

[2005] アウトケーブルを用いた PRC ばかりの挙動に及ぼす スパンの影響

正会員 柳沼善明（日本大学理工学部）

正会員 北田勇輔（日本大学理工学部）

1. まえがき

近年、アウトケーブルを用いた構造物（部材断面の外部にPC鋼材を配置した構造）の設計施工が注目されている^{1, 2, 3)}。一方、コンクリート構造物の劣化が大きな社会問題として取り上げられ、コンクリート構造物の補修や補強が必要になってきている。補修や補強の一つの方法として、アウトケーブルの採用は有効な方法と考えられる^{4, 5)}。

アウトケーブルの使用は多くの利点⁶⁾が考えられるため、今後我国においてもその使用が増加するものと予想される。しかしながら、我国におけるアウトケーブルに関する研究は数少ないため、本研究はアウトケーブルを使用するにあたっての基礎資料を得ようとするものである。著者らは、主鉄筋量を三種類に変化させたアウトケーブルを用いたPRCばかりの静的曲げ破壊実験を行い、アウトケーブルの中間支持のないPRCばかりの最大曲げモーメント M_{max} は従来工法の約4%の減少であったと報告した⁷⁾。この報告で用いた供試体はスパンと有効高さとの比 (ℓ/d) が11程度のPRCばかりであった。ところで、付着のないPCばかりの M_{max} 算定において、CP110⁸⁾や竹本⁹⁾によるPC鋼材応力は ℓ/d_p を考慮して算出される。ここに、 d_p は圧縮縁からPC鋼材までの距離である。また、 ℓ/d が大きくなるとPRCばかりのたわみが増大するため、アウトケーブルの支持の有無はPC鋼材の応力ならびにはりの変形性状などに影響を与えることが予想される。そこで、本研究は ℓ/d とアウトケーブルの支持の有無に着目した M_{max} 、PC鋼材の応力、変形性状について調べることを主な目的とした。実験は、アウトケーブルを用いたPRCばかりと従来工法によるPRCばかりの静的曲げ破壊実験である。

2. 供試体ならびに実験方法

実験に用いた供試体はアンボンドのPRCばかりで、表-1に示すように ℓ/d を二種類に変化させた。また、供試体は各タイプごとにアウトケーブルを用いたPRCばかり（シリーズO, S）と従来工法を用いたPRCばかり（シリーズN）とに大別される。さらに、アウトケーブルを用いたPRCばかりは、支持部を設けないもの（シリーズO）と支持部を設けたもの（シリーズS）の二種類である。すなわち、シリーズOの供試体はアウトケーブルをはり両端で定着し、はりの支承部間では支持部を全く設けなかった。シリーズSの供試体は荷重の載荷点から $h/2$ だけ支点よりの位置でアウトケーブルをはり下面より支持した。また、シリーズNの供試体はPC鋼材を部材断面内に配置したポストテンション方式のPRCばかりである。各供試体はシリーズ名とタイプ名とを組み合せて供試体名とした。図-1に示すように、供試体は幅6cm、

高さ10cmで、スパンはタイプS, Lでそれぞれ160cmと280cmとなるようとした。これらの供試体は文献〔7〕で行われたタイプAの供試体 ($\ell/d = 11$) の q とほぼ同値であり、断面の大きさは約 $1/4$ となるようにした。ここに、 q は $p \cdot \sigma_{sy} / \sigma_{cy}$ で、 p は鉄筋比、 σ_{sy} は鉄筋の降伏点応力度、 σ_{cy} はコン

表-1 供試体の種類

タイプ	スパン 有効高さ	供試体名	アウトケーブル の支持状態
S	18	OS-1	支持なし
		SS-1	支持あり
		NS-1	従来工法
L	32	OL-1	支持なし
		SL-1	支持あり
		NL-1	従来工法

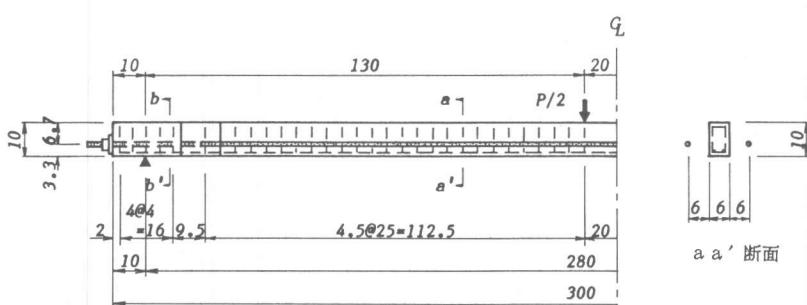
表-2 コンクリートの示方配合

Slump cm	W/C %	S/a %	Unit weight (kg/m³)				
			Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture
15.0	42.0	45.1	204	485	686	848	1.455

