

(3) 外ケーブルPC部材の曲げ耐力算定法に関する研究

清水建設(株) 土田 一輝
 埼玉大学 睦好 宏史
 埼玉大学大学院 Matupayont Songkiat
 埼玉大学大学院 山口 統央

1. はじめに

外ケーブルPC部材は、ケーブルを断面の外に配置するためウェブの幅が低減でき、コンクリートの打設も容易となる。さらに、ケーブルの交換や再緊張が可能となる等の多くの利点がある。しかしながら、その曲げ耐力を精度よく計算する手法は現在のところ確立されていない。外ケーブルPCは、ボンド式とは異なり緊張材とコンクリートに付着がないため、ケーブルの歪は同位置のコンクリート歪と一致せず、通常の曲げ理論が適用できない。このためアンボンドPCと同等に扱われる場合が一般的で、曲げ耐力の算定にはアンボンドPC部材の研究結果が多く用いられてきた。しかし、外ケーブルは定着装置とデビエータ(偏向部)のみにより支持されているため、アンボンド方式とは異なり部材の変形量の増大に伴うケーブル位置の変化が生じ、これが曲げ耐力に大きな影響を及ぼすことが指摘されている[1]。

本研究は、変形の適合条件およびケーブル位置変化を考慮した外ケーブルPCはり部材の曲げ解析手法の妥当性を示し、さらに、本研究および既往の研究結果から、簡易な外ケーブルPC部材の曲げ耐力算定式を提案することを目的とした。

2. 曲げを受ける外ケーブルPC部材の解析手法

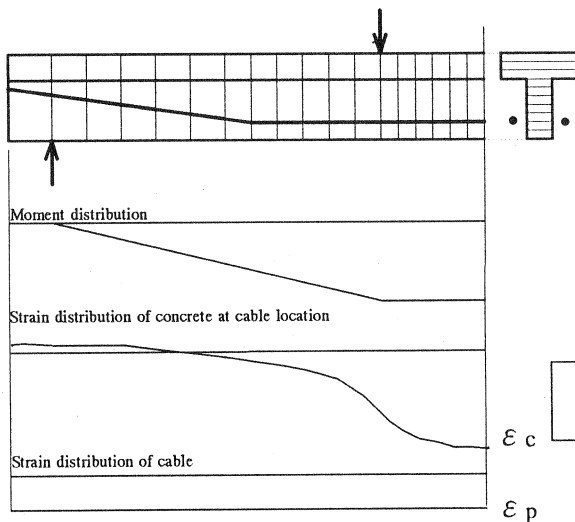


Fig.1 Division of beam and section

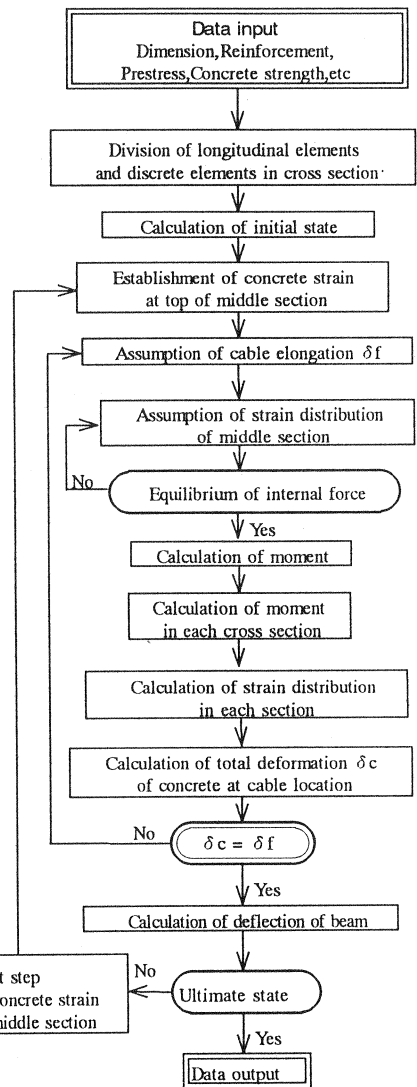


Fig.2 Flowchart of analysis

外ケーブル式PCはりおよびアンボンド式PCはりでは、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ため、平面保持の仮定を用いて曲げ解析を行うことはできない。したがって、精解を得るためにはある荷重段階におけるケーブルの伸びとケーブル位置のコンクリートの全変形量が等しいという変形の適合条件を用いる必要がある[2]。さらに、外ケーブル式PCはりにおいては変形の増大に伴うケーブル位置の変化が生じ、この点についても解析において考慮する必要がある。

