

論文 内外併用ケーブル方式 PC 梁の耐荷力解析

粟根 聡*¹・幸左 賢二*²・若狭 忠雄*³・谷口 和良*⁴

要旨：内外併用ケーブル方式のPC梁について曲げ破壊実験を行い、外ケーブル比率や軸方向引張鉄筋などのパラメータが曲げ終局耐力に及ぼす影響を実験的に確認した。また、実験により得られたひび割れ分散性結果（ひび割れ幅、平均ひび割れ間隔、等価塑性ヒンジ長など）と既往の算定式との比較を行った。その結果、梁の耐荷力は、外ケーブル比率が大きいほど低下し、軸方向引張鉄筋量が少ない供試体はひび割れ分散性が極端に悪くなり、耐荷力が低下する事などが明らかになった。

キーワード：内外併用ケーブル、終局耐力、ひび割れ分散性、曲率分布

1. まえがき

外ケーブル方式の橋梁は、断面内にシースを配置する必要がないため、ウェブ厚の低減、作業性の向上、工期短縮および品質の向上等多くの利点を有しており、1980年以降において欧米で数多く採用されている。一方、我が国においては、外ケーブル工法は主に補修・補強に用いられていたが、近年新設の橋梁にも積極的に採用される機運が高まっている。

外ケーブル構造の桁は、桁と外ケーブルの挙動が異なり平面保持の仮定が成立しないため、道路橋示方書で示される破壊抵抗曲げモーメントによる終局耐力算定法が適用できない。そこで、外ケーブル構造の終局耐力を評価するため、図-1に従い検討を進めている。これまでに行った検討の内、解析手法およびパラメータ解析については既に発表されており[1]、本報告では主として耐荷力実験結果および解析手法の評価について述べる。

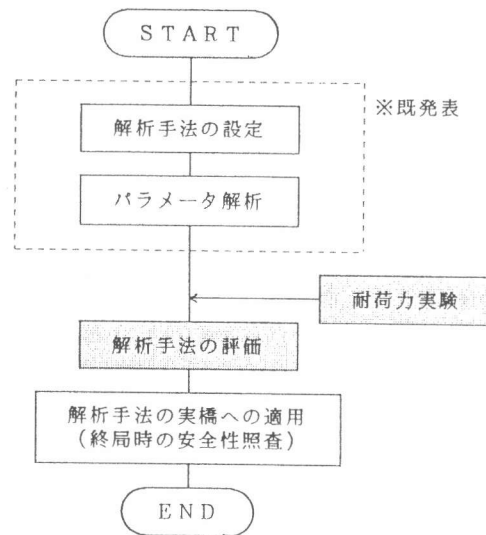


図-1 検討フロー

2. 実験概要

供試体の断面形状は、図-2に示すように桁高1mのT型断面とした。この断面は、図-3に示すモデル橋梁（PC2径間連続ラーメン箱桁橋）において、試設計の結果曲げ破壊安全度がクリティカルとなった断面（A-A断面）を1/3程度に縮小したものである。断面諸元の決定にあたっては、断面図心位置の比、鋼材比およびプレストレスによる応力度を実橋に合わせるよう

- * 1 新構造技術（株）大阪支店設計部主任、工修（正会員）
- * 2 阪神高速道路公団神戸線復旧建設部工事課専門役、工博（正会員）
- * 3 新構造技術（株）大阪支店設計部部長（正会員）
- * 4 （株）オリエンタルコンサルタンツ関西支社総合技術部主任技師（正会員）

