

# 論文 PC 床版の押抜きせん断耐力評価式に関する一考察

奥村征史\*1・浜田純夫\*2・松尾栄治\*3・野村貞広\*4

要旨：PC 床版については、実用的な使用頻度が高いにも関わらず、その静的押抜きせん断破壊機構の解明はもちろん算定式の提案もほとんどなされていない。特に少数主桁橋梁の実現に必要な広幅員の横締め PC 床版を対象とした載荷実験に関する報告は、国内ではほとんど見受けられない。そこで本研究では、二方向および一方向にプレストレスを導入した PC 床版の静的押抜きせん断強度の算定方法について考察を行った。

キーワード：中立軸位置、せん断破壊角度、応力分布範囲

## 1. はじめに

近年、自動車交通量や重車両の増加に伴い道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と略記）の損傷が進み、その一部が抜け落ちたり過大なひび割れが生じているものにおいては、補修または補強が頻繁に行われている。このため昭和 47 年および平成 8 年の道路橋示方書改訂に見られるような、RC 床版の床版厚および鉄筋量を増加させることによる軸荷重の増大がはかられた。一方、省力化あるいはコスト縮減から、プレキャスト床版の実用化がはかられる様になり、橋軸直角方向にプレテンション方式のプレストレスを、また軸方向にポストテンション方式のプレストレスを導入した二方向のプレストレス床版（以下、PC 床版と略記）、あるいは橋軸直角方向にプレテンション方式のプレストレスを導入し、橋軸方向に RC とした一方向の PC 床版が実施工されている（図-1）。また、プレキャスト床版は工場製品で品質管理が行いやすいために、現場打ちコンクリートよりも品質が一定しているメリットもある。

RC 床版に関する押抜きせん断強度は国内外で多く研究されている。特に我が国においては角

田ら<sup>1)</sup>および松井ら<sup>2)</sup>の研究が著名である。一方、PC 床版に関してはほとんど行われておらず松井ら<sup>3)</sup>の研究が代表として挙げられる。

本研究においては二方向にプレストレスを導入した床版および一方向にプレストレス、他方向を RC とした床版を合計 21 体作成し、静的押抜きせん断試験を行った。その結果、松井らの研究結果における押抜きせん断強度算定式を修

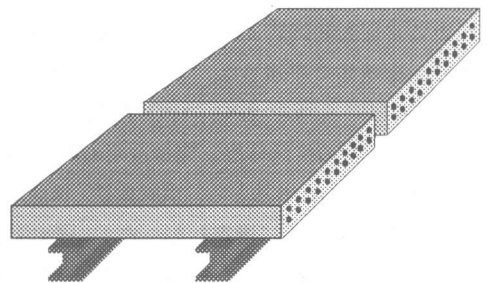


図-1 一方向 PC 床版を有する橋梁

表-1 PC 鋼材の機械的性質

記号	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SBPR 930/1080	930 以上	1080 以上
SWPR2	1710	1930

\*1 石川島播磨重工業(株) 橋梁事業部設計部, 修士 (工学) (正会員)

\*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科, Ph.D. (正会員)

\*3 山口大学助手 工学部社会建設工学科, 博士 (工学) (正会員)

\*4 (株)ピー・エス技術開発部部長 (正会員)

正し、より良い結果が得られる推定式を提案した。この推定式は本研究の実験、松井らおよび末弘<sup>4)</sup>らの実験値を用いて検討したところ、ばらつきの小さいことも明らかとなった。

## 2. 実験方法および供試体

### 2.1 使用材料

鉄筋は JIS G 3112-SD295A 種を使用し、PC 鋼材は表-1 に示すように、JIS G 3109B 種 1 号、呼び径 17mmSBPR 930/1080 と JIS G 3536 2 本より線、呼び径 2.9mm SWPR2 である。

### 2.2 供試体

押抜きせん断試験は材齢 28 日で、支持条件は四隅の浮き上がり防止は設けない四辺単純支持とし、10×10cm の硬質ゴム板を用い供試体中央に集中荷重を作用させた(図-2)。

