

論文

[2168] プレートコンクリート構造の十字型柱の実験的研究

正会員○清田清司（芝浦工業大学建築学科）  
 正会員 山本泰稔（芝浦工業大学建築学科）  
 正会員 古田智基（矢作建設技術開発部）  
 正会員 大矢俊樹（新日本製鐵建築事業部）

1. はじめに

プレートコンクリート構造(以下PLRC構造)は、鉄筋コンクリート構造の曲げとせん断補強筋の代りに、スパイラル筋で囲まれたプレートを用いた構造である。本構造の特徴は、耐震壁のない純ラーメン構造であり、プレートを用いることにより鉄筋工事を最小限に押え、柱形をなくした十字型柱にすることで梁幅と柱幅が同じになり、仮枠工事が簡略化できる。力学的にはプレートが引張筋とせん断補強筋の役割をはたすため、じん性能に富んだ構造となることが期待できる。

本研究はPLRC構造の柱の基本となる十字型柱の力学的な特性を把握するために、これまでに行ってきた一字型柱と同じタイプの片持ち梁形式の基礎的な実験的研究を行った。一字型柱<sup>1)</sup>と比較するため、コンクリート及び鋼材の断面寸法を一字型柱と同寸法、同材料とした。

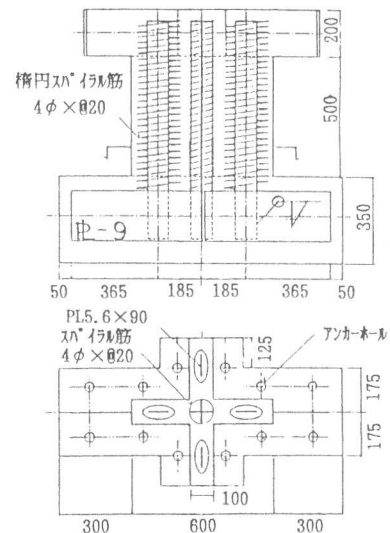


図1 試験体

2. 実験概要

1) 試験体及び使用材料

試験体図を図1に示す。試験体はPLRC構造の20階建築物を想定した、縮尺 1/3の片持ち

型モデルを2体作成した。2体とも形状は全く同一で、試験体名称をCW600-1、CW600-2とした。断面形状は、長方形の壁柱(100×600)を組合せた十字型である。試験体は片持ち形式とし、試験体の上に力を分散させるための梁形を設けた。この十字型コンクリート断面に、プレートを四辺端部に入れ、中央部分には十字型プレートを入れる。各プレートに4φのスパイラル筋を20mmピッチで巻いた。四辺端部のプレートには楕円形スパイラルを、中央十字型プレートには円形スパイラル

表1 材料の性質

試験体名	コンクリート		プレート PL-9 (t/cm <sup>2</sup> )	スパイラル 4φ (t/cm <sup>2</sup> )
	圧縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング率(kg/cm <sup>2</sup> )		
CW600-1	225.0	210×10 <sup>3</sup>	σ <sub>y</sub> = 3.33 σ <sub>max</sub> = 4.54 E = 2140	σ <sub>y</sub> = 2.19 σ <sub>max</sub> = 3.30
CW600-2	257.7	226×10 <sup>3</sup>		