解析を行うにあたって、Fig.1に示すように、部材軸方向(20要素)および断面の要素分割(30要素)を行った。コンクリートの応力-歪関係は2次曲線および直線により近似し、終局圧縮歪を0.35%とした。鉄筋およびPC鋼材の応力-歪関係はバイリニアアとした。Fig.2に解析過程を示す。解析の手順は以下のようである。
 1)プレストレス導入による各断面の歪分布、はりの初期変形、ケーブル位置の変化量を求める。2)はり中央断面の上縁コンクリート歪を設定し、ケーブルの伸び歪を仮定する。仮定されたケーブル歪を用いてはり中央断面における歪分布およびモーメントを計算し、このモーメントからはり長手方向の各断面の歪分布を求める。3)ケーブル位置のコンクリートの歪の増加量の総和と仮定したケーブルの伸び量と一致するかどうか照査する(変形の適合条件)。変形の適合条件が満たされない場合は再びケーブルの伸び歪を仮定し直し、変形の適合条件が満足されるまで収束計算を行う。4)部材の変形を計算し、ケーブル位置の変化量を考慮して各断面のモーメントの計算を行う。

以上の過程により逐一計算を行い、曲げを受ける外ケーブル式PC部材のあらゆる挙動を求めることが可能である。

3. 実験概要

解析手法の妥当性を検討するため外ケーブルPCはりの曲げ荷重実験を行った。実験要因をTable 1に示す。供試体ははり長560cmのT形はりであり、外ケーブル供試体に関してはデビエータを2個有している。実験

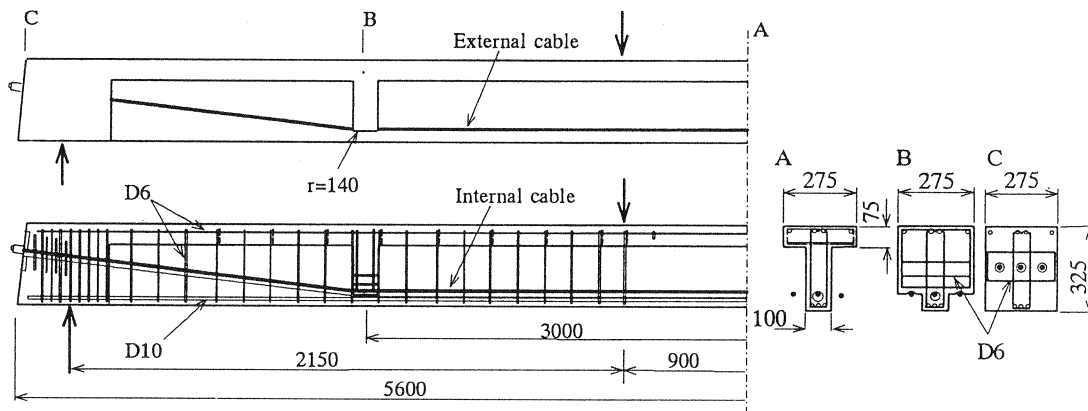


Fig.3 Dimensions of test specimens (mm)

Table 1 Test variables

No.	Type	Deviator distance (m)	Type of cable
1	External PC	1.8	SWPR7A 15.2*2
2	External PC	3.0	SWPR7A 15.2*2
3	Unbond PC	-	SWPR19 19.3*1
4	Bond PC	-	SWPR19 19.3*1
5	External and internal PC	3.0	SWPR7A 12.4*3

Table 2 Comparison of experiment and analysis

No.	Flexural strength (tf)			Cable force (tf)		
	Exp.	Cal.	Cal./Exp.	Cal.	Exp.	Cal./Exp.
1	9.3	9.3	1.00	37.4	38.8	0.96
2	8.6	8.6	1.00	37.9	37.7	1.01
3	10.0	10.6	0.94	36.4	42.3	0.86
4	10.9	10.8	1.01	39.5~	43.5	-
5	9.5	9.6	1.01	40.7~	41.3	-