表-3 コンクリートの力学的性質

Compressive strength kgf/cm²	Tensile strength kgf/cm²	Flexural strength kgf/cm²
421.0	28.7	43.0

側面図



平面図

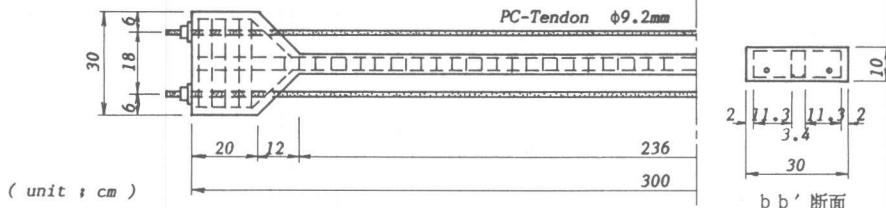


図-1 供試体の形状 (タイプLの場合)

クリートの圧縮強度である。

使用した粗骨材の最大寸法は 15 mm で、コンクリートの配合を表-2 に、供試体の載荷実験におけるコンクリートの力学的性質を表-3 に示した。使用した PC 鋼材は丸棒 B 種 1 号 (S B P R 95/110) で、シリーズ O, S では呼び名 ϕ 9.2 mm を 2 本 (断面積 1.29 cm^2)、シリーズ N では呼び名 ϕ 13 mm を 1 本 (断面積 1.30 cm^2) 用いた。主鉄筋には呼び名 D 6 mm (S D 3 0) を、スターラップには ϕ 5 mm (S R 2 4) をそれぞれ用いた。

実験方法は二点載荷で静的に曲げ破壊させた。荷重の載荷点間の距離はタイプ S, L とともに 20 cm とした。加力には油圧ジャッキを用い、ロードセルにより荷重を検出した。供試体は各荷重ごとにたわみ、ひずみ、ひびわれの状況を測定し、載荷荷重を漸次増加させて静的に曲げ破壊させた。コンクリートのクリープや乾燥収縮、PC 鋼材のレラクセーションによる PC 鋼材の応力減少を極力少なくするため、供試体の曲げ破壊実験はプレストレスの導入後ただちに行なった。導入プレストレス量は部材の下縁のコンクリートの応力が 80 kgf/cm^2 となるように定めた。

3. 実験結果と考察

3-1 最大曲げモーメント

最大曲げモーメント M_{\max} に及ぼす ℓ/d の影響を図-2 に示した。ここに、 b ははりの幅、 d は有効高さ、 ℓ はスパン、 σ_{cy} はコンクリートの圧縮強度である。図-2 によれば、 ℓ/d が大きくなるにしたがい各シリーズの M_{\max} は減少する傾向を示した。次に、シリーズ O, S の M_{\max} と従来工法との比較を図-3 に示した。図-3 によれば、 ℓ/d が大きくなるにしたがい中間支持のないシリーズ O の M_{\max} は従来工法のシリーズ N より