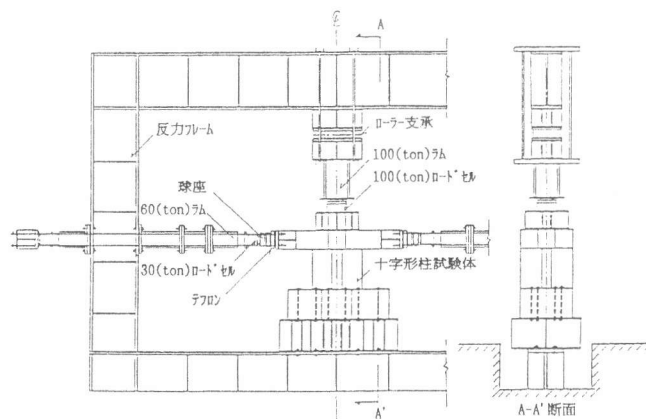


図2 加力装置

を巻いた。試験体に用いた使用材料の性質を表1に示す。

### 2) 加力方法及び測定方法

加力装置図を図2に示す。基礎梁が十字型のため反力フレームの上に十字形の鉄骨ビームを設置し、試験体の基礎をPC鋼棒でこのビームに固定する。鉛直荷重は、水平拘束をなくすためのローラー支承を設けた100(t)オイルジャッキを用いた。鉛直荷重を分散させるために、試験体上部の十字梁の上に十字形鉄骨ビームを設置した。水平力は力が対称に作用するように、試験体上部梁の両側に連動オイルジャッキを用い、各々1/2の押し引き分散加力とした。水平加力点は、拘束力を避けるためにピンローラーを設置した。図3に示す変位測定装置により、水平変位と垂直変位を求めた。水平変位は基礎梁に取り付けたゲージホルダーと変位計により、十字型柱上部の梁の中央と基礎梁との相対的な変位を求め、垂直変位は壁柱の両側外端位置の基礎梁上面と上部梁中央との間の伸び縮みを求めた。プレートの各位置の歪状況を測定するため、歪ゲージを図4に示す位置に貼り、プレートの応力、コンクリートとの付着状態を測定した。

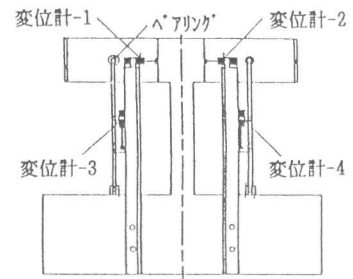


図3 変位測定装置

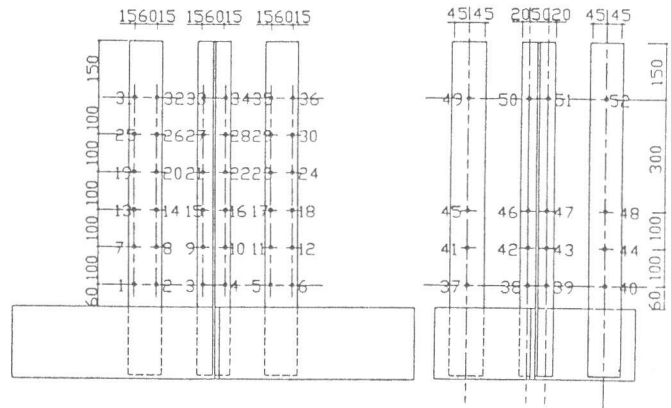


図4 プレートの歪ゲージ測定位置

プレートの各位置の歪状況を測定するため、歪ゲージを図4に示す位置に貼り、プレートの応力、コンクリートとの付着状態を測定した。

### 3) 加力方法

片持ち形の十字型柱に50kg/cm<sup>2</sup>の一定軸力を加えた状態で、正負繰返し水平加力を行う。載荷プログラムは、CW600-1については、微小弾性荷重で2回繰返した後、柱脚に曲げひび割れが発生したところで1回繰返し、以降部材角R=1/1000、1/500、1/250、1/120、1/80で正負繰返し、大変形に至るまで加力を行った。CW600-2については、微小弾性荷重で1回繰返した後、部材角 R=1/120の変形まで加力した。除荷後、軸力を65kg/cm<sup>2</sup> (30%増) に変化させた状態で同方向に変形がR=1/45となるまで水平荷重を加えた。

## 3 実験結果及び考察

### 1) 荷重と変形の関係

荷重と水平変形曲線を図5と図6に示す。履歴曲線上の記号Mは曲げ、Sはせん断のひび割れ発生時を示し、Pはプレートの縁の降伏開始時を、Cはコンクリートの圧壊開始時を示す。また、曲線上の数字はサイクル数を示す。CW600-1 は部材角 R=1/120で最大荷重

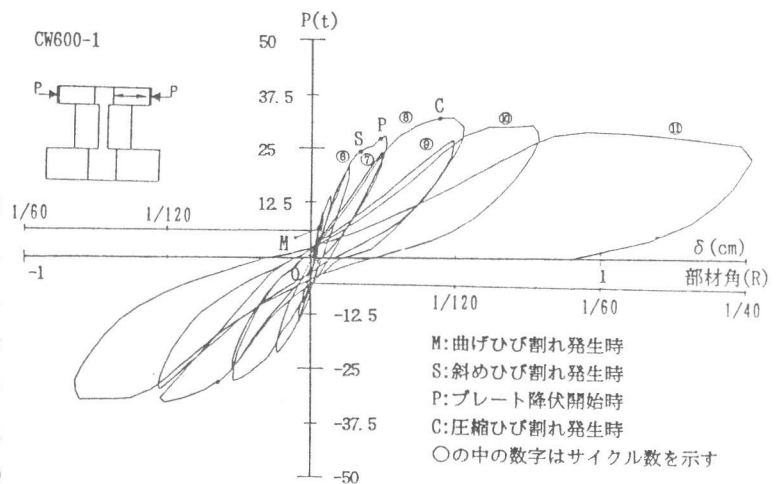


図5 荷重-変位曲線 (水平方向)

