

(107) 大偏心外ケーブルを有する2径間連続はりの曲げ性状に関する実験的研究

ドーピー建設工業(株)	技術センター	正会員	○ 田村 聖
同上		正会員	ARAVINTHAN T.
三井建設(株)	技術研究所	正会員	三上 浩
埼玉大学	工学部	正会員	睦好 宏史

1.はじめに

近年、プレストレストコンクリート構造(以下、PC 構造)において、PC 鋼材をコンクリート部材の外に配置した外ケーブル方式 PC 構造を採用している例が増加している。外ケーブル方式 PC 構造は内ケーブル方式のものに比べ、桁の軽量化、施工性の改善、維持管理が容易などの多くの利点がある。

著者等は、このような外ケーブル方式に着目し、桁高以上に外ケーブルを偏心させた“大偏心外ケーブルトラス PC 構造”の実用化を目的として研究を進めている^{1), 2), 3)}。この構造は、外ケーブルの位置を保持し、その配置角度を変えるデビエータを介して桁上および桁下に大きく外ケーブルを偏心配置する。従って、コンクリート桁は圧縮弦材、外ケーブルは引張弦材、偏向部材は鉛直材および斜材として機能するため、模擬的なトラス構造を形成する。このような構造形式を連続桁に適用することにより、さらに桁の軽量化と経済性の向上を図ることが可能であると考えられる。しかしながら、このような大偏心外ケーブルトラス PC 構造の研究例は少なく、特に連続桁の曲げ性状などの力学的性状は明らかにされていない。

本研究では、大偏心外ケーブルを有する2径間連続はりの曲げ荷重試験を行い、外ケーブルの偏心量、荷重条件が曲げ性状および終局耐力に及ぼす影響を明らかにした。

2.実験概要

供試体の形状寸法を図-1 に示す。また、実験要因を表-1 に示す。外ケーブルの偏心量および荷重条件を実験要因に、片スパンを5.0m とした全長10.4m の2径間連続はり供試体を合計5体作成した。また、供試体の断面寸法は、幅400mm、はり高さ150mm である。

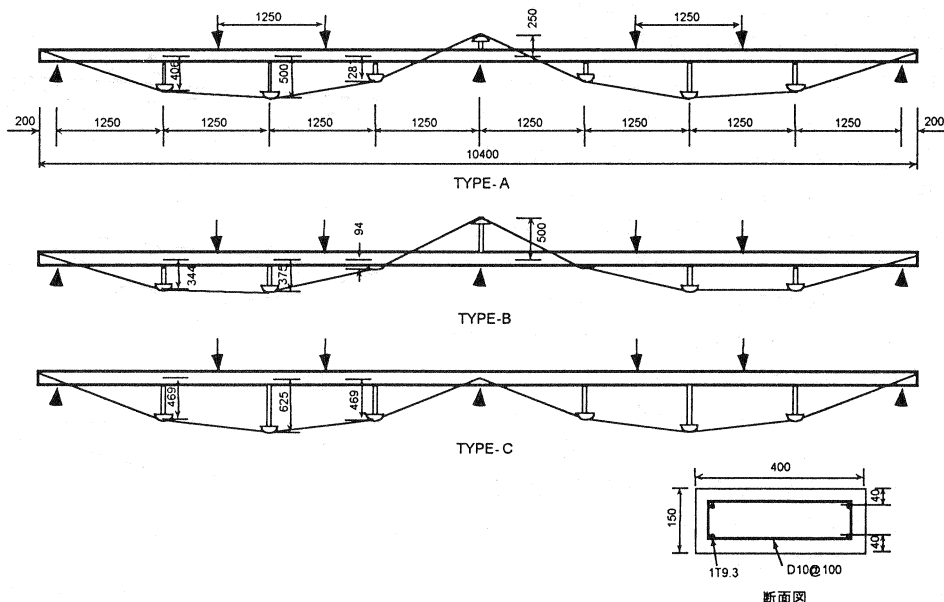


図-1 供試体概要図

表-1 実験要因

供試体 TYPE	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	荷重条件	外ケーブルの偏心量		使用鋼材		横拘束筋
			支間中央 (mm)	中間支点 (mm)	内ケーブル	外ケーブル	
A-1	51.9	対称 ($P_R=P_L$)	500	250	1T9.3×4 (4×50kN) (55% f_{pu})	1T10.8×1 (25kN) (20% f_{pu})	無
A-2	58.6	非対称 ($P_R=0.5P_L$)					無
B-1	57.4	対称 ($P_R=P_L$)	375	500			有
B-2	59.4	非対称 ($P_R=0.5P_L$)					有
C-1	54.0	対称 ($P_R=P_L$)	625	0			有