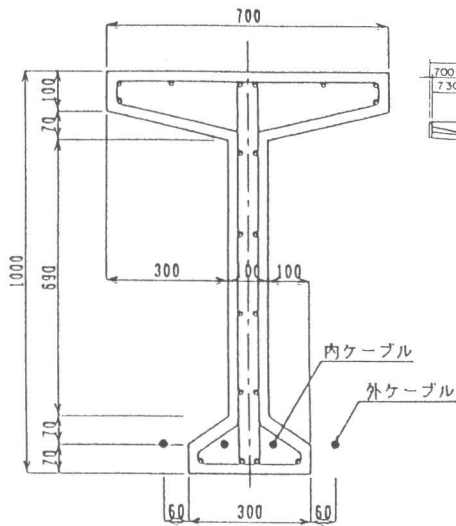


図-2 供試体断面形状図

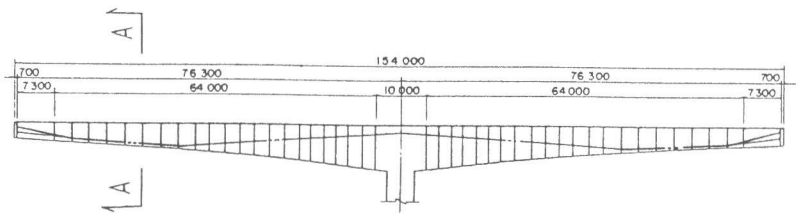


図-3 モデル橋梁の模式図

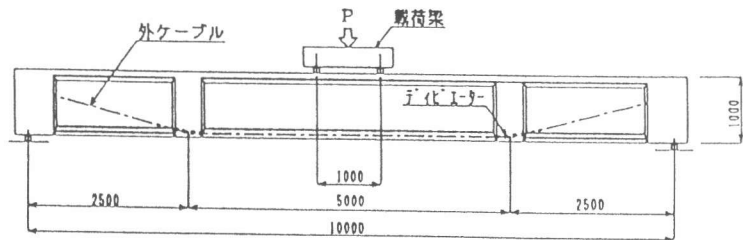


図-4 供試体側面形状図

配慮した。支間は、曲げ破壊を先行させるため a/d を 4.5 とし、図-4 に示すように 10m とした。載荷方法は、支間中央への 2 点載荷とした。

使用材料として、P C 鋼材は P C 鋼より線 (SWPR7B- $\phi 9.5$ 、 $\phi 15.2$ 、SWPR19- $\phi 17.8$)、鉄筋は SD345 (D10 および $\phi 6$) を使用した。また、コンクリートの設計基準強度は 400 kgf/cm^2 とした。使用材料の材料試験結果を表-1 に示す。

検討するパラメータは、予備解析の結果影響が大きいと考えられた①内外併用ケーブル構造における外ケーブル比率の影響、②荷重載荷幅の影響、③桁の下フランジ軸方向鉄筋量とし、計 7 体の供試体を製作した。供試体の種類を表-2 に示す。なお、表-2 に示す内ケーブルは全てグラウトを施したボンドケーブルであり、外ケーブルは桁との付着を有さないアンボンドケーブルである。

3. 実験結果

3.1 荷重～たわみ関係

実験で得られた荷重～たわみ曲線

表-1 使用材料の材料試験結果

材 料	供試体No.	圧縮強度 kgf/cm^2	引張強度 kgf/cm^2	弾性係数 kgf/cm^2
コンクリート	S-1	438	35	2.96×10^5
	S-2	494	33	2.99×10^5
	S-3	599	39	3.09×10^5
	S-4	561	32	3.37×10^5
	S-5	548	47	3.05×10^5
	S-6	605	48	3.51×10^5
	S-7	563	49	3.01×10^5
材 料	供試体No.	径	降伏点 kgf/mm^2	引張強さ kgf/mm^2
鉄 筋 (SD345)	S-1~6	D10	40	56
	S-7	$\phi 6$	試験せず	試験せず
P 鋼より線 (B種)	S-1~7	$\phi 9.5$	184	203
		$\phi 15.2$	178	199
		$\phi 17.8$	178	199

表-2 供試体の種類

供試体No.	内ケーブル 断面積 mm^2	外ケーブル 断面積 mm^2	外ケーブル 比率 (%)	載 荷 幅	下フランジ 引張鉄筋量
S-1	555.5	-	0	1 m	4-D 10 (285.3 mm^2)
S-2	416.1	109.7	20		
S-3	277.4	277.4	50		
S-4	109.7	416.8	80		
S-5	-	554.8	100	3 m	2- $\phi 6$ (56.5 mm^2)
S-6	109.7	416.8	80		
S-7	-	554.8	100		

を図-5に示す。図-5から分かるように、終局耐力は外ケーブル比率が大きくなるにつれて低下しており、S-5供試体（全て外ケーブル）の終局耐力は、S-1供試体（全て内ケーブル）の84%となっている。

