

(72) 内外ケーブル比率の変化に伴うプレキャストセグメントPC梁の曲げ特性に関する実験的検討

鹿島建設(株) 技術研究所

○新井 崇裕

同 上

正会員 日紫喜剛啓

同 上

夏目 忠彦

1. はじめに

外ケーブル構造とプレキャストセグメント架設工法を併用したPC(以下、PEPC)構造は、施工の省力化・工期の短縮・品質の管理などの観点から非常に優れた構造形式である。しかしながら、コンクリートと付着のない外ケーブルは、平面保持の仮定が適用できないため、部材断面の破壊抵抗曲げモーメント算定にあたって付着のある内ケーブルと同様の取扱いができず、外ケーブル部材では、終局限界状態において荷重増加に伴う部材の変形と、外ケーブル応力度の増減を評価して終局曲げ耐力を算出する必要がある。特に、プレキャストセグメント構造では、外ケーブル応力度の増加を耐力評価に見込まないと、終局限界状態でPC鋼材量が決定される場合も生じ、必ずしも設計上合理的であるとは言えない。また、近年、プレキャストセグメント工法による橋梁が数橋建設されているが、そのほとんどにおいて内外ケーブルを併用した構造形式が採用されているにもかかわらず、内外ケーブルを併用した場合のPEPC梁の曲げ特性について、過去に研究された例は少なく、内外ケーブル比率の変化に伴ってこの種の構造部材がどのような挙動を示すかについては十分明らかにされていないのが現状である。以上のような状況を鑑み、本研究では、内外ケーブル比率を因子とした荷重実験を行って、PEPC構造の曲げ特性並びに終局限界状態における外ケーブル応力度の増減について実験的に検討し、さらに、PEPC構造の終局状態における外ケーブル応力度を各国の基準あるいは提案されている算定式でどの程度評価できるかについて検討した。

2. 実験概要

2.1 縮尺模型実験の基本的な考え方

本研究では、供試体は実構造物の約1/8縮尺のものを用いたが、供試体の設計の際には、コンクリート断面積に対するケーブル比及び導入プレストレス量を実構造物と同程度にすることで、実構造物と同様な力

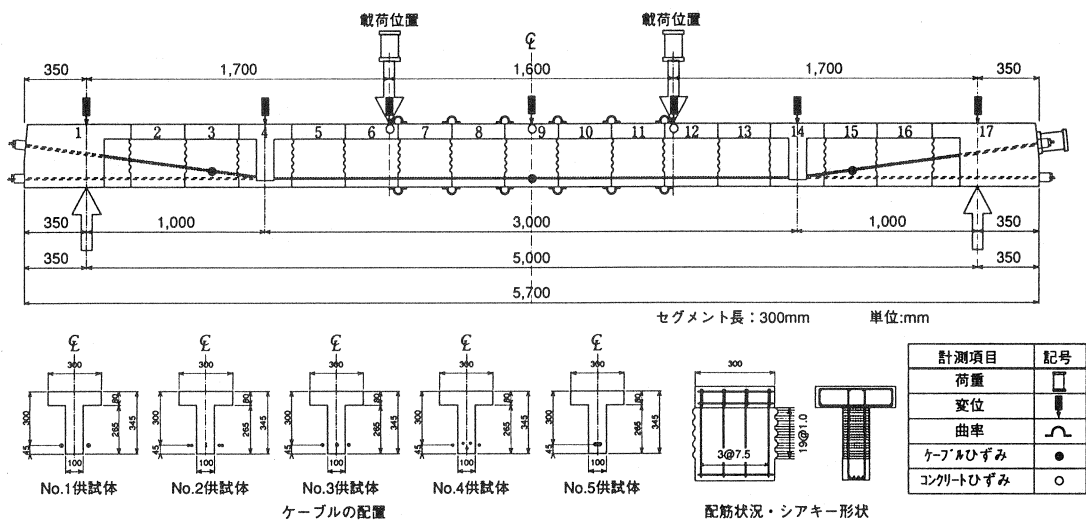


図-1 供試体諸元・計測項目・計測位置・荷重位置

学的挙動を示すように配慮した。また、自重による影響を再現するために、自重分は載荷することにした。載荷は油圧ジャッキによる鉛直方向への静的2点単調載荷で、自重分の等分布荷重を模擬載荷できるように載荷位置を約3等分点にした(図-1)。なお、自重分を載荷した後に、載荷実験を行ったわけであるが、自重分を載荷した後のケーブル応力度が実構造物と同程度の0.55Pu (Pu:ケーブルの引張強さ)となるように留意した。