要因は、デビエータ間隔とし180cmおよび300cmとした。また、構造形式の比較としてアンボンド供試体およびボンド式供試体を作製した。さらに、内外ケーブルを併用した供試体の載荷実験も行った。載荷は静的2点載荷とし、等曲げモーメント区間を90cmとした。供試体形状寸法をFig.3に示す。

4. 解析結果および実験結果

Table 2に解析結果および実験結果を示す。曲げ耐力において(実験値/解析値)の値は94~101%とよく一致しており、デビエータ間隔が広がるほど曲げ耐力が低下する傾向が解析においても得られている。また、終局時ケーブル張力についても(実験値/解析値)の値は86~101%の範囲にあり概ね一致している。

Fig.4は解析および実験から得られた荷重-変位関係(No.1,2)を示したものである。図に示すように解析値は全段階において実験値と良く一致しており、外ケーブルPCはりの曲げ挙動を良く推定している。Fig.5は荷重とスパン中央断面におけるケーブルの有効高さの変化を示したものである。この図においても解析結果と実験結果は概ね一致しており、本解析によりケーブル位置の変化を十分推定できることがこの結果より明らかとなった。

5. 外ケーブル式PCはりの曲げ耐力算定式の提案

外ケーブル式PCはりの曲げ性状および曲げ耐力は、本解析手法により精度良く求めることが可能となった。しかし、実際の設計には繁雑であるため、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。そこで、既往のアンボンドPCはりの曲げ耐力算定式に基づいて、外ケーブルPCはりの曲げ耐力算定式を提案することにする。外ケーブル式PCはりではデビエータ間においてケーブルが直線となるため、アンボンド式PCはりに比べてケーブルの伸びが小さくなる。この影響を考慮するために、Naamanらにより提案されたアンボンドPCはりの曲げ耐力算定式に用いられている歪低減係数(Ωu)を外ケーブルPC用に新たに採用した[3]。さらに、デビエータ間ではケーブル有効高さが減少するため、終局時におけるケーブル有効高さ低減係数を新たに導入した。これら2つの低減係数を求めるために、各種要因を変化させた数値実験を行った。

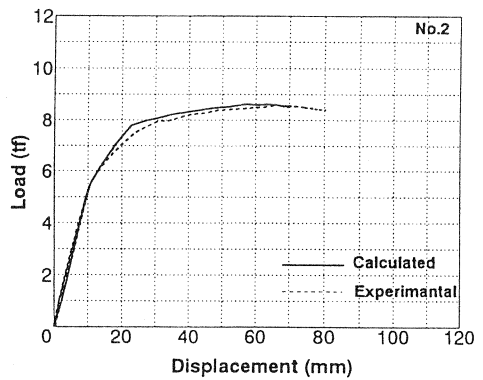
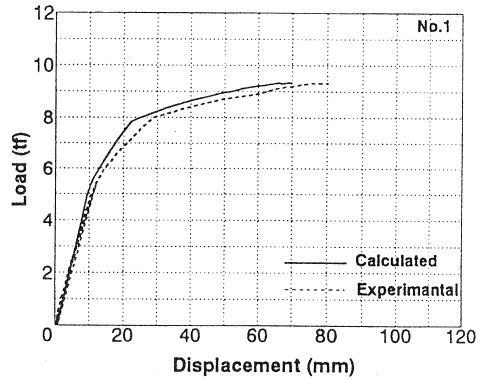