また、終局時のスパン中央部でのたわみも外ケーブル比率が大きいほど低下し、S-5供試体のたわみは、S-1供試体の52%となっている。これらは、外ケーブル比率の大きな供試体ほど付着のある引張鋼材が少なくなるため、終局耐力、終局時のたわみとも小さくなるものと考えられる。

また、軸方向引張鉄筋量が少ないS-7供試体の破壊耐力はS-5供試体の73%、終局時のたわみはS-5供試体の63%となっている。これも、付着のある引張鋼材を少なくしたためと考えられる。

なお、外ケーブル比率80%で、載荷幅を変化させたS-6供試体の終局モーメントは101.6tf・mであり、同じ外ケーブル比率80%のS-4供試体の終局モーメント（105.3tf・m）と有意な差は生じなかった。これは、両供試体において終局時における外ケーブル応力増加量に差が見られなかったため（S-4供試体で64.6kgf/mm²、S-6供試体で61.4kgf/mm²）であると考えられる。

3.2 荷重～外ケーブル応力増加量関係

次に、実験で得られた荷重～外ケーブル応力増加量曲線を図-6に示す。図-6の外ケーブル応力増加量は、外ケーブル端部に取り付けたロードセルにより測定した外ケーブル張力の増加量を外ケーブル断面積で除した値である。実験開始時の外ケーブルの有効導入応力は105kgf/mm²であり、そこからの応力増加量である。

図-6より分かるように、終局時の外ケーブル応力増加量も外ケーブル比率が大きいほど低下していることが分かる。

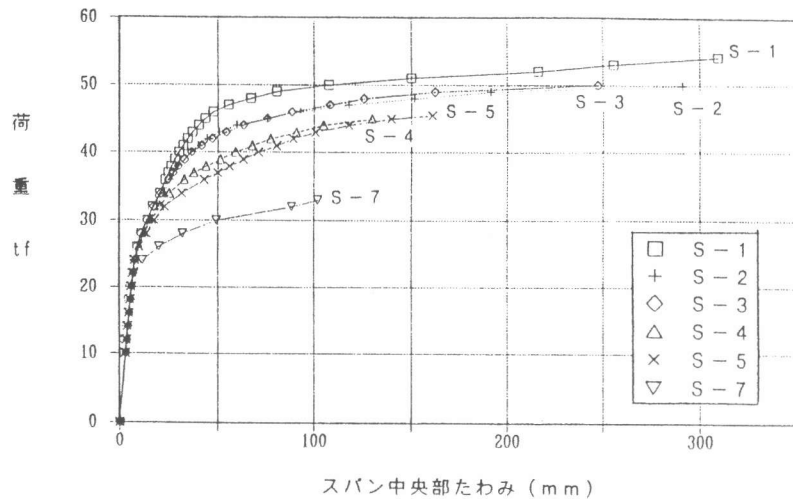


図-5 荷重～たわみ曲線

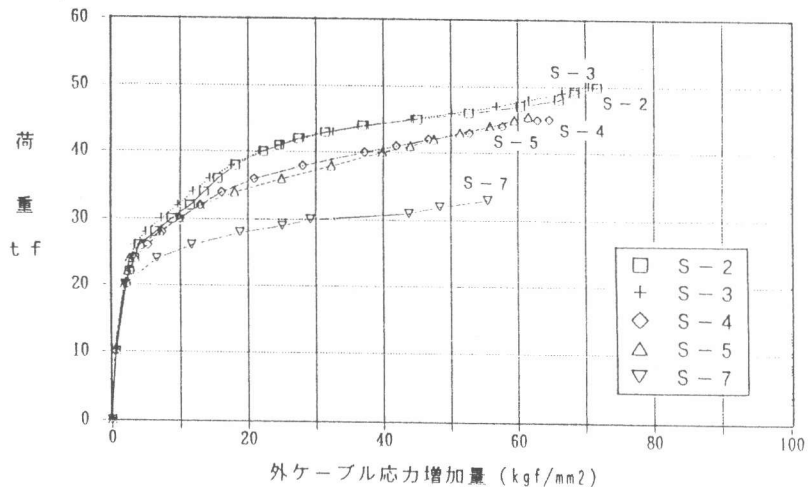


図-6 荷重～外ケーブル応力増加量曲線

3.3 解析値との比較

S-5およびS-7供試体の、荷重～たわみ曲線の実験値と解析値との比較を図-7、8に示す。ここで解析値とは、文献[1]に示される非線形フレーム解析手法により解析した結果である。図-7より分かるように、S-5供試体については、終局時のスパン中央部のたわみは実験値と解析値との間に若干誤差を生じているものの、終局耐力については両者は良く一致していることが分かる。このことは、S-1～4、6供試体についても同様であった。しかし、図-8より分かるようにS-7供試体については、荷重～たわみ関係は実験値の方が解析値よりも小さい結果となった。