二方向 PC 床版は、一方方向にプレテンション、他方向にポストテンション方式でプレストレスを導入した。一方方向 PC 床版は一方方向だけにポストテンション方式でプレストレスを導入し、他方向を鉄筋で補強した。これらの二方向および一方方向 PC 床版を 2PC、1PC と呼ぶことにする。それぞれの供試体は、実構造物の約 50% の縮尺率を想定した寸法とし、供試体長、床版厚、スパン長を 2 種類に選定した。また、それに応じて有効プレストレスも実構造物に近い約 4.4N/mm<sup>2</sup> となるように、導入プレストレス量を決定した。

以上の条件において 2PC を 11 体、1PC を 10 体の計 21 体作製した。供試体諸元を表-2、2PC の配筋図を図-3~4 に示す。1PC は 2PC の配筋から、PC より線を除いたものである。

### 3. 押抜きせん断耐力算定式

本研究では、静的強度の算定理論が明確で、しかも実験値との適合性の良い PC 床版に関する松井らの式<sup>3)</sup>を修正することによって、二方向

表-2 供試体諸元

供試体名	引張鉄筋径 (mm)	鉄筋比 (%)	スパン長 (cm)	載荷辺長 (cm)	有効プレストレス力 (N/mm <sup>2</sup> )		コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
					プレテン方向	ポストテン方向		
2PC-1 ~2PC-6	10	0.36	120	10	4.37	4.22	49.0	
2PC-7 ~2PC-8		0.38	110				4.46	4.45
2PC-9 ~2PC-11					53.7			
1PC-1 1PC-2		0.36	120		20	/	4.22	56.1
1PC-3 1PC-4								53.1
1PC-5 1PC-6		0.38	110		10		4.45	45.3
1PC-7 1PC-8 ~1PC10				40.3				
		43.9						
		40.6						
		61.2						
		40.3						

および一方方向 PC 床版にも適用可能な耐力算定式の考察を試みた。

### 3.1 PC 床版に関する松井らの式

松井らは自らが提案した RC 床版の押抜きせん断耐荷力の評価式<sup>2)</sup>を PC 床版へも適用できるように拡張を試みた<sup>3)</sup>。そして、自らが提案した RC 床版の破壊モデルに対して、プレストレスを導入することによって押抜きせん断耐荷力に与

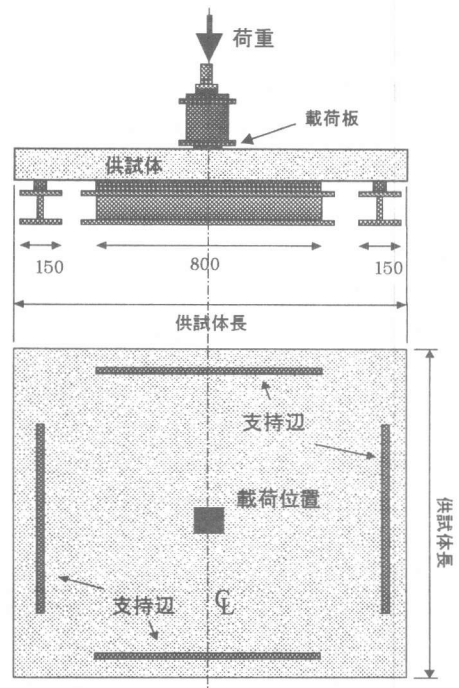


図-2 載荷方法 (mm)

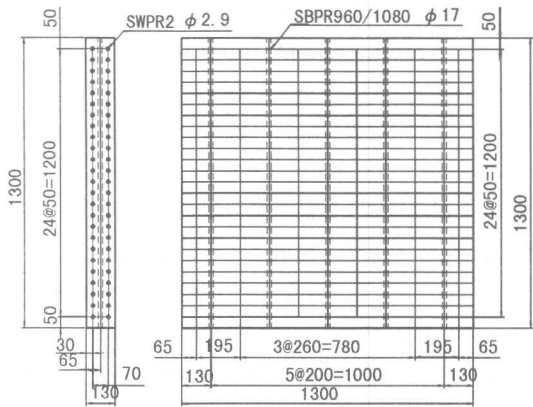


図-3 2PC 配筋図例 (2PC-1~6) (mm)