全ての供試体で、内ケーブル(プレテンション方式)と外ケーブル(ポストテンション方式)を併用する形式とした。使用したPC鋼より線は、内ケーブルにSWPR7A $\phi 9.3$ を4本、外ケーブルにSWPR7A $\phi 10.8$ を1本使用した。表-2に、PC鋼より線の材料特性(規格値)を示す。有効プレストレス導入量は全ての供試体に対して、内ケーブルは200kN(4×50kN)とし、外ケーブルは25kNとした。

表-2 ケーブルの材料特性

使用鋼材	断面積 (mm^2)	降伏強度 (kN)	引張強度 (kN)	弾性係数 (N/mm^2)
SWPR 7A $\phi 9.3$	51.61	76	89	196200
SWPR 7A $\phi 10.3$	69.68	102	120	196200

スターラップには、直径10mmの異型鉄筋を100mm間隔で配置した。また、TYPE-BおよびTYPE-C供試体は、はりの靱性を高めるために横拘束筋を荷重スパン内と中間支点部(中間支点から左右に550mmの範囲)に配置(スターラップ配置間隔50mm)した。

コンクリートの設計基準強度は $50N/mm^2$ とし、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は5体の供試体の平均で $56N/mm^2$ であった。

偏向部材(デビエータおよびストラット)は鋼製のものとし、供試体を作成後、ボルトにて供試体に後付けた。偏向部材の配置間隔は全ての供試体で1.25mとした。デビエータとケーブルの摩擦を低減するため、テフロンシートをデビエータとケーブルとの間に挿入した。TYPE-A-2供試体では、さらに摩擦の影響を低減させるため、テフロンシートとケーブルの間にグリースを塗布した。

図-2に、各供試体の外ケーブル偏心量を示す。外ケーブルの配置にあたっては、TYPE-C供試体の外ケーブル配置を基準とした。TYPE-AおよびTYPE-B供試体は、供試体に同等のプレストレスを導入するため、中間支点上の偏心量を変化させ、径間部の偏心量は、ケーブル軸線曲率が変わらない直線移動則に基づいて決定した。なお、TYPE-B供試体は、プレストレスによる2次モーメントを生じさせないケーブル配置にするため、中間支点上の偏心量を500mmとした。TYPE-A供試体の中間支点上の偏心量はTYPE-B供試体の偏心量の1/2にあたる250mmとした。

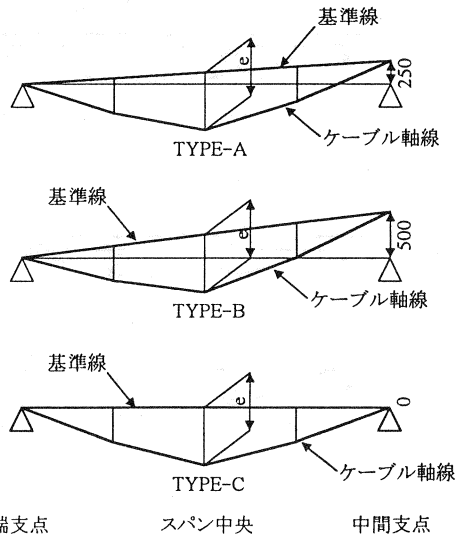


図-2 各供試体のPCケーブル偏心量

荷重方法は、油圧ジャッキによる静的片スパン2点荷重とし、等曲げ区間を1.25mとした。荷重条件として、左右の荷重(P_R, P_L)を対称に荷重するケースと、右スパンに荷重している荷重が左スパンの荷重の50%となるよう非対称($P_R=0.5P_L$)に荷重するケースの2ケースとした。

測定項目は、スパン中央部および中間支点上におけるコンクリート上下縁のひずみ・内ケーブルひずみ・スターラップひずみ、スパン中央部およびデビエータ設置位置でのたわみ、支点位置での反力である。また、外ケーブルについては、ひずみと両端に設置したロードセルにてケーブル張力の測定を行った。