これはS-7供試体はひび割れが2本しか発生せず、桁がひび割れ発生部で折れたようなたわみ性状を示したため、理想的なM～ θ 曲線から桁の剛性を算定する解析方法との間で誤差が生じたものと考えられる。

3.4 ひび割れ分散性

実験で得られたS-3、S-5、S-7供試体のひび割れ形状図を図-9に示す。図-9より、外ケーブル比率100%のS-5供試体の方が、外ケーブル比率50%のS-3供試体よりも、

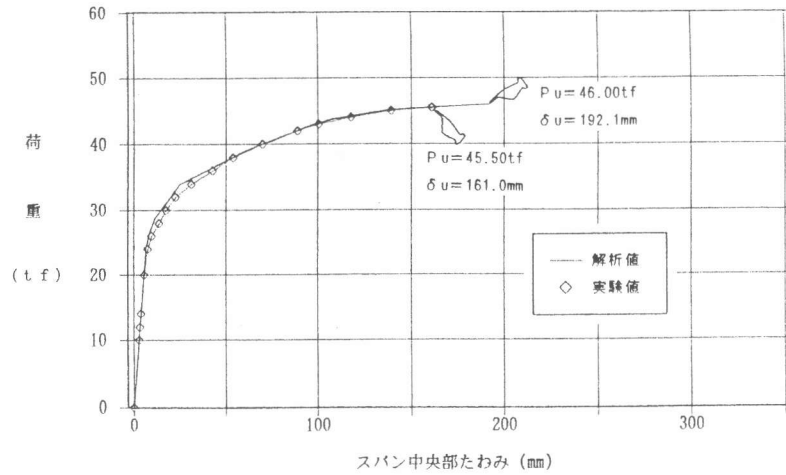


図-7 荷重～たわみ曲線 (S-5 供試体)

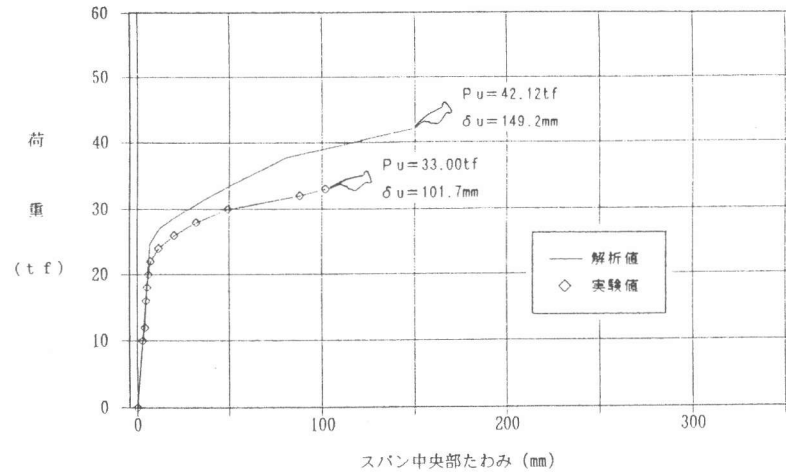


図-8 荷重～たわみ曲線 (S-7 供試体)

表-3 最大ひび割れ幅および平均ひび割れ間隔の比較

供試体No.	最大ひび割れ幅 (mm)			平均ひび割れ間隔 (mm)	
	実験値	計算値		実験値	計算値 建築学会
		建築学会	土木学会		
S-1	-	0.324	0.303	103	133
S-2	-	0.324	0.303	96	133
S-3	0.3	0.324	0.303	133	133
S-4	0.3	0.324	0.303	96	133
S-5	0.6	0.324	0.303	160	133
S-6	0.4	0.324	0.303	103	133
S-7	8.0	-	-	760	-

ひび割れ本数、ひび割れ間隔などのひび割れ分散性が悪くなっていることが分かる。また、軸方向引張鉄筋量を少なくしたS-7供試体ではひび割れが2本しか発生せず、ひび割れ分散性が極端に悪くなっていることが分かる。

