

## ボックスフレームの破壊機構

—部分的にプレストレスを与えた場合—

神 山 一\*

## 要 旨

この報告は、部分的にプレストレスを与えたコンクリートボックスフレームの破壊機構の解明と破壊強度の計算および設計荷重作用時のひびわれ、応力度および変形などの諸性状を調べたものである。ここで導いた破壊強度計算式を試験結果と比較した結果、適切であることが判明したので、ボックスフレームの終極状態設計に適用できる。

## 1. ま え が き

不静定構造物の終極状態設計法は許容荷重と破壊荷重との関係を明確にし、許容荷重が作用したときの性状を検査する方法である。許容荷重が作用したときの応力度、変形あるいはひびわれなどは従来の許容応力度設計法で検査できる。破壊機構あるいは破壊強度を知るためには構造物の終極状態を考へて解析しなければならない。終極状態解析の方法が確立できれば、破壊時の部材断面力を考慮した終極状態設計が容易にできる。この報告は低次不静定構造物の破壊機構に関する研究の一つで、ボックスフレームをとり、基礎的な検討を試みたものである。

不静定構造物を構成する部材のひびわれが発達してプラスチック ヒンジを生ずると、構成部材の断面力の再分布が起る。断面力の再分布を生じた状態で次のプラスチック ヒンジが形成され、再び断面力の再分布が起る。このように内部的な構造形式の変化を経過して（不静定次数+1）個のプラスチック ヒンジを形成して構造物は崩壊する。

プラスチックヒンジの形成による部材断面力の再分布の状態は弾性理論によって求めることはできない。しかし不静定構造物の破壊機構が不明確な場合は、一般に弾性理論による部材断面力の分布を修正する方法が用いられる。この方法はきわめて便宜的な方法であって、部材の破壊強度解析に近いもので、不静定構造物の終極状態解析には適当な方法ではない。厳密な終極状態解析を行

\* 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

うためには、プラスチック ヒンジの形成位置の推定、その形成順序、最終状態におけるプラスチック ヒンジの抵抗曲げモーメントと回転能力におよぼす軸方向力、せん断力などの影響などを考慮しなければならない<sup>1)~5)</sup>。

## 2. 研究の目的

ボックスフレームの崩壊に至る機構を調べ、終極状態を考慮して破壊荷重の計算式を誘導し、試験結果と比較し、計算式の妥当性を検討することと、設計荷重作用時の性状を調べることが主要な目的である。破壊荷重の計算式はプレストレス コンクリート構造にも適用できる。すなわち、最後のプラスチック ヒンジが形成されるまで、最初に形成されたプラスチック ヒンジが崩壊することなく回転できるような鉄筋比、PC鋼材比であれば、破壊荷重の計算式は一般性がある。

破壊荷重を計算するとき、プラスチック ヒンジの形成位置をできる限り正確に推定しなければならない。その位置は、部材の断面力と強度との相対的關係から決まる。大略の位置は、各部材の断面力の分布図と強度分布図とを比較することにより推定できる。できうれば模型実験などによって形成位置を推定することが望ましい。この場合、ひびわれ分布図などが参考になる。

ここで扱うボックス フレームは、上下スラブにのみプレストレスを導入し、柱材は鉄筋コンクリートで、プレストレスによる2次応力をもつものである。このフレームはカルバートとして使用することを想定したので、荷重変化が少ないために、柱材の2次応力を有効に利用できる点に注目し、上下スラブのみにプレストレスを導入した場合の強度と変形とを調べた。破壊機構を解明するためには、変形能力の問題が特に重要なので、種々の角度から変形問題を検討した。

## 3. 破壊荷重（または降伏荷重）計算式の誘導

ボックス フレームは4個（不静定次数+1個）のプラスチック ヒンジを形成したときに不安定状態、すなわち破壊に到達する。しかし、対称荷重の場合は、対称な

箇所に同時にプラスチック ヒンジを形成するので、見かけ上のプラスチック ヒンジの数は増すけれども、本質的には不安定状態に至るプラスチック ヒンジの数は変わらない。

プラスチック ヒンジの形成位置(断面)は外力による曲げモーメントと抵抗曲げモーメントとの相対的關係から決まる。抵抗曲げモーメントにはせん断力、軸方向圧縮力および軸方向引張力などの断面力が影響を与える。これらの断面力はプラスチック ヒンジの形成順序、形成段階によって変化するので、最初のプラスチック ヒンジの形成位置の推定には、せん断力や軸方向力の影響を無視した抵抗曲げモーメントを用いる。