3.実験結果

3.1 破壊性状

実験結果を表-3に示す。対称荷重した供試体(TYPE-A-1,B-1,C-1)の初期ひび割れは中間支点上で発生し、ひび割れ発生荷重は約37kN(平均値)となった。また、スパン中央部でのひび割れ発生荷重は約40kN(平均値)となった。非対称荷重した供試体(TYPE-A-2,B-2)は、荷重荷重の大きい左スパンの桁端側荷重点位置で初期ひび割れが発生し、ひび割れ発生荷重は約35kN(平均値)であった。

最大荷重は、対称荷重した供試体で約109kN(平均値)となった。非対称荷重した供試体は約90kN(平均値)となり対称荷重した場合と比べて17%程度小さくなった。これは、非対称荷重の場合、対称荷重と比較して外ケーブルの応力増分が小さくなった影響であると考えられる。また、横拘束筋を配置した供試体(TYPE-B,TYPE-C)と配置していない供試体(TYPE-A)の最大荷重はほぼ同じであり、最大耐力に及ぼす横拘束筋の影響は認められなかった。

対称荷重を行った各供試体の終局時の変位量は、両スパンともほぼ同じであった。また、非対称荷重を行った供試体の変位は、各スパンで正負の符号が反転した。

非対称荷重を行った供試体の終局時のケーブル端部張力を比較すると、TYPE-B-2 供試体はデビエータとケーブルの摩擦の影響で10%の張力差が生じた。これに対し、TYPE-A-2 ではテフロンシートとケーブルの間にグリースを塗布したため、この差が4%にまで低減された。

表-3 実験結果

供試体 TYPE	ひび割れ発生荷重 (kN)		最大荷重 (kN)		終局時変位 (mm)		終局時外ケーブル張力 (kN)		破壊時の 外ケーブル状態
	支間中央	中間支点	左スパン	右スパン	左スパン	右スパン	左側端部	右側端部	
A-1	39.2	36.8	107.9	108.6	82.7	82.6	117.1	116.6	降伏
A-2	34.2	39.2	88.1	47.6	112.7	-24.6	88.3	84.4	降伏前
B-1	39.6	37.0	108.1	107.6	110.2	110.2	118.3	118.1	降伏
B-2	36.8	41.7	90.8	49.6	150.2	-31.4	96.1	86.3	降伏前
C-1	41.7	36.8	109.7	110.9	80.2	80.0	114.4	115.6	降伏

破壊モードは、対称荷重を行った供試体では外ケーブルが降伏した後、コンクリートが圧壊した。一方、非対称荷重を行った供試体では、外ケーブルが降伏する前にコンクリートが圧壊した。図-3に代表的な供試体のたわみ分布状況を示す。荷重条件による破壊モードの違いについては、荷重条件によって桁の変位量が異なり、対称荷重の場合では両スパンとも大きく変位する。これに対し、非対称荷重の場合は、左スパンでは大きく変位するが右スパンでは反り上がり、ケーブルの応力増加量が少なくなったことが影響していると思われる。

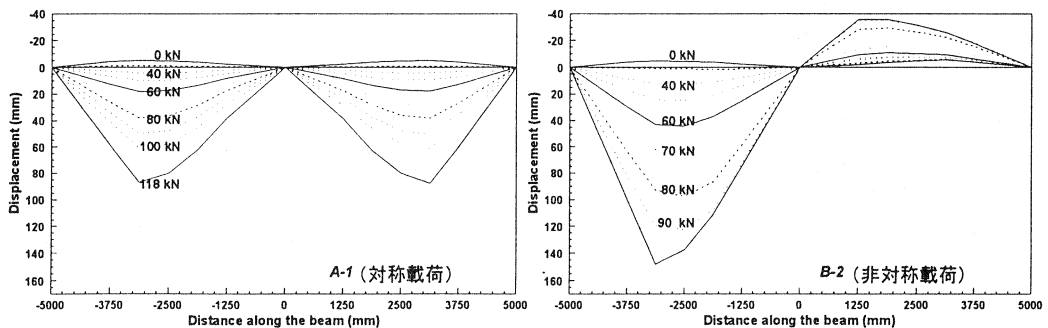


図-3 たわみ分布

3.2 外ケーブルプレストレスによる2次反力

図-4に、外ケーブルプレストレスと2次反力の関係を示す。前述したように、TYPE-B 供試体は、外ケーブル緊

張時に発生するプレストレスによる2次モーメントを極力生じさせないようコンコールドなケーブル配置とした。

その結果、外ケーブルプレストレスによる2次反力はほとんど発生していないのが確認できた。また、TYPE-C 供試体において、外ケーブルプレストレスによる2次反力が最も大きくなるのが確認された。