実験で得られた鉄筋降伏時の最大ひび割れ幅、平均ひび割れ間隔と、建築学会および土木学会のひび割れ幅算定式により求めたひび割れ幅との比較を表-3に示す[2][3]。

表-3より、S-1~S-6供試体については平均ひび割れ間隔、最大ひび割れ幅ともに実験値と計算値は良く一致する傾向にあるが、S-7供試体は平均ひび割れ間隔、最大ひび割れ幅ともに他の供試体に比べて極端に大きくなっている。これは、S-7供試体の引張鉄筋量が極端に少ない事に加えて、丸鋼を使用しているためと考えられる。

3.5 曲率分布

実験で得られたS-3、S-5、S-7供試体の終局時の曲率分布図を図-10に示す。図-10の曲率分布の実験値は、供試体の上下フランジに30cm間隔で設置した水平変位計により測定した水平変位から求めた桁の曲率をプロットしたものの

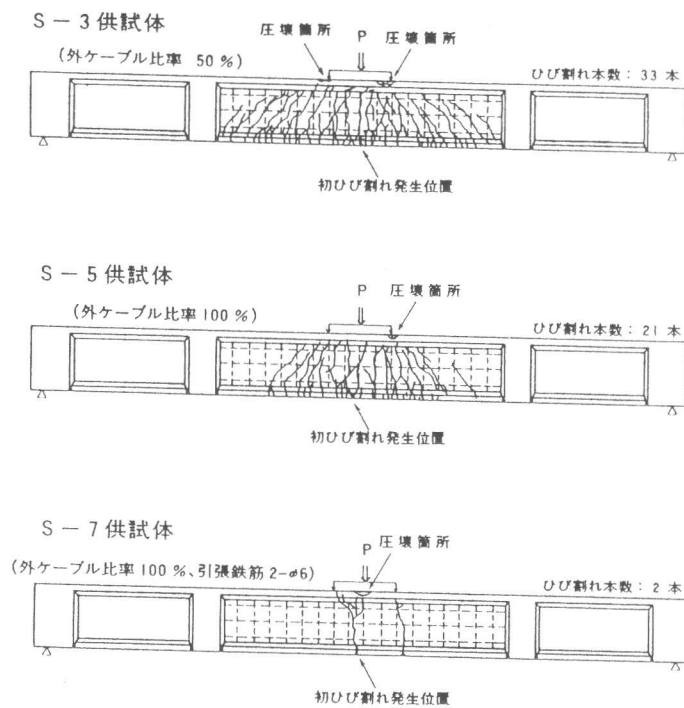


図-9 ひび割れ形状図

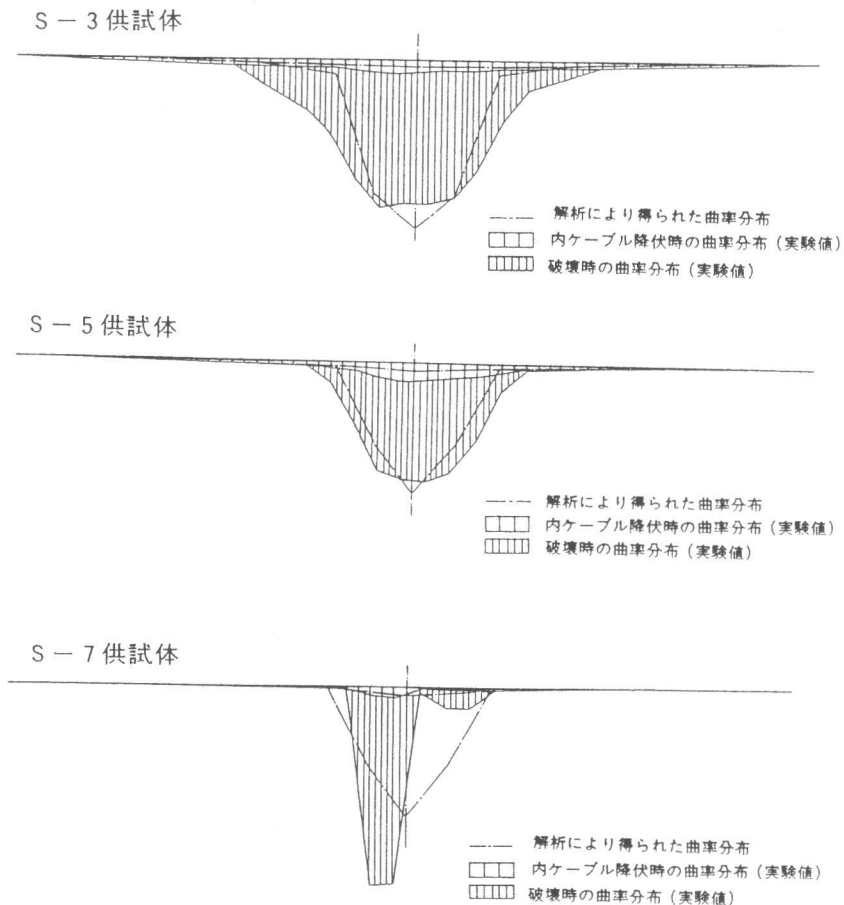


図-10 曲率分布図 (S-3,S-5,S-7供試体)

である。なお、実験値は、破壊直前の曲率分布を、解析値はスパン中央部の断面が破壊したと定義されるひずみに達した時の曲率分布を示す。

また、実験により得られた曲率分布図から求めた等価塑性ヒンジ長 ℓ_{eq} と解析により得られた等価塑性ヒンジ長 ℓ_{eq}' との比較を表-4に示す。表-4の等価塑

表-4 等価塑性ヒンジ長の比較

供試体No.	実験値		解析値	
	$\phi_u - \phi_y$ (rad/m)	ℓ_{eq} (m)	$\phi_u - \phi_y$ (rad/m)	ℓ_{eq}' (m)
S-1	0.036	2.2	0.060	1.7
S-2	0.061	2.4	0.068	1.4
S-3	0.055	2.2	0.065	1.4
S-4	0.033	1.7	0.066	1.3
S-5	0.041	1.7	0.050	1.1
S-6	0.030	2.6	0.050	1.3
S-7	0.077	0.7	0.049	1.1

性ヒンジ長 ℓ_{eq} は、スパン中央部での $(\phi_u - \phi_y)$ と ℓ_{eq} を掛けた値が、縦線部の面積と等しくなるように求めた値である。表-4より、S-7供試体を除いて解析値よりも実験値の方が等価塑性ヒンジ長が大きく、分散性が良いことが分かる。