となり、R=1/80、1/60、1/40の変形時の耐力はそれぞれ最大荷重時の94.4、90.1、83.0(%)であった。全体として履歴曲線は、じん性のある原点指向性の強い形を示した。CW600-2 では、部材角

1/60に変形させたとき、最大荷重時(R=1/120)の92.6(%)の耐力となった。壁端側面の垂直方向の変位を図7に示す。垂直変位における梁の回転角は8サイクル(R=1/120)のとき $R_v=1/170$ 、10サイクル(R=1/80)のとき $R_v=1/107$ となった。

## 2) 破壊性状

図8に最終変形時のひび割れ図を示す。CW600-1は、2サイクルの $P=7(t)$ で柱脚部に曲げひび割れが、6サイクルの $P=24(t)$ で斜めひび割れが発生し、同サイクルの $P=27(t)$ でプレートの縁が引張り降伏した。斜めひび割れ発生後も耐力は低下することなく上昇し、8サイクルでコンクリートが圧壊を始め、最終的にはコンクリートの圧壊により耐力が低下する。CW600-2はCW600-1とほぼ同じ破壊性状を示し、軸力を30%増にして変形を進めたが、軸力を変えた影響は見られず、CW600-1と比べても耐力の低下はほとんどなかった。壁側面の縦方向のひび割れは、8サイクルのコンクリート圧壊と同時に柱脚部に発生し、変形の増大とともに上方に進展した。

## 3) プレートの歪分布

図4に示したプレートの歪測定位置図のうち、応力の大きい下2段のNO.1~12とウイング方向のNO.37,38,41,42について荷重-歪曲線を示した。素材の引張り試験より、 $1500\mu$ で降伏開始時となることが分かっているため、NO.1,6,7では8サイクル時に引張り降伏し、NO.6は10サイクルで圧縮側も降伏した。その他のゲージは10サイクル以降に降伏域に達しているところもあることが確認できる。外側のプレートのNO.2,8,NO.5,11は、8サイクルのプレートが引張りを受ける時の除荷時(NO.2,8は正荷重、NO.5,11は負荷重)の10(t)前後で歪が急速に約 $500\mu$ 変化する。これは、プレートが引張り曲げの力を受けると、その縁面はコンクリートにより圧縮摩擦を受けるが、除荷時には内縁面の摩擦力が低下するためプレートがすべり、そのために起きた現象であろう。荷重の高いところではプレート側面の摩擦力が大きくなり、付着力の増大に影響し、じん

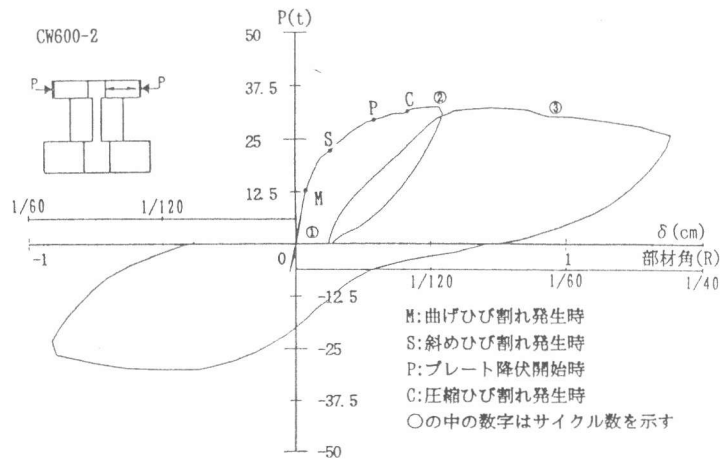


図6 荷重-変位曲線(水平方向)