3.3 荷重-変位関係

図-5(a)に、対称荷重を行った供試体の荷重と変位の関係を示す。TYPE-A-1 および TYPE-B-1 供試体はコンクリートが圧壊する前の最大荷重に至るまでほぼ同じ挙動を示したが、TYPE-C-1 供試体は、やや高めの剛性を示した。この原因として TYPE-C-1 供試体は、供試体製作上、中間支点のケーブル偏心量を若干修正したことによるものと思われる。

横拘束筋を配置した TYPE-B-1 供試体は、断面上縁のかぶりコンクリートが剥落して荷重は低下したが、変位はその後も進行した。

図-5(b)に、非対称荷重を行った供試体の荷重と変位の関係を示す。対称荷重を行った供試体と同様に、TYPE-A-2 および TYPE-B-2 供試体は、コンクリートが圧壊する前の最大荷重に至るまでほぼ同じ挙動を示した。TYPE-B-2 供試体はその後、横拘束筋の影響により TYPE-A-2 供試体に比べて変位が進行した。

以上の結果より、直線移動則によりケーブル形状を変化させた PC 連続はりの破壊性状および変形挙動等の曲げ性状は、弾性域だけでなく、塑性域においてもほぼ同じ挙動を示すことが明らかになった。

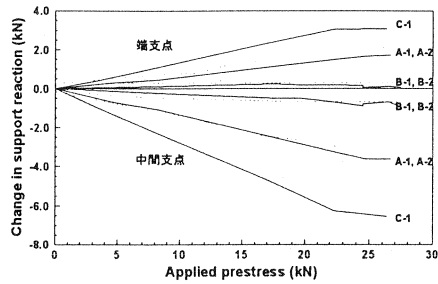
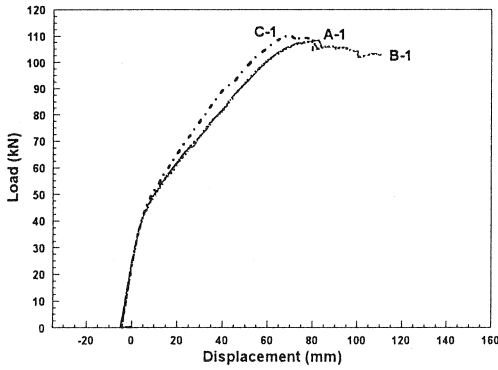
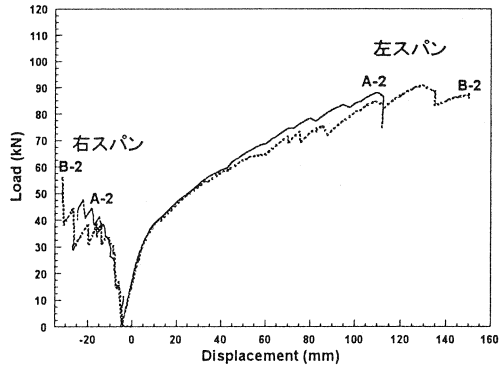


図-4 外ケーブルプレストレス-支点反力関係



(a) 対称荷重



(b) 非対称載

図-5 荷重-変位関係

3.4 外ケーブルの応力増加

図-6 に、外ケーブル応力とスパン中央変位の関係を示す。対称荷重を行った供試体は、外ケーブルの形状に影響を受けず、外ケーブルの応力度が降伏点までほぼ直線的に増加した。また、外ケーブルの応力増加率は 17.5MPa/mm であった。

非対称荷重を行った供試体についても外ケーブルの形状に影響を受けず、ほぼ同じ挙動を示し、外ケーブルの応力増加率は 7.5MPa/mm となり対称荷重した供試体の 1/2 の値となった。

