) 小坂らの式、従来式

図4 解析値と算定値の比較( $\Delta f_{ps}$ )

#### 4. 有効高さ低減係数 $R_d$ の提案

ここで、終局時のケーブル有効高さ  $d_{pu}$  は初期有効高さ  $d_{ps}$  と有効高さ低減係数  $R_d$  を用いて、

$$d_{pu} = R_d \cdot d_{ps} \quad (1)$$

と表せる。図5に数値解析より求めた有効高さ低減係数とスパン長/有効高さ ( $L/d_{ps}$ ) の関係を、図6にデビエータ間隔/有効高さ ( $S_d/d_{ps}$ ) との関係を示す。Aravinthan 式において有効高さ低減係数は図5に用いたスパン長/有効高さ ( $L/d_{ps}$ ) とデビエータ間隔/スパン長 ( $S_d/L$ ) の2つで表されていた。しかし図6から分かるように、デビエータ間隔/有効高さ ( $S_d/d_{ps}$ ) をパラメータとすることでデビエータ配置の影響をこの1つのパラメータで評価できることが分かる。また図7に有効高さ低減係数と外ケーブル鋼材比の関係を示す。外ケーブル鋼材比 ( $\rho_{ps} = A_{ps}/bd_{ps}$ ) が小さいほどはりの剛性は小さくなり、曲げ終局時までの変形量が大きくなるため、有効高さの低減量が大きくなることが分かる。そしてその影響はデビエータ間隔/有効高さ ( $S_d/d_{ps}$ ) が大きいほど顕著である。なお内外ケーブル比率や引張鉄筋量の影響は殆どみられなかった。これらのことから有効高さ低減係数に対して主な変動要因となっている上記の2つのパラメータを用いて、有効高さ低減係数を次式で提案する。

$$R_d = 1.05 - S_d/d_{ps}(0.0282 - 2.91 \rho_{ps}) - 1.00 \quad (2)$$

ここでデビエータ間隔  $S_d$  は危険断面を含むデビエータ間距離で、危険断面がデビエータ位置にある場合には  $S_d/d_{ps} = 0$ ,  $R_d = 1$  となる。また、通常の外ケーブル式 PC 橋の施工実績で外ケーブルの鋼材比が 0.1 ~ 0.2% 程度であることを考えると、外ケーブル張力を有効に利用できる構造とするには、有効高さ低減係数が 0.8 以上となる  $S_d/d_{ps} = 10$  程度の間隔でデビエータを配置することが望ましいといえる。図8に数値解析結果の有効高さ低減係数を用いた提案式と従来式の精度の比較を示す。グラフからも提案式がより適切に有効高さ低減係数を算定できていることが分かる。ここで2章にて用いた実験結果に提案式を適用し、同様に精度の検討を行った。

その結果、応力増分および終局時ケーブル応力については若干精度の向上が見られたものの、Aravinthan 式の結果とほぼ同等の結果となった。そして終局時モーメントについては、提案式を用いた場合 (算定値/実験値) の平均が 0.998、変動係数が 0.103 と提案式のほうが Aravinthan 式よりも実験値に近い結果となり、より精度良く算定することができた。