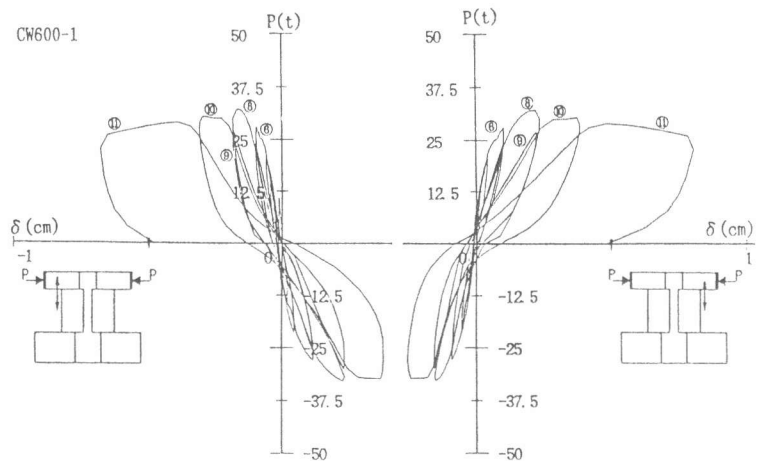


図7 荷重-変位曲線(垂直方向)

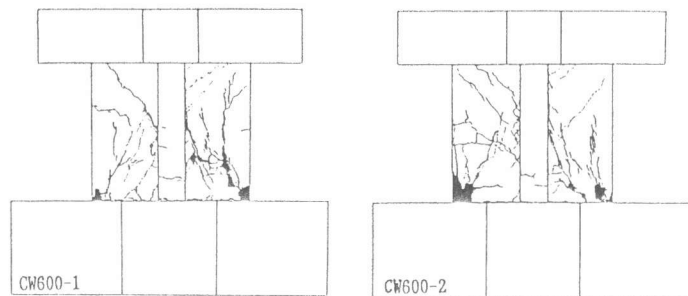


図8 最終ひび割れ

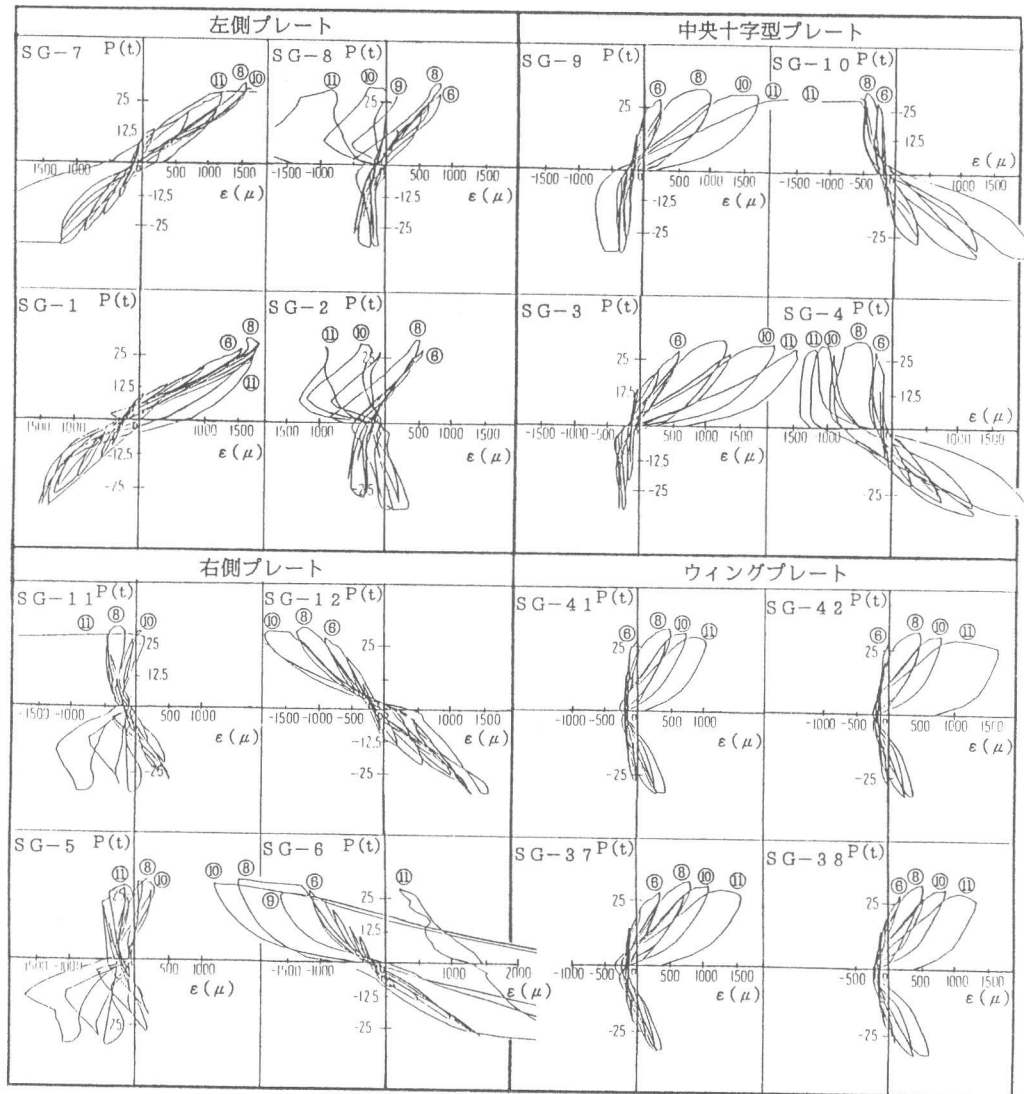


図9 プレートの荷重-歪曲線

性能を高めており、また、この現象は原点指向性に大きく影響するものと思われる。

4) プレートの付着

図10に引っ張り側プレートの付着力と荷重との関係を示した。付着力は10cm間隔に測定した歪度を応力に換算して、その応力差より求めたものである。CW600-1では付着力は加重とともに徐々に増大するが、CW600-2では曲げひび割れ発生の13ton前後で付着力が急激に増大し、斜ひび割れ発生時の22tonの時点で付着力に乱れが生じる。

5) 柱のせん断抵抗機構

各プレートの歪測定値から得られる応力により、図11に示すように力の釣合を仮定する

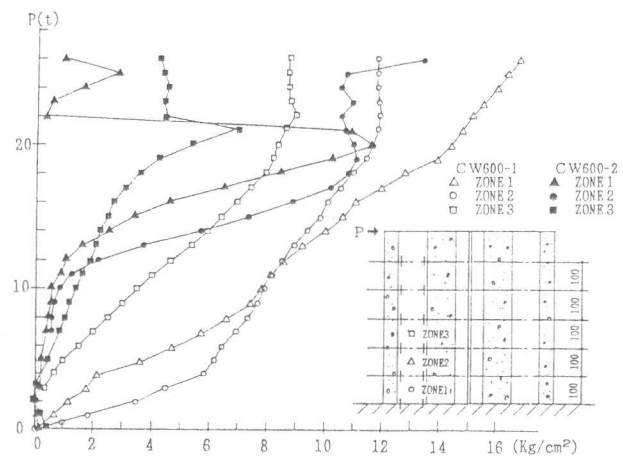


図10 プレートの付着力と荷重の関係

と、コンクリートの合力 $R_c$ は $N+N_1+N_2+N_3+R_c=0$ となり、合力位置 $X_o$ は $X_o=(P \cdot h - (N_1+N_3) \cdot a) / R_c$ より得られる。力の伝達をトラス作用で考えると $Q=R_c \cdot \cos \theta$ となる。よって、せん断抵抗力はこの値に各プレートのモーメント勾配から得られるせん断力 $Q_1, Q_2, Q_3$ を加算して $(R_c \cdot \cos \theta + Q_1+Q_2+Q_3)$ で得られる。図12に各荷重段階における、水平力 $P$ とせん断抵抗力 $Q$ との関係を示す。 $Q$ は水平力の約90%となり、トラス機構の $R_c \cdot \cos \theta$ が80%、プレートのせん断力 $Q_1, Q_2, Q_3$ が10%となり、ほとんどトラス作用に抵抗することが理解できる。点線はコンクリート合力 $R_c$ の位置 $X_o$ と水平力の関係を示した。