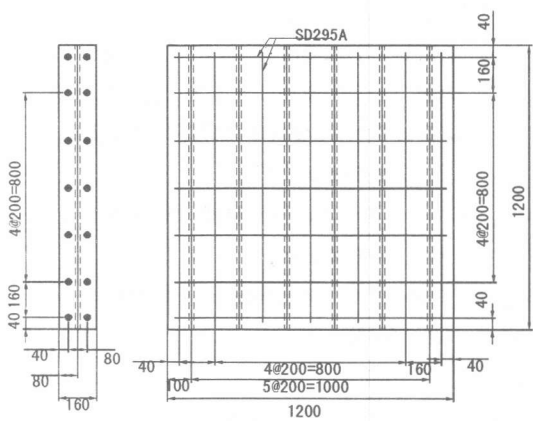


図-4 1PC 配筋図例 (1PC-7~12) (mm)

える影響を検討した結果、押抜きせん断破壊面の角度のみであるという判断に至った。そこで、その影響を取り込むことによってせん断破壊の角度を  $\theta$  とし、圧縮側コンクリート部で純せん断破壊、引張側鉄筋部でダウエル効果によるかぶりコンクリートのはく離破壊が生じるとし、算定式を提案している。松井らが算定式を提案するにあたって考慮した力学モデルを図-5 に示す。

### 3.2 PC 床版に関する松井らの式に対する修正

#### (1) 二方向 PC 床版に関する耐力算定式

PC 床版に関する耐力算定評価式の考察を行うに当たり、先述の松井らの式に(1)中立軸位置、(2)せん断破壊面の角度、(3)最大せん断応力および引張応力の分布範囲の3項目を考慮した。

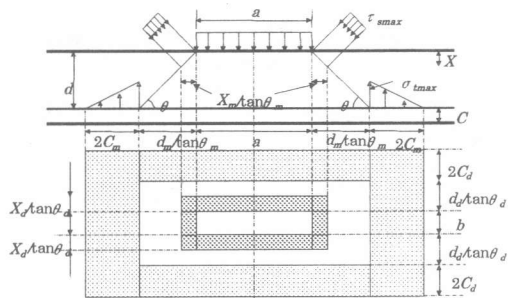


図-5 松井らによる押抜き面の力学モデル

#### a) 中立軸位置の修正

松井らは、PC 部材においても終局時にはひび割れが発生し、内部応力は RC 部材の場合と本質的に変わらないことから、中立軸は引張側コンクリートを無視したときの深さまで達しているものと仮定しても良いとしている。しかし、PC 部材はひび割れ発生、もしくは許容ひび割れ以内まではプレストレスの影響が大きく反映されてひび割れの発生が抑制され、コンクリートの有効断面が RC 部材に比べて大きくなる。そこで本研究では、引張部分に許容ひび割れを許すパーシャルプレストレスとしてコンクリート断面を計算した中立軸位置を採用した。計算方法については、後述することにする。

#### b) せん断破壊面の角度の修正

松井らによる実験結果では、有効プレストレスが増すにつれて押抜きせん断破壊面の破壊角度が  $45^\circ$  よりも小さくなるという結果を得ており、せん断破壊面の角度  $\theta$  をコンクリートのせん断ひび割れ発生耐力と導入プレストレスから求めている<sup>3)</sup>。この角度  $\theta$  はプレストレス力が小さくなるほど RC の破壊角度  $45^\circ$  に近づく。プレストレスを導入することによって押抜きせん断破壊面の角度が小さくなるので、荷重に対する抵抗範囲が広くなり、PC 床版の押抜きせん断耐力が向上することになると考えることが出来る。