### 2. 2 供試体諸元と実験因子

供試体諸元、計測項目、計測位置及び載荷位置を図-1に、実験因子及びコンクリート・グラウトの圧縮強度を表-1に、ケーブル及び補強筋の機械的性質を表-2に示す。

現在施工されている内外ケーブルを併用したプレキャストセグメント架設工法による橋梁では、内外ケーブル比率は、内:外=3:7程度が一般的である。従って、本研究では、内:外=3:7を基準(No.3供試体)にして、内外ケーブル比率(断面積比)を大小に変化させた5種類を実験因子とし、その他の因子は全て一定となるようにした。全ての供試体において、プレキャストセグメント(以下、セグメント)はロングライン=マッチキャスト方式で製作し、一つのセグメント長は300mmとした。セグメントには軸方向補強筋として引張鉄筋比及び圧縮鉄筋比とも0.28%(D6×4本)の鉄筋を、横方向補強筋としてせん断補強筋比0.85%(D6@75mm)の鉄筋を配置した。セグメントの組立では、接合面にエポキシ樹脂(圧縮強度:70.8N/mm<sup>2</sup>, 引張強度:22.1N/mm<sup>2</sup>)を塗布した後、圧着接合(圧縮応力度:0.28N/mm<sup>2</sup>)した。導入プレストレス量は0.55Pu(261.8kN)とし、デビエータ部にはコンクリート梁部材(以下、桁)と外ケーブルとの摩擦を低減させるためにテフロンシートを配置した。内ケーブルには、プレストレス導入後セメントペーストによるグラウトを行った。

## 3. 実験結果

### 3. 1 曲げ特性

実験結果を表-3に、荷重とスパン中央鉛直変位(以下、変位)の関係を図-2に示す。

破壊状況は、No.1(内0%)では、ひび割れ発生後外ケーブルが降伏する前に桁上縁が圧縮破壊(以下、圧壊)して耐力を失った。No.2(内12%)では、ひび割れ発生後内ケーブルが降伏し、外ケーブルが降伏する前に圧壊と内ケーブルの破断がほぼ同時に起こり耐力を失った。No.3(内33%)及びNo.4(内63%)では、

表-1 実験因子及びコンクリート・グラウトの圧縮強度

供試体 No.	内外ケーブルの比率		ケーブル断面積 (mm <sup>2</sup> )		使用P C鋼より線		コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		グラウト圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	内	外	内	外	内	外	奇数セグメント	偶数セグメント	
1	0%	100%	—	277.40	—	SWPR7A 15.2×2	49.7	45.6	—
2	12%	88%	33.03	242.58	SWPR2×1 SWPD3×1	SWPR7A 9.3×2 10.8×2	52.1	47.6	25.6
3	33%	67%	92.90	185.80	SWPR7A 12.4×1	SWPR7A 12.4×2	50.3	47.6	20.1
4	63%	37%	172.90	103.22	SWPR7A 9.3×2 10.8×1	SWPR7A 9.3×2	52.2	48.9	22.8
5	100%	0%	277.40	—	SWPR7A 15.2×2	—	51.1	46.9	22.8

\*コンクリート及びグラウトの圧縮強度は実験時における強度を示す。

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
SWPR2	1906.2	2012.1	1.87×10 <sup>5</sup>
SWPD3	1917.3	2023.2	1.88×10 <sup>5</sup>
SWPR7A 9.3	1714.8	1838.8	2.01×10 <sup>5</sup>
SWPR7A 10.8	1716.4	1851.3	1.93×10 <sup>5</sup>
SWPR7A 12.4	1668.5	1747.0	1.94×10 <sup>5</sup>
SWPR7A 15.2	1600.6	1708.7	1.92×10 <sup>5</sup>
SD295 D6	320.8	478.5	2.10×10 <sup>5</sup>