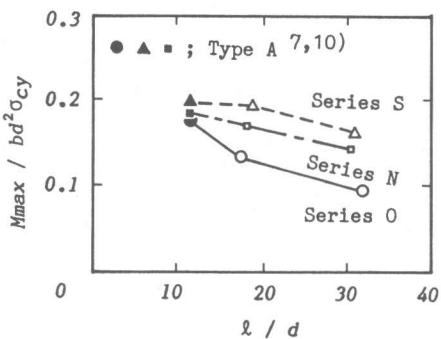


図-2 M_{\max} に及ぼす ℓ / d の影響

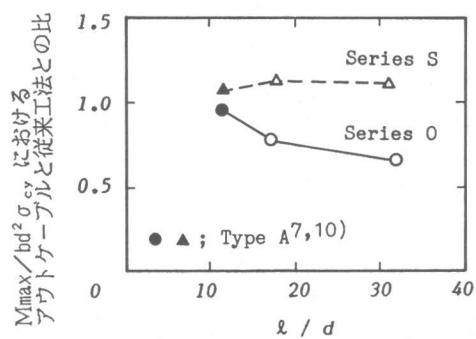


図-3 M_{\max} における従来工法との比較

表-4 最大曲げモーメントの実測値と計算値との比較

タイプ	供試体名	実測値 tf·m	計算値 / 実測値				スパン 有効高さ
			Mattock's method	Baker's method	Gifford's method	Takemoto's method	
S	NS-1	0.361	0.996	0.965	1.163	0.703	18.0
	OS-1	0.291	1.232	1.183	1.389	0.914	17.5
	SS-1	0.358	0.966	0.927	1.106	0.874	19.0
L	NL-1	0.305	1.190	1.138	1.341	0.927	30.5
	OL-1	0.185	1.182	1.234	1.620	0.716	32.2
	SL-1	0.343	0.985	0.938	1.082	0.801	31.2
A ^{*)}	NA-1	18.02	0.956	0.929	1.048	0.902	11.5
	OA-1	17.60	1.020	0.993	1.129	0.963	11.3
	SA-1	19.99	0.903	0.881	1.003	0.853	11.6

*) タイプAは文献[7, 10]の供試体である。

も減少する傾向にあり、 ℓ / d が約 32 の場合約 35 % 減少した。また、中間支持のあるシリーズ S の M_{\max} はシリーズ N と比較して ℓ / d にかかわらず約 6 ~ 12 % 増大した。この M_{\max} の増大は次のように考えられる。シリーズ S はアウトケーブルに支持部を設けているため、P R C ばかりのたわみが増加するに伴いアウトケーブルに角度変化が生じる。そのため、支持部では下から上向きの力が作用することになるためと考えられる。さらに、同一たわみ量の場合において P C 鋼材の角度変化により生ずる曲げモーメントを弾性理論のたわみ計算により求めると、シリーズ S の曲げモーメントはシリーズ N と比較してタイプ L の場合約 1.47 倍の増大になると算出された。このことは、後述する図-9 の曲げモーメントとたわみとの関係において、同一たわみ量の場合シリーズ S の曲げモーメントがシリーズ N よりも大きくなることを示していると考えられる。なお、弾性理論による算定において、たわみの増加により断面に作用する P C 鋼材の力は、従来工法のシリーズ N では P C 鋼材が断面内部に埋め込まれているため等分布荷重と仮定し、中間支持のあるシリーズ S では支持部で集中荷重が作用しているとして算出した。

次に、 M_{\max} の実測値と計算値との比較を表-4 に示した。計算値には Mattock¹¹⁾、Baker¹²⁾、Gifford¹²⁾ ならびに竹本⁹⁾ などによる略算式を用いて算出した。これらはいずれもアンボンド P C ばかりにおける提案式であるが、ここではこれらの提案を P R.C ばかりに適用して M_{\max} を算出してみた。各計算値は、ACI 規準¹³⁾ によるコンクリートの応力ブロック係数と終局ひずみを用いて算出した。表-4 によれば、シリーズ N, S において Mattock, Baker による計算値は ℓ / d が大きくなると実測値よりも大きく算出される傾向にあるが、他の計算値と比較して実測値と良く一致している。しかし、中間支持

のないシリーズOの計算値は、タイプAでは実測値と良く一致したが、 ℓ/d が大きなタイプS、Lでは竹本を除いた他の計算値は実測値よりも約20～60%大きく算出された。これは、最大曲げモーメント時のPC鋼材応力 σ_{pu} の計算値が実測値よりもかなり大きく算出されたためである。竹本による σ_{pu} の計算値は、タイプS、Lの場合PC鋼材量が多いため導入プレストレス量よりも約12～39%小さく算出されたが、参考のため表-4に記載した。以上により、各略算式により M_{max} を算出することは、3-2で述べるよう σ_{pu} に及ぼす ℓ/d の影響が大きいため十分な検討が必要であると思われる。