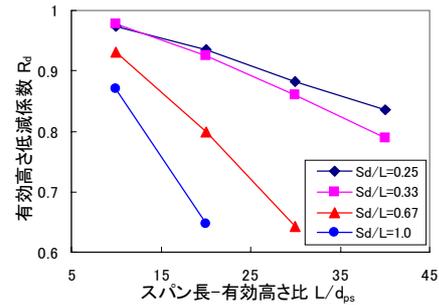


図5  $R_d$ - $L/d_{ps}$  関係

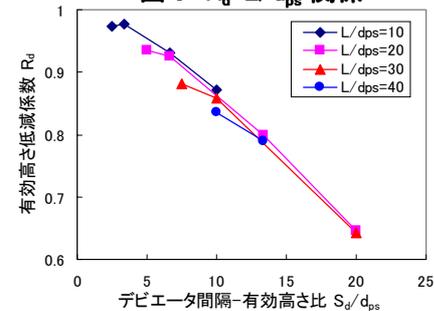


図6  $R_d$ - $S_d/d_{ps}$  関係

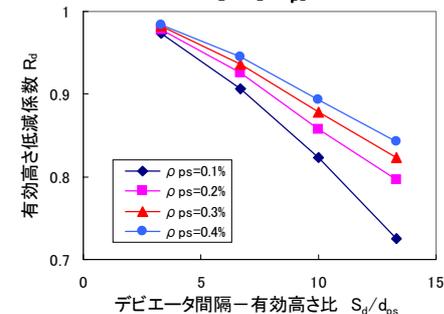


図7  $R_d$  に与える外ケーブル鋼材比  $\rho_{ps}$  の影響

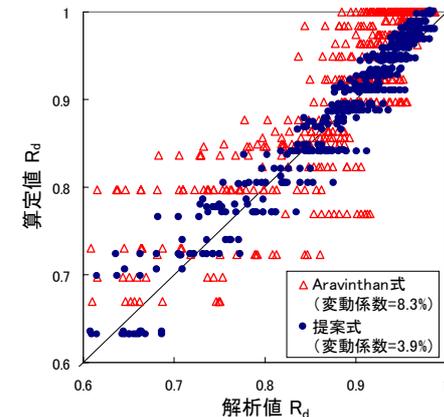


図8  $R_d$  に関する提案式と Aravinthan 式の比較

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 実験値を用いて既往の各種算定式の精度の検討を行った結果、歪低減係数を用いて中立軸位置と応力増分に関する連立式を解く手法により外ケーブルの応力増分を精度よく算定できた。
- (2) 大偏心はりを含めた数値解析を行った結果、(1)で示した手法により、大偏心はりを含む様々な条件のはりに対して、終局時における外ケーブル応力を精度良く算定できることを確認した。
- (3) 数値解析をもとにデビエータ間隔/有効高さ ( $S_d/d_{ps}$ ) と外ケーブル鋼材比 ( $\rho_{ps}$ ) をパラメータとした有効高さ低減係数の算定式を新たに提案した。そして提案式を用いることで、外ケーブル式 PC はりの曲げ耐力をより精度良く算出することができた。

## 参考文献

- 1) Aravinthan T., 睦好宏史ほか: 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
- 2) ACI (American Concrete Code) Committee 318, Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95)
- 3) Structural Use of Concrete (BS8110, Section 4.3.7.3), British Standards Institution, London, 1985
- 4) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) LRFD Bridge Design Specifications SI Units First Edition, 1994
- 5) 栗根聡, 幸左賢二, 安田扶律, 若狭忠雄: 終局時における外ケーブル応力増加量算定式に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.2, pp.553-558, 1997
- 6) 小坂寛己ほか: 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, No.613/V-42, pp147-164, 1999.2
- 7) Aravinthan T., 睦好宏史ほか: 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
- 8) Naaman, A.E. and Alkhairi, F.M.: Stress at Ultimate in unbonded post-tensioning tendons: Part2-Proposed Methodology, ACI Structural Journal, Vol.88, No.6, pp.683-692, Nov-Dec, 1991.
- 9) 睦好宏史ほか: 外ケーブル式 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, pp67-77, 1995.2
- 10) 柳沼善明: アウトケーブルを用いた PRC ばりの力学的挙動, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9, No.2, pp.495-500, 1987
- 11) 柳沼善明: アウトケーブルを用いた PRC ばりの挙動に及ぼすスパンの影響, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10, No.3, pp.23-28, 1988
- 12) 柳沼善明: 外ケーブル方式プレキャストブロック PC 梁の挙動, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp.1109-1114, 1996
- 13) 西川和廣ほか: 外ケーブル方式 PC げたの曲げ載荷実験, プレストレストコンクリート技術協会第9回シンポジウム論文集, pp.553-558, 1999.10
- 14) 新井崇裕ほか: 内外ケーブル比率の変化に伴う外ケーブル方式プレキャストセグメント PC 梁の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.2, pp.1215-1220, 1997
- 15) 幸左賢二ほか: 内外併用ケーブル方式 PC 橋の終局挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp79-89, 1997.8
- 16) Tan, K. H., and Ng, C. K., : Effect of deviators and tendon configuration on behavior of externally prestressed beams, ACI Structural Journal, V. 94, No. 1, pp13-22, 1997.1-2
- 17) Harajli, M., Khairallah, N. et. al. : Externally prestressed members: Evaluation of second-order effects, Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 10, pp1151-1161 1999.10