表-3 実験結果 (荷重・外ケーブル応力度・増加量)

供試体 No.	項目	破壊段階					
		導入プレス トレス量	ひび割れ 発生時	内ケーブル 降伏時	コンクリート 圧壊時	外ケーブル 降伏時	内ケーブル 破断時
1	荷重 P (kN)	0	78	—	108	—	—
	外ケーブル応力度 $\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	887	908	—	1200	—	—
	外ケーブル応力度の増加量 $\Delta\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	0	22	—	313	—	—
2	荷重 P (kN)	0	84	123	128	—	128
	外ケーブル応力度 $\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	899	970	1361	1474	—	1474
	外ケーブル応力度の増加量 $\Delta\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	0	71	463	576	—	576
3	荷重 P (kN)	0	82	120	132	120	118
	外ケーブル応力度 $\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	905	953	1221	1448	1524	1540
	外ケーブル応力度増加量 $\Delta\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	0	48	316	543	619	635
4	荷重 P (kN)	0	79	124	147	142	139
	外ケーブル応力度 $\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	891	950	1150	1509	1569	1617
	外ケーブル応力度の増加量 $\Delta\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	0	58	259	618	678	725
5	荷重 P (kN)	—	79	136	155	—	—
	外ケーブル応力度 $\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	—	—	—	—	—	—
	外ケーブル応力度の増加量 $\Delta\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	—	—	—	—	—	—

ひび割れが発生し、内ケーブルが降伏した後には圧壊した。しかし、圧壊後も急激な耐力の低下はなく、最終的には外ケーブルが降伏した後に内ケーブルが破断して耐力を失った。No.5 (内100%) では、ひび割れが発生し、内ケーブルが降伏した後に圧壊したが、その後も耐力を維持し続けた。No.5では、実験の安全上、内ケーブルの破断まで荷重を行わなかった。上述の破壊段階は図中に記号で示した。

また、ひび割れは全般的に荷重スパン内のセグメント接合面近傍に集中しており、内ケーブル比率が大きくなるに従ってひび割れ分散がよくなる傾向が見られた<sup>1)</sup>。

以上、曲げ特性についてまとめると以下のとおりである。

- 1) 内ケーブル比率が大きくなるに従って、曲げ特性は脆性的なものからよりじん性のあるものへ、以下に示す3タイプで推移する (a)→(b)→(c) ことが明らかになった。

- (a)外ケーブルが降伏する前に圧壊して、急激に耐力が低下し、終局に至るタイプ (内0%)
- (b)内ケーブルが降伏した後、圧壊と内ケーブルの破断が同時に起こって急激に耐力が低下し、外ケーブルが降伏する前に終局に至るタイプ (内12%)
- (c)内ケーブルが降伏し、圧壊しても耐力は急激には低下せず、外ケーブルが降伏した後に内ケーブルの破断で終局に至るタイプ (内33~63%)

- 2) 最大荷重及び終局変位は、内ケーブル比率の増加に従って大きくなることが明らかになった (図-2)。
- 3) ひび割れ分散性は、内ケーブルの比率が大きくなるに従ってよくなることが明らかになった。

### 3. 2 外ケーブルの張力 (応力度) 増加

荷重と外ケーブル応力度の関係を図-3に、内外ケーブル比率によって、各破壊段階における外ケーブル応力度の増加量 (以下、増加量) がどのように変化するかをより明確にするために、その関係を図-4に示す。また、これらの数値を表-3に示す。

図-3より、外ケーブル応力度はひび割れ発生まではほとんど増加せず、ひび割れ発生後に大きく増加していることがわかる。また、同一荷重時には内ケーブル比率の小さいものほど、外ケーブル応力度が大きくなる。このことは、内ケーブル比率の小さいものほど外力に抵抗するための外ケーブルの分担分が