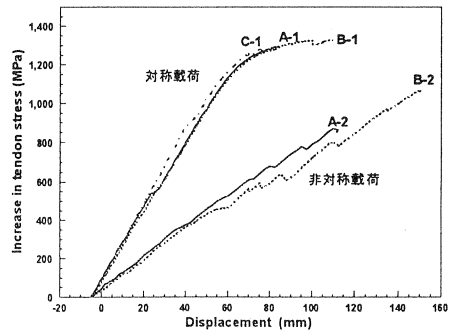


図-6 外ケーブル応力-スパン中央変位関係

載荷条件による外ケーブルの応力増加率の違いは、3.1 で考察したように、終局時における桁の変形形状の違いによるものと思われる。

これらの結果より、載荷条件により外ケーブルの応力増加量は異なるが、ケーブルの降伏前まで、外ケーブルの応力増加量とスパン中央の変位は直線関係にあることが明らかとなった。

3.5 モーメント再分配

図-7 に、載荷荷重と支点反力の関係を示す。支点反力の実測値は、ロードセルより測定された値である。計算値は、弾性解析により求めた反力である。載荷条件に関わらず、断面が塑性域に達するまでは実測値と計算値はほぼ一致しており、その後、両者の差が大きくなっている。この原因として、モーメント再分配が考えられる。