本実験結果では図-6 の様な破壊断面を呈していた。このことは、供試体上側(圧縮側)では、曲げ圧縮応力、導入プレストレスによる圧縮応力

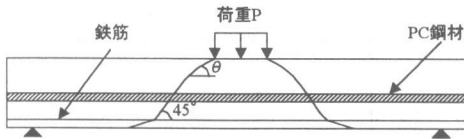


図-6 本実験結果による破壊断面

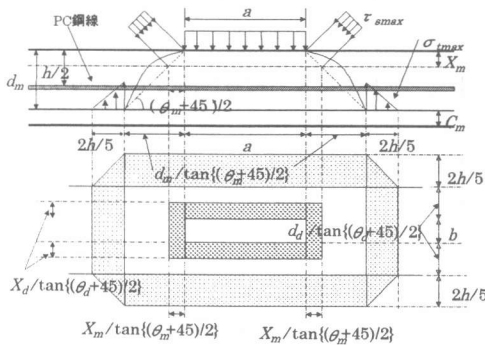


図-7 押抜き面の力学モデル

および荷重による鉛直応力が作用しているために破壊面の角度は複雑なものとなる。しかし、鉛直方向の応力が減少するとともに角度は  $\theta$  に近づく。

また、供試体中立軸付近では、RC の破壊角度  $45^\circ$  に近づくことになる。そこで本研究では、せん断破壊面の角度を  $\theta$  と  $45^\circ$  の中間の値を採用することとし、 $(\theta + 45^\circ)/2$  とした。

### c) 最大せん断応力および引張応力の分布範囲の修正

本実験結果における供試体の破壊断面から、引張鉄筋のダウエル効果が回廊状の四隅が矩形形状には発生していなかったため、四隅の上向きの引張応力分布を三角形にした。

また最大せん断応力分布においては、松井らは図-5 に示すように四隅を重複しているが、本研究ではその四隅の重複部分を削除した。また、かぶりの破壊始点は荷重板から  $(\theta + 45^\circ)/2$  の方向線と引張側鉄筋の中心線の交点とし、破壊面の観察結果から  $2h/5$  とした。

以上の 3 項目を考慮した力学モデルを図-7、耐力算定式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 P = & \tau_{smax} \{ 2aX_d / \tan \alpha \\
 & + 2(b + 2X_d / \tan \alpha) X_m / \tan \beta \} \\
 & + \sigma_{tmax} \{ 2h/5(a + 2d_m / \tan \beta) \\
 & + 2h/5(b + 2d_d / \tan \alpha + 2h/5) \} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに、

$a, b$  : 荷重板の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長  
 $X_m, X_d$  : コンクリート断面をパーシャルプレストレスとして計算した主鉄筋、配力鉄筋の中立軸位置

$d_m, d_d$  : 引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ

$h$  : 床版厚

$\tau_{smax}$  : コンクリートのせん断強度<sup>3)</sup> (N/mm<sup>2</sup>)

$$\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.00251 \sigma_{ck}^2$$

ただし、上式では  $\sigma_{ck} \geq 49$  (N/mm<sup>2</sup>) の範囲で  $\sigma_{ck}$  の増加に対して  $\tau_{smax}$  は減少に転じるため、便宜的に以下の式を採用。

$$\tau_{smax} = 0.784 \sigma_{ck}^{0.553}$$

$\sigma_{tmax}$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{tmax} = 0.269 \sigma_{ck}^{2/3}$$

$\sigma_{ck}$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  :  $(\theta_d + 45^\circ)/2$

$\beta$  :  $(\theta_m + 45^\circ)/2$

$\theta_m, \theta_d$  : 次式による主鉄筋方向、配力鉄筋方向の破壊面の角度

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{cr}}{\sigma_p} \right)$$

$$\tau_{cr} = \sqrt{\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{tmax} \sigma_p} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここに、

$\tau_{cr}$  : せん断ひび割れ発生耐力

$\sigma_p$  : 導入プレストレス (N/mm<sup>2</sup>)

ただし、PC 床版の場合は荷重の変化に伴って中立軸の位置が変化するため、中立軸位置の変化を考慮した。図-8 は、縦軸にコンクリート断面をパーシャルプレストレスとした場合の圧縮側コンクリート表面から中立軸までの距離  $X$  をとり、横軸に荷重 (耐力)  $P$  をとったものである。パーシャルプレストレスはりの断面諸量の考え方は、図-9 に示すように外力曲げモーメン