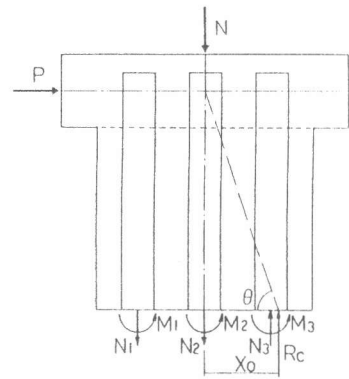


図1 1 コンクリートとプレートの応力

#### 4 十字柱の理論解析

##### 1) 曲げ弾性強度

弾性体の十字型柱の断面を図13-aのように中央部分の鋼材断面を1点に置き換え、平面保持が成立つものと仮定して、曲げモーメントの算定式を提案する。プレートとコンクリートの縁応力と中立軸( $x_n$ )と曲率( $\phi$ )の関係は、(1)~(6)式となる。

$$\sigma_c = \phi \cdot E_c \cdot x_n \quad \dots (1)$$

$$\sigma_{c1} = \phi \cdot E_c \cdot n(x_n - a) \quad \dots (2)$$

$$\sigma_{c2} = \phi \cdot E_c \cdot n(x_n - a - h) \quad \dots (3)$$

$$\sigma_s = \phi \cdot E_s \cdot n \cdot (x_n - D/2) \quad \dots (4)$$

$$\sigma_{t1} = \phi \cdot E_s \cdot n \cdot (x_n - D + a) \quad \dots (5)$$

$$\sigma_{t2} = \phi \cdot E_s \cdot n \cdot (x_n - D + a + h) \quad \dots (6)$$

解析手順は、まず引張りプレートの縁応力 $\sigma_{t1}$ を一定にして、中立軸( $x_n$ )を仮定すると、(5)式から曲率( $\phi$ )が求まる。次に、(1)~(6)式の $\phi$ にこの値を代入して、各応力度の値が得られ、圧縮側の合力(C)、引張側の合力(T)が求まる。軸力(N)と合力(C+N)とが等しくなる中立軸を試行錯誤法で求める。

曲げ応力(M)は得られた応力分布から、

$$M = -C_c \cdot (D/2 - x_n/3) - C_s \cdot (D/2 - h - a + e_1) + T_s \cdot (D/2 - h - a + e_2)$$

$$e_1 = \{h \cdot (3x_n - 3a - h)\} / \{3 \cdot (2x_n - 2a - h)\}$$

$$e_2 = \{h \cdot (3x_n - 3D + 3a + h)\} / \{3 \cdot (2x_n - 2D + 2a + h)\}$$

となる。

##### 2) 曲げ終局強度

図13-bのように応力を仮定し、応力ブロック

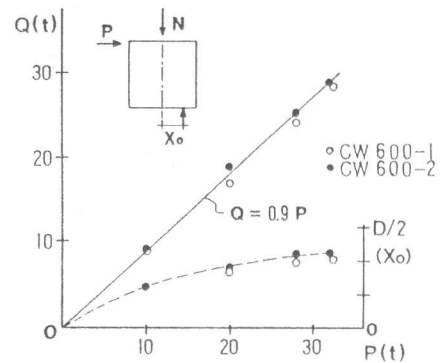
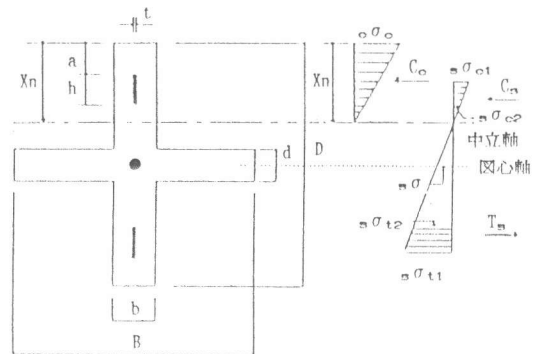
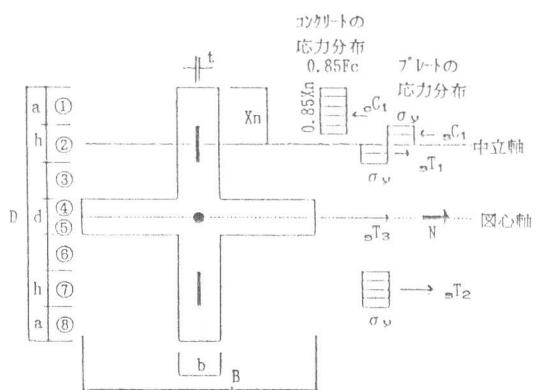