Fig.4 Load-displacement curve

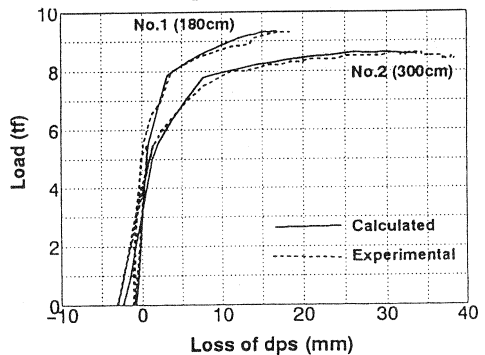


Fig.5 Load-loss of dps curve

歪低減係数($\Omega_{u,e}$)および終局時ケーブル有効高さ低減係数(R_d)は以下のように表される。

$$R_d = d_{ps,u}/d_{ps} \quad (1)$$

$$\Omega_{u,e} = \Delta \epsilon_{ps} / \Delta \epsilon_{cps} \quad (2)$$

ここに、

d_{ps} :限界断面における初期状態の外ケーブル有効高さ

$d_{ps,u}$:限界断面における終局時の外ケーブル有効高さ

$\Delta \epsilon_{ps}$:ケーブル歪の増加量

$\Delta \epsilon_{cps}$:ケーブル位置コンクリート歪の増加量

(1)低減係数 R_d の算定

S_d/L (S_d :デビエータ間隔、 L :スパン長) および L/d_{ps} (d_{ps} :有効高さ) と低減係数 R_d の関係を解析により求めた。解析要因は、 L/d_{ps} ($L/d_{ps}=8, 12, 16, 20, 24$)の5種類、 S_d/L (各 L/d_{ps} に対して6種類程度)とし、解析断面は実験に用いた供試体と同一とした。載荷形式はスパン長を3等分する2点載荷とした。

計算により得られた R_d-S_d/L の関係をFig.6に示す。この図から明らかなように各 L/d_{ps} における R_d と S_d/L の間には直線関係があり、これらの直線が次式で表されることが明らかとなった。

$$R_d = 1.0 - 0.022 * (L/d_{ps} - 5) * (S_d/L - 0.2) \quad (3)$$

(2)モーメント分布による R_d の補正

(3)式は、3等分点2点載荷の場合における R_d と S_d/L および L/d_{ps} の関係を求めたが、モーメント分布によりこれらの関係が変化することが考えられる。そこで、載荷点間隔(M_d)とスパン長の比を M_d/L とし、 R_d との関係を調べた。

Fig.7に M_d/L を変化させた場合における R_d と S_d/L の関係を示す。 M_d/L の値が0.1から0.33の範囲では R_d-S_d/L 関係はほとんど等しいが、 M_d/L の値が0、即ち1点載荷の場合には、 R_d-S_d/L 関係は大きく異なることが明らかとなった。この結果を考慮して、 R_d は1点載荷の場合のみ以下のように表すことができる。

$$R_{d1} = 0.71 + 0.29 * R_d \quad (4)$$

R_{d1} : 1点載荷の場合のケーブル有効高さの低減係数

R_d : 2点載荷の場合のケーブル有効高さの低減係数

(3)コンクリート内に配置されたノンプレストレス補強筋の影響

外ケーブルの張力増加が顕著になるのは、コンクリート内に配置された鋼材が降伏した後である。コンクリート内に配置された引張鉄筋量が多い場合には、鉄筋降伏後、圧縮側コンクリートに余裕が無く外ケーブルの張力がほとんど増加しないうちに圧縮破壊となる。この場合、外ケーブルの位置変化も小さくなる。このことから、コンクリート内に配置された鉄筋量が R_d に及ぼす影響を検討した。Fig.8に低減係数 R_d と補強

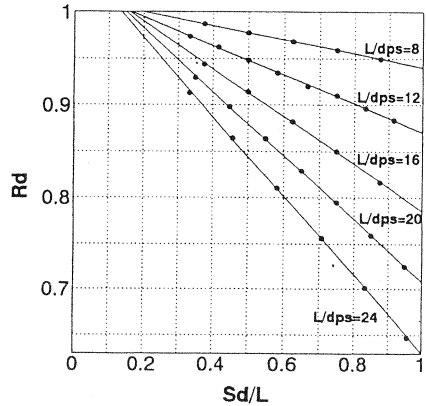


Fig.6 Relationship between R_d and S_d/L

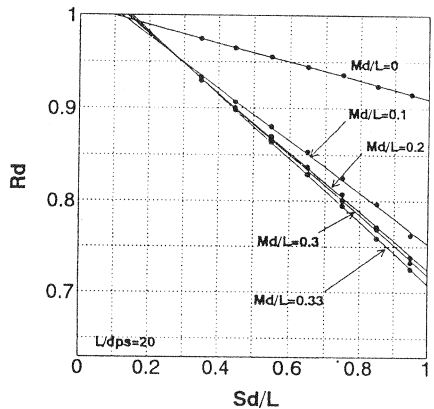


Fig.7 Relationship between R_d and S_d/L depending on M_d/L

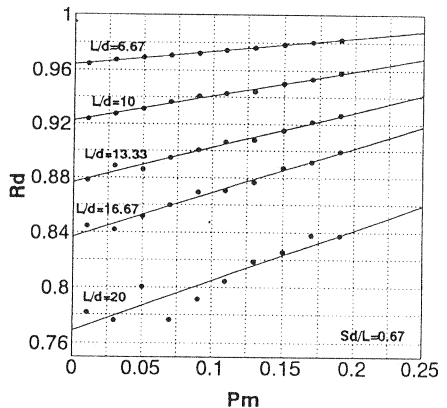


Fig.8 Relationship between R_d and P_m

筋比 P_m の関係を示す。ここで、補強筋比 P_m は以下のように表される。

$$P_m = A_s f_{sy} / b d_s f_c' \quad (5)$$

A_s : 引張鉄筋断面積(cm^2)