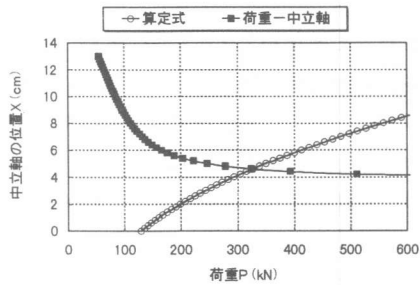


図-8 中立軸位置と荷重の関係 (2PC-1)

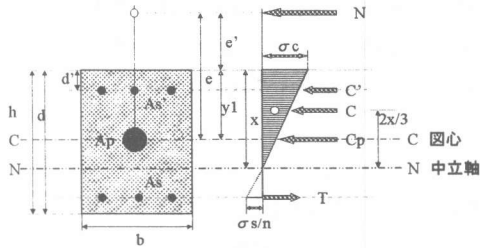


図-9 パーシャルプレストレスはりの断面諸量

ト  $M$  とプレストレス力  $P$  が作用する場合において、断面上縁から  $e'$  の距離に  $N=P$  の軸力を受ける RC 断面として取り扱うことが出来る<sup>5)</sup>。そこで、この断面の図心での曲げモーメント  $M(X)$  を求め、式(2)から、曲げモーメント  $M(X)$  が作用した場合の荷重荷重  $P$  を算出する。

$$P = M(X) / \beta \quad (2)$$

( $\beta$  : Timoshenko の平板理論<sup>6)</sup> より求まる  
「荷重板辺長/スパン長」に起因する係数)

プレストレス力と荷重荷重を合成して、中立軸位置  $X$  に達した時点での曲げモーメント  $M(X)$  を求め、式(2)により作用荷重  $P$  を算出したものが、図-8 における荷重-中立軸曲線である。この荷重と中立軸の関係を示す曲線と、各中立軸位置における算定式耐力を示す曲線の交点が静的強度になると考えることが出来る。

本研究における提案式による計算結果を表-3、度数分布を図-10 に示す。ただし、2PC 供試体においては本研究の実験結果に、末弘らの実験

表-3 計算結果 (二方向 PC 床版)

供試体名	破壊強度 (kN)	松井式強度 (kN)	修正式強度 (kN)	破壊強度 松井式	破壊強度 修正式
2PC-1	309.9	296.2	323.6	1.05	0.96
2PC-2	363.8	296.2	323.6	1.23	1.12
2PC-3	313.8	296.2	323.6	1.06	0.97
2PC-4	313.8	296.2	323.6	1.06	0.97
2PC-5	348.1	296.2	323.6	1.18	1.08
2PC-6	370.7	296.2	323.6	1.25	1.15
2PC-7	608.0	502.1	544.3	1.21	1.12
2PC-8	626.6	502.1	544.3	1.25	1.15
2PC-9	583.5	456.0	456.0	1.28	1.28
2PC-10	577.6	456.0	456.0	1.27	1.27
2PC-11	572.7	456.0	456.0	1.26	1.26
A2	578.6	482.5	517.8	1.20	1.12
A3	588.4	542.3	566.8	1.09	1.04
A4	637.4	656.1	636.5	0.97	1.00
A6	637.4	649.2	582.5	0.98	1.09
A7	622.7	722.8	615.9	0.86	1.01
A8	637.4	904.2	705.1	0.70	0.90
B2	369.7	315.8	361.9	1.17	1.02
B3	446.2	385.4	391.3	1.16	1.14
B4	444.2	457.0	436.4	0.97	1.02
平均値				1.11	1.08
変動係数				13.81%	9.79%

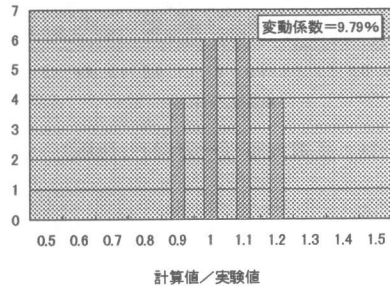


図-10 度数分布 (二方向 PC 床版)