図1 2 荷重とせん断抵抗力の関係



a) 弾性時応力



b) 終局時応力

図1 3 コンクリートとプレートの応力分布

法により曲げ耐力を算定する。

(1) 中立軸が②の範囲にある場合  $cC_1+sC_1=sT_1+sT_2+sT_3+N$  より

$$x_n = \{ \sigma_y \cdot t \cdot (2a+2h) + \sigma_y \cdot sA_c + N \} / (0.722F_c \cdot b + 2\sigma_y \cdot t)$$

$$M_u = cC_1 \cdot (0.5D - 0.425x_n) + sC_1 \cdot 0.5 \cdot (D - a - x_n) - sT_1 \cdot 0.5 \cdot (D - a - h - x_n) + sT_2 \cdot (D/2 - a - h/2)$$

(2) 中立軸が③の範囲にある場合

$$x_n = (\sigma_y \cdot sA_c + N) / (0.722F_c \cdot b)$$

$$M_u = cC_1 \cdot (0.5D - 0.425x_n) + sC_1 \cdot (D/2 - a - h/2) + sT_2 \cdot (D/2 - a - h/2)$$

### 3. 斜めひび割れ強度

斜めひび割れ発生時のせん断応力度  $\tau_x$  は、弾性理論式  $\tau_x = Q_s \cdot S / B \cdot J$  から与えられ、軸力による垂直応力は  $\sigma_o = N / Ae$  となる。プレートは等価なコンクリート断面に置換する。図14に示す応力円より、引張り主応力をコンクリートの引張り強度 ( $1.8\sqrt{F_c}$ ) と仮定する

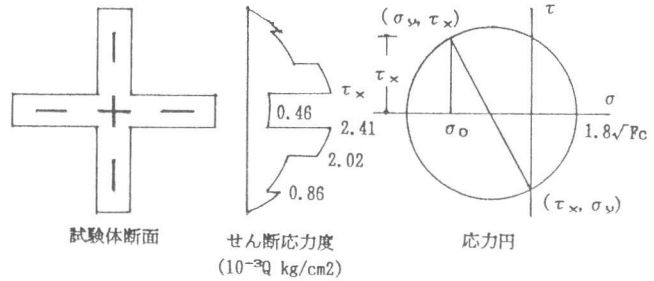


図14 せん断応力と応力円

と、ひび割れ発生時せん断応力度  $\tau_x^2 = (1.8\sqrt{F_c} + \sigma_o/2)^2 - (\sigma_o/2)^2$  となる。よって、 $\tau_x$  と  $Q_s$  の関係からひび割れ強度が得られる。なお、最大せん断応力に関しては本試験体が曲げ破壊しているため、せん断破壊実験時に検討する。表2に実験結果と理論値との比較を示す。

表2 実験結果と解析結果

試験体名		曲げひび割れ(t)	斜めひび割れ(t)	プレート降伏(t)	コンクリート圧壊(t)	最大耐力(t)
CW600-1	実験値	7.0 (1/2500)	24.0 (1/360)	27.0 (1/260)	31.0 (1/140)	33.0 (1/120)
	理論値	8.05 [0.87]	17.8 [1.36]	27.0 [1.00]	—	27.44 [1.20]
CW600-2	実験値	13.0 (1/1360)	22.0 (1/610)	29.0 (1/230)	31.0 (1/170)	32.6 (1/120)
	理論値	8.28 [1.57]	18.5 [1.19]	27.0 [1.07]	—	27.57 [1.18]

※ ( )内の数値は部材角を表わす。 [ ]内の数値は (実験値)/(理論値)を表わす。

### 5 まとめ

PLRC構造の十字型柱の斜めひび割れは、図8のひび割れ図に示すように、致命的なひび割れには進展せず、最終時にはコンクリートの曲げ圧壊により耐力が低下した。履歴ループの特性は原点指向性が強く、大変形時においても耐力がほとんど低下しない。表2に示した実験値と解析値の比較において、(実験値/理論値)は斜めひび割れ発生時では1.19~1.36、プレート降伏時では1.0~1.07、最大耐力時では1.18~1.20となり、提案式が採用できると判断した。以上のことからじん性能が高く、耐震性に優れていると思われ、実用の可能性が高いといえよう。

謝辞 本研究に対して、東大名誉教授梅村魁先生、D0設計顧問鈴木悦郎先生、大成建設伊藤勝先生の御指導を得た。新日本製鐵株式会社、矢作建設工業株式会社の協力を得た。実験に当って、芝浦工大卒論生菅井威、鈴木太一郎、田島洋明、濱上敏明、濱野輝久君の協力を得た。

参考文献 1) 鈴木悦郎、清田清司、他 「プレートコンクリート構造の提案その1,2」

1989年日本建築学会大会学術講演梗概集