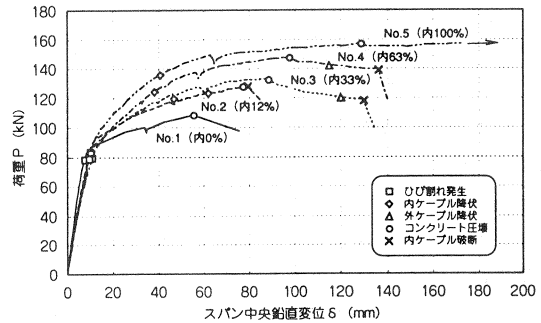


図-2 荷重とスパン中央鉛直変位の関係

大きいことを示している。

図-4及び表-3より、ひび割れ発生時では、各供試体(No.1~No.4)の増加量は22~71N/mm<sup>2</sup>で、ほとんど外ケーブル応力度の増加はないこと、内外ケーブル比率によって増加量に大差はないことがわかる。しかし、コンクリート圧壊時では、全外ケーブル構造のNo.1(内0%)の増加量は313N/mm<sup>2</sup>であるのに対し、内外ケーブル併用構造のNo.2(内12%)~No.4(内63%)の増加量は543~618N/mm<sup>2</sup>と、増加量に大きな差があることがわかる。さらに、内外ケーブル併用構造であれば、内外ケーブル比率によってコンクリート圧壊時の増加量に大差はないこと、完全に耐力が失われた内ケーブル破断時では、内ケーブル比率の増加に従って増加量はほぼ比例的に増加していることがわかる。

### 3.3 破壊断面におけるコンクリート圧縮縁ひずみと外ケーブルひずみの関係

内ケーブル構造と外ケーブル構造のひび割れ発生から終局状態における過程での破壊断面におけるひずみ分布は、同一載荷荷重時では図-5(a)(b)に示すような違いが知られている<sup>2)</sup>。すなわち、外ケーブル構造は、内ケーブル構造と比較すると、ケーブルひずみが同一の時(同一載荷荷重時)に、コンクリートひずみが卓越する構造となる。従って、外ケーブル構造は、十分なケーブルの張力増加が生じる前にコンクリート圧縮縁ひずみ $\epsilon_c$  (以下、圧縮縁ひずみ)が終局ひずみに到達するため、内ケーブル構造に比べて終局耐力が低下することになる。一方、内外ケーブル併用構造のひずみ分布は図-5(c)に示すようになっておりと仮定すれば、外ケーブルひずみが同一の時の圧縮縁ひずみは、外ケーブル構造に比べて小さくなり、圧縮縁ひずみが終局に到達するのが遅くなって終局耐力が大きくなるということになる。このことを調べるために破壊断面における圧縮縁ひずみと外ケーブルひずみの関係を図-6に示す。