図-8 に、最大荷重時における載荷点位置および中間支点でのモーメント分布を示す。また、表-4 に、モーメント

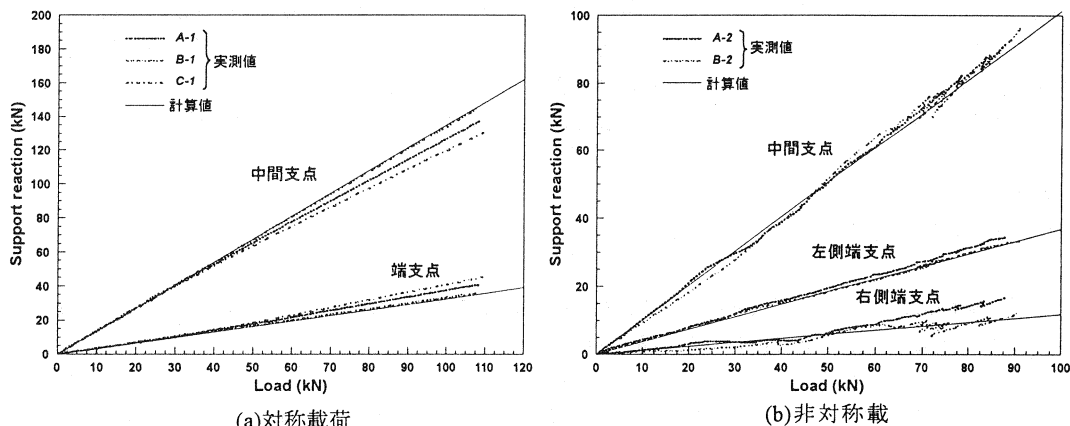


図-7 載荷荷重—支点反力関係

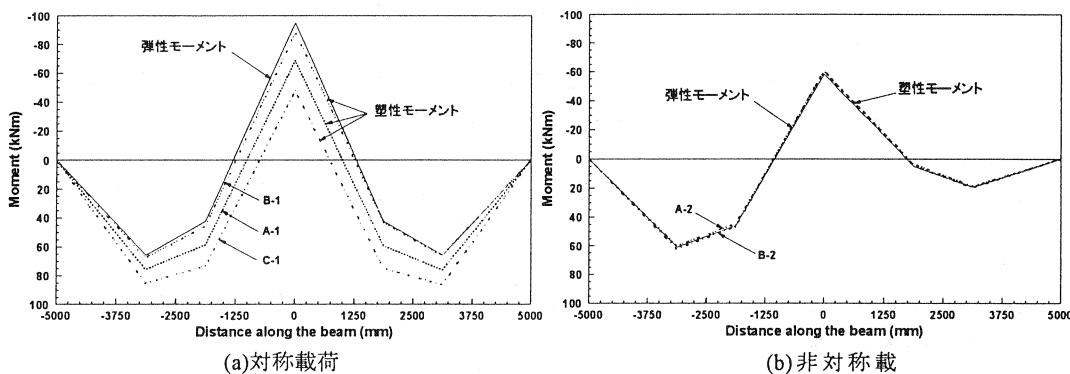


図-8 モーメント分布

表-4 モーメント再分配率

供試体 TYPE	載荷条件	塑性モーメント Mp(kN・m)			弾性モーメント Mα(kN・m)			モーメント再分配率 [1-Mp/Me](%)		
		左スパン	中間支点	右スパン	左スパン	中間支点	右スパン	左スパン	中間支点	右スパン
A-1	対称	75.8	-68.5	76.2	65.8	-95.2	65.8	-15.2	28.0	-15.7
A-2	非対称	60.0	-60.2	-	60.8	-58.1	-	1.3	-3.7	-
B-1	対称	67.7	-88.5	66.2	65.4	-94.6	65.4	-3.5	6.4	-1.2
B-2	非対称	62.4	-60.8	-	62.7	-59.9	-	0.6	-1.6	-
C-1	対称	85.3	-48.1	86.3	67.0	-96.9	67.0	-27.3	50.4	-28.7

再分配率を示す。終局塑性モーメント(M_p)は、ロードセルより測定された支点反力を用いて算出した。また、弾性モーメント(M_e)は、実測された終局荷重を用いて弾性解析により算出した。

図-8 および表-4 より、対称荷重を行った供試体では、スパン中央部での塑性モーメントの値が、弾性モーメントの値より大きくなり、モーメント再分配率は負となった。一方、中間支点での塑性モーメントは、弾性モーメントより小さくなり、モーメント再分配率は正となった。また、非対称荷重を行った供試体の場合は、対称荷重の場合と逆の挙動を示したが、モーメント再分配の影響は比較的小さい。

各供試体のモーメント再分配率を比較すると、外ケーブルの配置の違いによりモーメント再分配率が異なることが分かる。プレストレスによる2次モーメントが極力生じないように外ケーブルを配置したTYPE-B 供試体で、モーメント再分配率が最も小さくなった。

塑性ヒンジは、対称荷重を行った供試体では中間支点上で発生し、また、非対称荷重を行った供試体は左スパンのスパン中央で発生した。これにより、対称荷重の供試体のモーメントは、中間支点よりスパン中央へと再分配され、非対称荷重の供試体のモーメントは、スパン中央より中間支点へと再分配された。

これらの結果より、連続はりでのモーメント再分配は、荷重条件およびケーブル配置に影響を受ける。

4. 結論

本研究の結果として得られた結論を以下に示す。

- ① 直線移動則によりケーブル形状を変化させた PC 連続はりの破壊性状および変形挙動等の曲げ性状は、弾性域のみではなく塑性域においてもほぼ同じ挙動を示す。
- ② 外ケーブルの応力は、外ケーブルの形状に関係なく、ケーブルが降伏に至るまでスパン中央部の変位に比例して増加する。その結果、非対称荷重での最大耐力は対称荷重の場合より約 17%減少した。また、横拘束筋による最大耐力の影響は見られなかったが変位は大きく進行する傾向が見られた。
- ③ モーメント再分配率は、外ケーブルの配置に影響を受ける。また、プレストレスによる2次モーメントが大きい供試体ほどモーメント再分配率も大きくなる。
- ④ 対称荷重の場合、スパン中央でのモーメント再分配率は負を示し、中間支点でのモーメント再分配率は正を示した。また、非対称荷重の場合は、対称荷重の場合と逆の挙動を示した。

今後の課題として、このような PC 構造形式のせん断挙動についても明らかにする必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 松井敏二, 濱田譲, 渡辺宗樹, 篠崎裕生: PC ケーブルトラス構造の道路橋への適用, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, 1997
- 2) 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, プレストレスト技術協会第 7 回シンポジウム論文集, pp.437-442, 1997
- 3) 篠崎裕生, 渡辺宗樹, 竹本伸一, 濱田譲: AFRP ロッドを用いた PC ケーブルトラス桁の曲げ性状, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.788-789, 1998
- 4) 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.16-2, pp.1009-1014, 1994
- 5) Aravinthan.T, 睦好宏史, Songkiat MATUPAYONT, 町田篤彦: Moment Redistribution in Prestressed Concrete Continuous Beams with External Tendons, コンクリート工学年次論文報告集, vol.17-2, pp.761-766, 1995
- 6) Aravinthan.T, 睦好宏史, 新津正義, 陳安: 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.20-3, pp.673-678, 1998