f_{sy} : 引張鉄筋の降伏点(kgf/cm^2)

b : 断面の幅(cm) d_s : 引張鉄筋有効高さ(cm)

f_c' : コンクリート強度(kgf/cm^2)

図に示すように、 R_d と P_m の間には直線関係があり、 P_m が大きくなるにつれて R_d も大きくなる傾向がある。以上の結果から、 R_d は次式のように表される。

$$R_d = 1.0 - 0.022 * (L/dps - 5) * (Sd/L - 0.2) + 0.0186 * L/ds * P_m \quad (6)$$

(4) 歪低減係数 $\Omega_{u,e}$ の算定

外ケーブル式PCはりにおいては、ケーブルがデビエータ間で直線となるため、アンボンド式PCはりの場合と比べ、ケーブルの伸びが小さくなり、 Ω_u はアンボンドの場合よりも減少すると考えられる。そこで、 Ω_u と Sd/L および L/dps の関係を解析により求めた。Fig.9に解析結果を示す。図より Ω_u と Sd/L の間には直線関係があり、外ケーブルにおける歪低減係数 $\Omega_{u,e}$ は以下のように表される。

$$\Omega_{u,e} = 4.36 / (L/dps) - 0.084 * Sd/L \quad (7)$$

(7)式は3等分点2点載荷における Ω_u であり、載荷点間隔(M_d)の影響を検討する必要がある。Fig.10に M_d/L を変化させた場合における Ω_u と Sd/L の関係を示す。 M_d/L により Ω_u と Sd/L の関係が変化し、 M_d/L が小さくなるにつれ Sd/L の影響が小さくなることわかる。以上の結果から、 Ω_u は以下のように表される。

$$\Omega_{u,e} = (1.47 + 10.3 * M_d/L) / (L/dps) - 0.29 * M_d/L * Sd/L \quad (8)$$

以上のようにして得られる $\Omega_{u,e}$ をアンボンドPC部材の曲げ耐力算定式で最も精度のよいNaamanの式に適用する。

すなわち、

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u * E_{ps} * \epsilon_{cu}(dps/c - 1) \quad (9)$$

$$c = \frac{-B1 + \sqrt{B1^2 - 4 * A1 * C1}}{2 * A1}$$

$$A1 = 0.85 f_c' b w \beta_1$$

$$B1 = A_{ps}(E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u (L1/L2) - f_{pe}) + A_s' f_y' - A_s f_y + 0.85 f_c' (b - b_w) h_f$$

$$C1 = -A_{ps} E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u d_{ps} (L1/L2)$$

h_f : フランジ厚さ(cm), b_w : ウェブ幅(cm)

ただし、矩形断面の場合には $b_w = b$ とする。

外ケーブル式PCはりの曲げ耐力を求める場合、(8)式より得られる $\Omega_{u,e}$ を(9)式に代入することにより終局時ケーブル応力(f_{ps})を求めることができる。さら

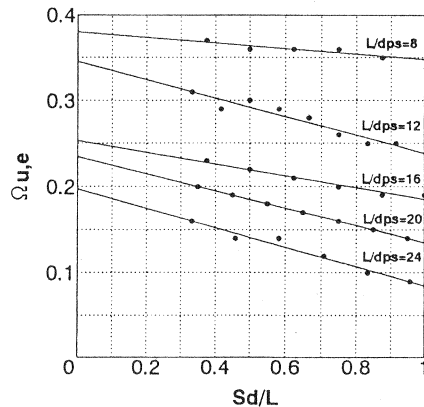


Fig.9 Relationship between $\Omega_{u,e}$ and Sd/L

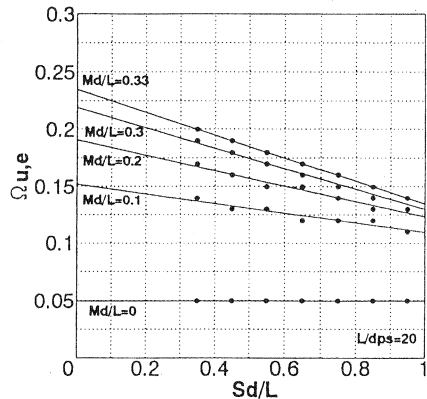


Fig.10 Effect of M_d/L ($\Omega_{u,e}$)