4. まとめ

今回の実験および解析により得られた結果をまとめると以下の通りである。

①内外併用ケーブル構造では、外ケーブル比率が大きくなるに従いほぼ直線的に終局耐力が低下し、全外ケーブルの供試体の終局耐力は、全内ケーブルの供試体の終局耐力の84%であった。

②下フランジの軸方向引張鉄筋量を極端に少なくしたS-7供試体では、終局耐力が小さくなり、同じ外ケーブル比率100%のS-5供試体の73%であった。これはS-7供試体のひび割れ分散性が極端に悪くなったためであり、実際の橋梁の設計に当たってはひび割れ分散性を良くするための引張鉄筋を十分に配置することが必要である。

③終局耐力の解析結果と実験結果との比較については、S-7供試体以外は良く一致する傾向にあり、十分な引張鉄筋が確保されひび割れ分散性が良好な供試体については、文献[1]の非線形フレーム解析により精度良く解析できる。

④外ケーブル比率80%で、載荷幅を変化させたS-6供試体の終局モーメントは、同じ外ケーブル比率のS-4供試体と有意な差は生じなかった。これは、両供試体において終局時における外ケーブル応力増加量に差が見られなかったため(S-4供試体で64.6kgf/mm²、S-6供試体で61.4kgf/mm²)であると考えられる。

⑤ひび割れの分散性は、外ケーブル比率が大きくなるに従って悪くなる傾向が認められた。また、ひび割れ分散性が悪くなるのに従って終局時のたわみ、および外ケーブル応力増加量が小さくなる傾向にあり、このことが終局耐力に影響を与えているものと考えられる。

参考文献

- [1] 谷口, 藤井, 幸左, 若狭: 内外併用ケーブル工法の終局挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, PP779-784, 1995
- [2] 土木学会: コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編
- [3] 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(III種PC)構造設計・施工指針・同解説