3-2 PC鋼材の応力

図-4、図-5にPC鋼材の応力割合 σ_p/σ_{pe} と M/M_{max} との関係を示した。ここに、 σ_p 、 σ_{pe} はPC鋼材のそれぞれ応力ならびにプレストレス導入時の応力で、Mは曲げモーメントである。図-4、5によれば、 ℓ/d が小さい場合(タイプS)におけるシリーズO、Sの σ_p/σ_{pe} はシリーズNと同様な傾向を示した。しかし、 ℓ/d が大きい場合(タイプL)Mが増加してもシリーズOの σ_p/σ_{pe} はほとんど増加せずほぼ一定であった。シリーズSはシリーズNと同様な傾向を示した。これは、シリーズSはアウトケーブルを支持しているため、支持部のアウトケーブルはPRCばかりの橋軸方向の変形曲線とほぼ同一な変形量となり、PC鋼材の変形曲線ははりの変形曲線に近づく。しかし、シリーズOは支持部がないため、PC鋼材の変形曲線はほとんど直線となり、はりの変形曲線とは大きく異なる。また、従来工法のシリーズNはPC鋼材が断面内部に埋め込まれているためはりの変形曲線とPC鋼材の変形曲線は同一となる。そのため、シリーズSの σ_p/σ_{pe} はシリーズNと同様な傾向を示し、シリーズOの σ_p/σ_{pe} はシリーズNよりも小さくなる

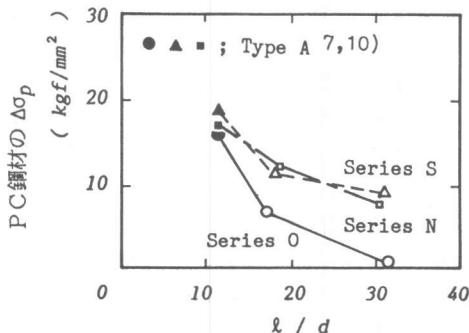


図-6 PC鋼材の応力増分 $\Delta\sigma_p$ と ℓ/d との関係

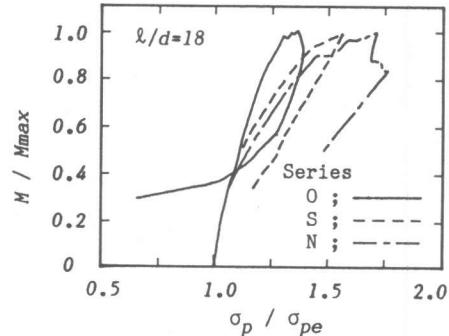


図-4 σ_p/σ_{pe} と M/M_{max} との関係
(タイプSの場合)

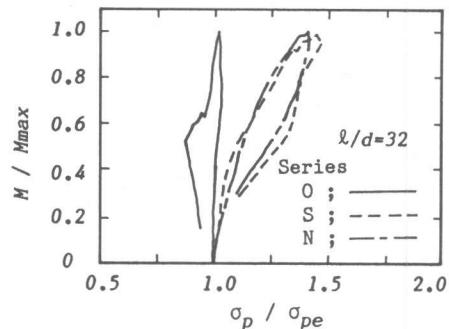


図-5 σ_p/σ_{pe} と M/M_{max} との関係
(タイプLの場合)

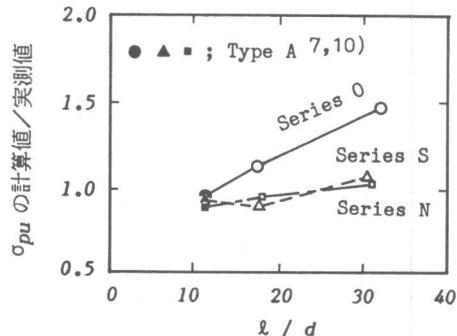


図-7 σ_{pu} の実測値と計算値との比較
(Mattockによる計算値の場合)

ものと考えられる。これらの傾向は ℓ/d が大きくなれば顕著に表われてくるものと考えられる。また、 M_{max} を超えて PRC ばかりに載荷を続けると、たわみの増加に伴い増加していた σ_p が減少に転ずる点が存在した。同様な変曲点は、鈴木らによれば¹⁴⁾ PRC ばかりの引張鉄筋の応力に存在し、小柳らによれば¹⁵⁾ 鉄筋コンクリートばかりの引張鉄筋のひずみに存在していると報告している。