に、(6)式より得られる R_d を用いて、以下のように初期ケーブル有効高さを低減することにより終局時ケーブル有効高さを求めることができる。

$$d_{ps,u} = R_d \cdot d_{ps}$$

以上のようにして得られる終局時におけるケーブル応力およびケーブル有効高さから、通常の曲げ理論によって外ケーブル式PCはりの曲げ耐力を算定することが可能となる。

6. 提案式の精度に関する検討

低減係数 R_d および $\Omega_{u,e}$ を用いた場合の計算精度について検討を行った。検討には、過去に行われた外ケーブル式PCはりの実験データ30体[4,5,6,7,8,9,10]を用いた。

Fig.11は曲げ耐力に関して(実験値/計算値)の精度を示したものである。NaamanによるアンボンドPC部材の曲げ耐力算定式を用いた場合、実験値と計算値の比は平均値0.970、変動係数14.90%であったのに対し、本研究で提案した低減係数 R_d および $\Omega_{u,e}$ を使用することにより、平均値1.09、変動係数7.18%となり外ケーブル部材の曲げ耐力はより精度よく求めることが可能となった。

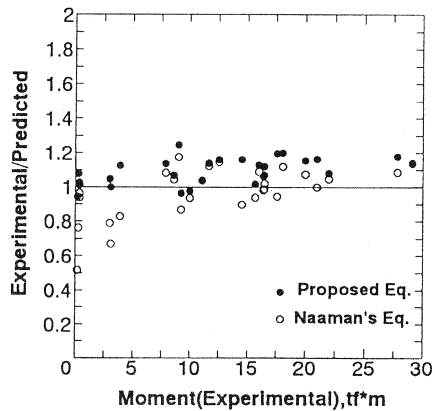


Fig.11 Comparison of experimental and predicted values

7.まとめ

外ケーブル式PC部材の曲げ性状を明らかにするために、載荷実験、数値解析、曲げ耐力算定式の提案を行った。本研究により以下のことが明らかとなった。

- 1)変形の適合条件およびケーブルの位置変化を考慮した精算法により外ケーブル式PCはりの曲げ挙動を推定することができる。
- 2)ケーブル有効高さに対する低減係数および外ケーブルに対する歪低減係数を用いることで外ケーブル式PCはりの曲げ耐力を簡易にしかも精度良く算定することができる。

参考文献

- [1]土田一輝・睦好宏史・Songkiat Matupayont・谷口裕史: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, Vol.16, No.2, 1994, pp.1009-1014
- [2]六車ら: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, pp.10-16
- [3]Antoine E.Naaman and Fadii M.Alkhalil:Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons-Part 1:Evaluation of the State-of-the Art, ACI Structural Journal, Vol 88, No.5, Sep-Oct.1991, pp.641-650
- [4]柳沼善明・北田勇輔:アウトケーブルを用いた部材の曲げ載荷実験,コンクリート工学年次論文集,8,1986, pp.665-668
- [5]柳沼善明・北田勇輔:アウトケーブルを用いたPRCはりの力学的挙動,コンクリート工学年次論文集,9-2,1987, pp.495-500
- [6]柳沼善明・北田勇輔:アウトケーブルを用いたPRCは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集,10-3,1988, pp.23-28
- [7]柳沼善明:アウトケーブルを用いたPRCはりの非線形解析,コンクリート工学年次論文集,13-2,1991, pp.689-694
- [8]佐野正・村上忠彦・丸山久一・睦好宏史:外ケーブルによるPC桁の補強効果に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol15, No.2, 1993, pp.807-812
- [9]睦好宏史・町田篤彦:FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状および曲げ耐力,土木学会論文集 No.442/V-16, pp153-159, 1992.2
- [10]土田一輝・睦好宏史・谷口裕史・喜多達夫:ロープ状新素材を外ケーブルに用いたプレストレストコンクリートはりに関する研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993, pp.899-904