図-6より、内外ケーブル併用構造(No.2~No.4)は、外ケーブル構造(No.1)に比べて、外ケーブルひずみが同一の時に圧縮縁ひずみが小さいことがわかる。

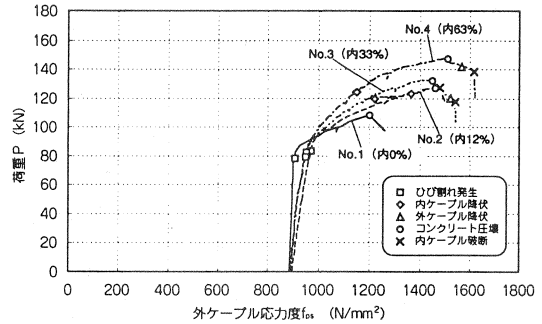


図-3 荷重と外ケーブル応力度の関係

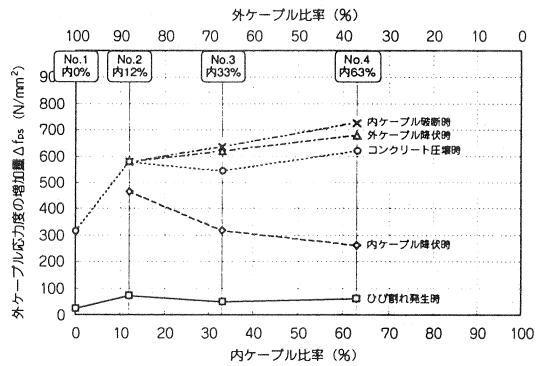


図-4 内外ケーブル比率と外ケーブル応力度の増加量の関係

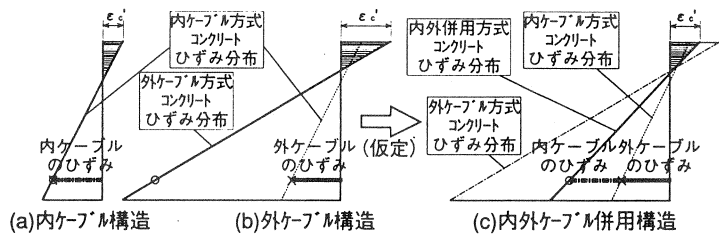


図-5 各ケーブル構造の破壊断面でのひずみ分布

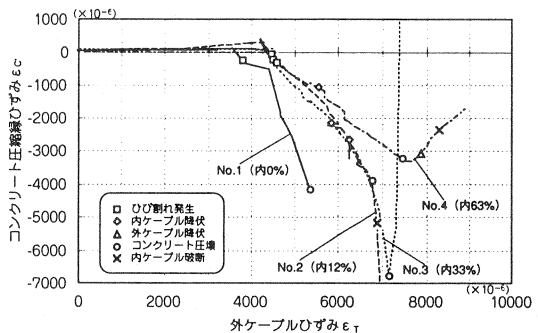


図-6 破壊断面におけるコンクリート圧縮縁ひずみと外ケーブルひずみの関係

すなわち、先に述べた仮定は成り立つものと考えられる。また、同じ内外ケーブル併用構造においても、内ケーブル比率が大きくなるに従って、同一外ケーブルひずみに対する圧縮縁ひずみが小さくなっていることがわかる。このことは、内ケーブル比率が大きくなるに従って終局耐力が大きくなるということを示しているものと考えられる。

4. 終局状態における外ケーブル応力度の算定についての検討

一般的な外ケーブル構造では、外ケーブルが降伏する前にコンクリートの圧壊により終局状態を迎える。従って、外ケーブル構造の終局曲げ耐力の算出にあたっては、終局時における外ケーブルの応力度をどのよう to 評価するかが問題になる。

そこで、本章では現在各国の基準で示されているアンボンドケーブル構造の終局状態におけるケーブル応力度の算定式及びアンボンドケーブルの応力度増加に関する研究成果から提案されている算定式を用いて、PEPC構造の終局状態における外ケーブルの応力度をどの程度評価できるかについて、本研究で用いた供試体の形状寸法の範囲内で検討する。

検討に用いた算定式は、ACI<sup>3)</sup>、AASHTO<sup>4)</sup>、BS<sup>5)</sup>、DIN<sup>6)</sup>、PCI<sup>7)</sup>の各国の基準と、Naaman<sup>8)</sup>らによって提案されている6種類とした。

これらの算定式は、いずれも(4.1)式の形で示され、外ケーブル応力度の増加量 $\Delta f_{ps}$ を如何に評価するかがポイントとなっている。そこで、本検討では $\Delta f_{ps}$ の計算値とコンクリート圧壊時における $\Delta f_{ps}$ の実験値を比較することで外ケーブル応力度の算定について評価することにした。

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.1)$$

ここで、 $f_{ps}$ :終局状態におけるケーブル応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{pe}$ :有効プレストレスによるケーブル応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta f_{ps}$ :終局状態におけるケーブル応力度の増加量 (N/mm<sup>2</sup>)

各算定式による終局状態における $\Delta f_{ps}$ の計算値及びその計算精度(計算値/コンクリート圧壊時における実験値)を表-4及び図-7に示す。

図-7より、No.1(内0%)の全外ケーブル構造の計算精度と、No.2(内12%)~No.4(内63%)の内外ケーブル併用構造の計算精度とでは、明らかに差がある(全外ケーブル構造だけ高い値を示している)ことがわかる。これは、全外ケーブルのPEPC構造では、コンクリートと附着のある鋼材(鉄筋あるいは内ケーブル)が全く存在しないことによる影響が大きいものと考えられる。各提案式は、鉄筋については