結果<sup>4)</sup>も加え合計 20 体について検証した。その結果、計算値に対する実験値の割合の平均値が 1.08、変動係数は 9.79% となり適合性が良く精度も向上した。

## (2) 一方向 PC 床版に関する耐力算定式

1PC 供試体は、テンション導入方向には PC 部材、そしてテンションが導入されていない方向には RC 部材と同様な挙動を示すことが実験結果から判明出来た。そこで、先述の二方向 PC 床版に関する式において、主鉄筋方向のみにテンションを導入したと仮定して以下の点を考慮した。

(1)配力鉄筋方向の中立軸位置  $X_d$  は、引張側コン

表-4 計算結果（一方向 PC 床版）

供試体名	破壊強度 (kN)	松井式強度 (kN)	修正式強度 (kN)	破壊強度 松井式	破壊強度 修正式
IPC-1	240.3	269.7	265.8	0.89	0.90
IPC-2	243.2	262.8	256.9	0.93	0.95
IPC-3	240.3	249.1	241.2	0.96	1.00
IPC-4	372.7	340.3	339.3	1.10	1.10
IPC-5	353.0	366.8	316.8	0.96	1.11
IPC-6	373.6	359.9	304.0	1.04	1.23
IPC-7	359.9	416.8	367.7	0.86	0.98
IPC-8	356.0	482.5	440.3	0.74	0.81
IPC-9	392.3	482.5	440.3	0.81	0.89
IPC-10	375.6	482.5	440.3	0.78	0.85
PC15-1	87.3	82.4	68.6	1.06	1.27
PC15-2	84.3	90.2	70.6	0.93	1.19
PC15-3	106.9	119.6	97.1	0.89	1.10
PC30-1	116.7	129.4	102.0	0.90	1.14
平均値				0.92	1.04
変動係数				11.27%	14.42%

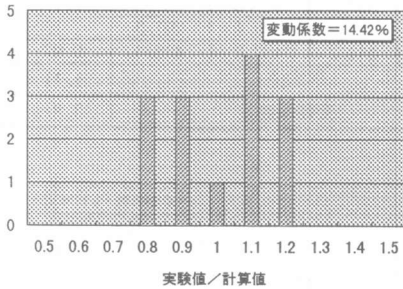


図-11 度数分布（一方向 PC 床版）

クリートを無視した RC 断面の中立軸位置とした。

(2)配力鉄筋方向のプレストレス力  $\sigma_p=0$  とした。

(3)配力鉄筋方向のせん断破壊面の角度  $\theta$  は RC と同様の  $45^\circ$  とした。

以上の点を考慮した式による計算結果を表-4、度数分布を図-11 に示す。ただし、IPC 供試体においては本研究の実験結果に、松井らの実験結果<sup>3)</sup>も加え合計 14 体について検証した。その結果、平均値が 1.04 と適合性は向上したが、変動係数が 14.42%となった。

#### 4. 結論

本研究では、PC 床版に関する松井らの式に対して、中立軸位置、せん断破壊角度、応力分布範囲の 3 項目について修正を行い、計算値に対する実験値の比により算定式の精度について検

討した。

その結果、二方向 PC 床版に関しては、平均値は 1.08、変動係数は 9.79%となり適合性も良く精度が向上した。しかしながら、一方向 PC 床版に関しては、平均値は 1.04 と適合性が向上したが、変動係数は 14.42%となり精度は低下した。

#### 謝辞

本研究においては、山口大学大学院修了者の原田賢哉、大岩昇 両氏の研究結果を含め、大学院生の原田良紀氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974.9
- 2) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, 第 348/V-1, pp.113-141, 1984.8
- 3) 東山浩士, 松井繁之: 橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究, 土木学会論文集, No.605/I-45, pp.79-90, 1998.10
- 4) 末弘 保, 石橋忠良, 佐藤春雄, 大庭光商: PC スラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 11-2, 1989.6
- 5) 岡田 清 他: プレストレストコンクリート構造学, 国民科学社, pp.95
- 6) S.P.Timoshenko and W.Krieger: Theory of Plate and Shells, 2nd ed., pp.79-103, 139, 1959