次に、 M_{max} までの PC 鋼材の応力増分 $\Delta\sigma_p$ と ℓ/d との関係を図-6 に示した。図-6 によれば、 ℓ/d が大きくなるにしたがいシリーズ O の $\Delta\sigma_p$ はシリーズ N と比較して大きく減少する傾向にあり、 ℓ/d が 3.2 の場合シリーズ O の σ_{pu} はプレストレス導入時の応力 σ_{pe} の 1.02 倍であった。 M_{max} 時の PC 鋼材の応力 σ_{pu} の実測値と計算値との比較を図-7 に示した。 σ_{pu} の計算値には、 M_{max} の計算値が実測値と良く一致している Mattock によるものを用いた。図-7 によれば、シリーズ O は ℓ/d が増大するにしたがい計算値が大きく算出される傾向にあった。また、シリーズ S はシリーズ N の計算値とはほぼ同値であった。

3-3 変形性状

図-8、9 に曲げモーメントとスパン中央のたわみとの関係を示した。 ℓ/d が 1.1 の場合、中間支持のないシリーズ O の変形性状は、 M_{max} まで従来工法のシリーズ N の性状と極めて良く類似した⁷⁾。しかし、 ℓ/d が大きくなると、シリーズ O とシリーズ N との変形性状は大きく異なる。特に、 ℓ/d が 3.2 (図-9) におけるひびわれ発生以降の変形性状は、同一たわみ量においてシリーズ O の曲げモーメントがシリーズ N と比較して著しく低下している。

次に、 M_{max} までのエネルギー U_{max} について、シリーズ O、S と従来工法との比較を図-10 に示した。 U_{max} は曲げモーメントとスパン中央のたわみから面積として求めた。図-10 によれば、 $\ell/d \geq 1.8$ においてシリーズ O の U_{max} はシリーズ N と比較して約 40% の大きな減少を示した。しかし、中間支持のあるシリーズ S の U_{max} は ℓ/d にかかわらずシリーズ N と比較して約 5~15% 増大した。したがって、中間支持のないシリーズ O の U_{max} は従来工法と比較して ℓ/d が大きくなると著しく減少するため、アウトケーブルを適切な位置で支持することが必要であると思われる。その方法として、はりの最大たわみの生ずる点に支持部を設けた場合

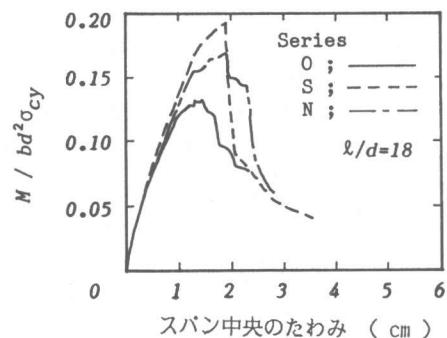


図-8 曲げモーメントとスパン中央のたわみとの関係(タイプ S の場合)

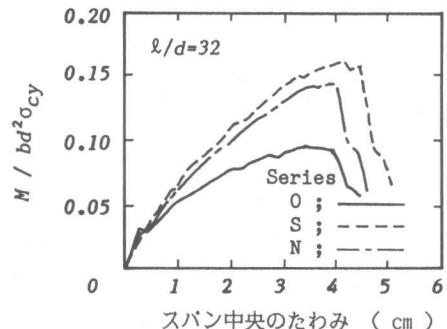


図-9 曲げモーメントとスパン中央のたわみとの関係(タイプ L の場合)

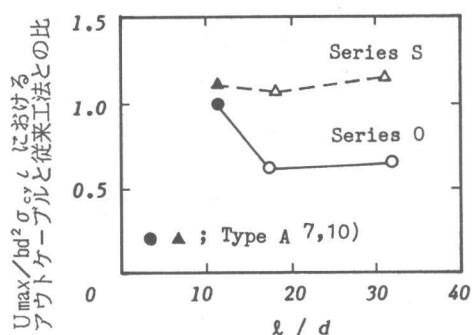


図-10 U_{max} における従来工法との比較

従来工法と同程度のエネルギーが得られたこと¹⁶⁾から、最大たわみの生ずる点で支持するのが効果的な方法であると考えられる。

4.まとめ

ℓ/d の異なるアウトケーブルを用いたPRCばかりと従来工法のPRCばかりとの静的曲げ載荷実験を行い、本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次の通りである。

(1) アウトケーブルの中間支持のないPRCばかりは、従来工法と比較して ℓ/d が大きくなると最大曲げモーメント M_{max} ならびに M_{max} までのエネルギー U_{max} がともに著しく減少する傾向を示した。しかし、中間支持したPRCばかりは ℓ/d にかかわらず M_{max} 、 U_{max} がともに従来工法よりも増加する傾向を示した。