表-4 各算定式の計算値と計算精度

外ケーブル応力度の増加量 $\Delta f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )					
供試体No.		No.1	No.2	No.3	No.4
内ケーブル比率 (%)		0	12	33	63
計算値	ACI	249	236	214	193
	AASHTO	103	103	103	103
	BS	344	348	368	389
	DIN	678	681	685	709
	PCI	100	100	100	100
	Naaman	714	818	764	824
実験値	コンクリート圧壊時	313	576	543	618
計算精度	ACI	0.80	0.41	0.39	0.31
	AASHTO	0.33	0.18	0.19	0.17
	BS	1.10	0.60	0.68	0.63
	(計算値) DIN	2.16	1.18	1.26	1.15
	(実験値) PCI	0.32	0.17	0.18	0.16
	Naaman	2.28	1.42	1.41	1.33

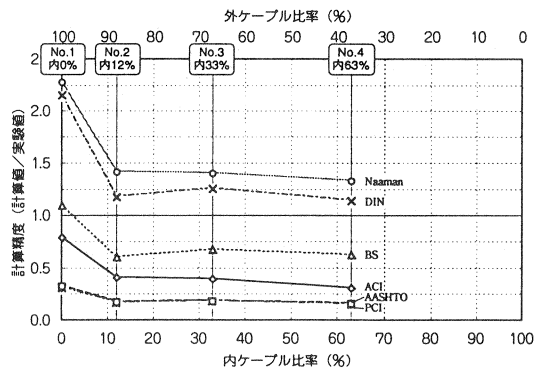


図-7 各算定式の計算精度

評価しているものもあるが、内ケーブルについて評価しているものはなく、今後、鉄筋あるいは内ケーブルの評価を考慮した算定式について検討する必要があると考えられる。また、内外ケーブル併用構造(No.2～No.4)に着目すれば、内外ケーブル比率が変化しても計算精度に特に大差はないことがわかる。

設計的には、DINを除いては、各国の基準は概ね安全側の計算精度を示しており、本供試体の形状寸法の範囲内であれば、PEPC構造の設計に適用しても特に差し支えないものと考えられる。

## 5. おわりに

内外ケーブル比率を因子とした載荷実験を行って、PEPC構造(外ケーブル方式プレキャストセグメントPC構造)の曲げ特性並びに終局限界状態における外ケーブル応力度の増減について実験的に検討した範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 内ケーブル比率が大きくなるに従って、曲げ特性は脆性的な挙動を示すものからよりじん性のある挙動を示すものへ推移することが明らかになった。
- (2) 内ケーブル比率の増加に従って、最大荷重及び終局変位が大きくなること、また、ひび割れ分散性がよくなることが明らかになった。
- (3) 外ケーブル応力度は、ひび割れ発生まではほとんど増加せず、ひび割れ発生後に大きく増加することが明らかになった。
- (4) 外ケーブル応力度の増加量は、コンクリート上縁の圧壊時には、全外ケーブル構造と内外ケーブル併用構造とで大きく異なり、内外ケーブル併用構造の方がより増加量が大きくなることが明らかになった。
- (5) アンボンドケーブル構造の終局状態における応力度の各算定式をPEPC構造に適用した結果、外ケーブル構造と内外ケーブル併用構造とでは、計算精度(計算値/実験値)に明らかな差が認められた。これは、各算定式に内ケーブルを評価する項(あるいは係数など)がないためであると考えられ、今後、内ケーブルの評価を考慮した算定式を確立する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 新井, 日紫喜, 夏目: 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, 1997.6
- 2) 若林, 沼田, 一樹, 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, 1994.6
- 3) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary" (ACI 318-89/ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.
- 4) *Standard Specifications for Highway Bridges*, Fourteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1989, 100 pp.
- 5) "Structural Use of Concrete" (BS8110, Section 4.3.7.3), British Standards Institution, London, 1985.
- 6) German Code, DIN 4227, Teil 6, "Spannbeton, Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund", Entwurf, 1980.
- 7) 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工基準(案), (社)プレストレストコンクリート技術協会, 平成8年3月
- 8) Naaman and Alkhairi: Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 2 — Proposed Methodology, ACI Structural Journal, Vol.88, No.6, pp.683～692, Nov.-Dec. 1991