(2) PC鋼材の応力増分 $\Delta\sigma_p$ は、従来工法ならびに支持の有無にかかわらず ℓ/d が増加すれば減少する傾向を示した。この $\Delta\sigma_p$ の減少は、中間支持のあるPRCばかりでは従来工法とほぼ同じ値を示し、中間支持のないPRCばかりでは ℓ/d が大きい場合従来工法よりも著しく減少する傾向を示した。

(3) M_{max} までの変形曲線は、 ℓ/d が小さい場合アウトケーブルの支持の有無にかかわらず従来工法と同様な変形曲線となった。しかし、 ℓ/d が大きい場合中間支持のないPRCばかりの変形曲線は従来工法ならびに中間支持のあるPRCばかりと比較して、ひびわれ発生以降の領域で曲げモーメントが著しく低下する傾向を示した。

以上により、アウトケーブルの中間支持のないPRCばかりは ℓ/d が大きくなると耐力などが従来工法と比較し著しく減少する傾向にあった。しかし、中間支持のあるPRCばかりは ℓ/d にかかわらず中間支持の効果により従来工法のPRCばかりの挙動に類似する傾向を示した。アウトケーブルを用いたPRCばかりの挙動に及ぼすこの中間支持の効果は支持部の位置ならびに数により異なるため、これらの点についてはさらに検討する必要がある。

最後に、本実験を行うにあたり日本大学理工学部土木材料研究室ならびに構造工学第2研究室の関係者各位に感謝致します。特に、実験実施ならびに図表の整理に協力してくれた大崎雄作、佐藤基直、十川哲久、斎藤 泉の諸君に感謝致します。

<参考文献>

- 1) Muller, J. : Construction of Long Key Bridge, PCI Journal, Nov.-Dec., 1980, pp. 97~111
- 2) Podolny, W. and Mireles, A. A. : Kuwait's Bubiyan Bridge—a 3-D Precast Segmental Space Frame, PCI Journal, Jan.-Feb., 1983, pp. 68~107
- 3) 石橋忠良, 中原繁則, 金森 真: 上野~大宮間のPC構造物, コンクリート工学, Vol. 23, No. 4, 1985, pp. 16~23
- 4) 酒井和廣: 美陵高架橋の補修, 橋梁と基礎, Vol. 19, No. 8, 1983, pp. 86~89
- 5) 第14回フレシネー技士海外研修団: プレストレスコンクリートにおける補修・補強例と損傷対策, プレストレスコンクリート, Vol. 25, No. 5, 1983, pp. 41~48
- 6) 豊島株式会社: PC橋設計・施工上の発展, プレストレスコンクリート, Vol. 25, No. 1, 1983, pp. 8~16
- 7) Yaginuma, Y. and Kitada, Y. : Mechanical Behavior of Partially Prestressed Concrete Beams with Exterior Cables, Transactions of the JCI, Vol. 9, 1987, pp. 351~358
- 8) BSI : The Structural Use of Concrete, CP 110, 1972
- 9) 建築学会: プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986
- 10) 柳沼善明, 北田勇輔: アウトケーブルを用いたPRCばかりの曲げ載荷実験, 土木学会年次学術講演会, 1987, pp. 186~187
- 11) Mattock, A. H., Yamazaki, J. & Kattulla, B. T. : Comparative Study of Prestressed Concrete Beams, with and without Bond, J. of ACI, Vol. 68, No. 2, 1972, pp. 116~125
- 12) 宮本征夫, 岩崎岩雄: アンボンドPC部材の静的曲げ強度, 鉄道技術研究所報告, No. 826, 1973, pp. 1~24
- 13) ACI Committee 318 : Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1983
- 14) 鈴木計夫, 中塚 信, 阿波野昌幸: コンクリートはり部材断面の曲げ終局限界点に関する研究(その1)各種終局域指標点と提案する曲げ終局限界点の存在メカニズム, 日本建築学会構造系論文報告集, 第383号, 1988. 1, pp. 49~56
- 15) 小柳 治, 六郷恵哲, 岩瀬裕之: RCはりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響, 土木学会論文集, No. 348, V-1, 1984, pp. 153~162
- 16) Yaginuma, Y. and Kitada, Y. : Flexural Loading Experiment of Members with Exterior Cables, Transactions of the JCI, Vol. 8, 1986, pp. 237~244