ここでは荷重条件とプラスチック ヒンジの形成位置との組合せとして二、三の例を考え、この場合の破壊強度計算式を誘導した。図-1 はその例である。

Case I (図-1 (1) 参照) :

1)  $P_H = \alpha P_v$  ( $\alpha = \text{一定値}$ ) の場合

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_1 + (L/2 - a_2 - \alpha a_4) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}} \dots\dots (1)$$

断面力 :

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = \frac{1}{\Delta H} (a_1 P_{vu} - M_1 - M_2)$	$S_1 = P_{vu}$
下スラブ	$N_3 = P_H - N_1 = \alpha P_{vu} - N_1$	$S_3 = P_{vu}$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S_2 = P_H - N_1, N_1$

..... (2)

2)  $P_H = \text{一定値}$  の場合

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3 + P_H \cdot a_4) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_1 + (L/2 - a_2) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}} \dots\dots (3)$$

断面力 :

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = \frac{1}{\Delta H} (P_{vu} \cdot a_1 - M_1 - M_2)$	$S_1 = P_{vu}$
下スラブ	$N_3 = P_H - N_1$	$S_3 = P_{vu}$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S = N_1, N_3$

..... (4)

特別な場合として  $\Delta H = a_3$ , すなわち、水平力  $P_H$  の作用点にプラスチック ヒンジを生ずる場合は次のようになる。

$P_H = \alpha P_v$  の場合 :

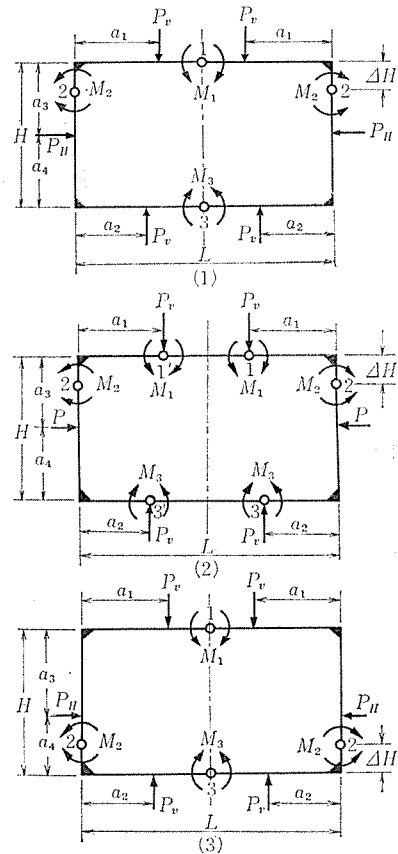


図-1 プラスチックヒンジの形成位置

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3) \frac{a_3}{H - a_3}}{a_1 + (L/2 - a_2 - \alpha a_4) \frac{a_3}{H - a_3}} \dots\dots (5)$$

$P_H = \text{一定値}$  の場合 :

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3 + P_H \cdot a_4) \frac{a_3}{H - a_3}}{a_1 + (L/2 - a_2) \frac{a_3}{H - a_3}} \dots\dots (6)$$

Case II (図-1 (2) 参照) : 対称荷重であるために、プラスチック ヒンジ 1 と 1', 3 と 3' が同時に形成されると仮定する。

1)  $P_H = \alpha P_v$  の場合

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_1 + (a_2 - \alpha a_4) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}} \dots\dots (7)$$

断面力 :

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = \frac{1}{\Delta H} (P_{vu} \cdot a_1 - M_1 - M_2)$	$S_1 = P_{vu}$
下スラブ	$N_3 = P_H - N_1 = \alpha P_{vu} - N_1$	$S_3 = P_{vu}$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S_2 = N_1, N_3$

..... (8)

2)  $P_H = \text{一定値の場合}$   

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3 + P_H \cdot a_4)}{a_1 + \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \cdot a_2} \dots\dots (9)$$

断面力:

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = \frac{1}{\Delta H} (P_{vu} \cdot a_1 - M_1 - M_2)$	$S_1 = P_{vu}$
下スラブ	$N_3 = P_H - N_1$	$S_3 = N_1$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S_2 = P_{vu}$

.....(10)

$\Delta H = a_3$  のときの  $P_{vu}$  は次のようになる。

$P_H = \alpha P_{vu}$  の場合:

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3) \frac{a_3}{H - a_3}}{a_1 + (a_2 - \alpha a_4) \frac{a_3}{H - a_3}} \dots\dots (11)$$

$P_H = \text{一定値の場合}$ :

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3 + P_H \cdot a_4)}{a_1 + \frac{a_3}{H - a_3} \cdot a_2} \dots\dots (12)$$

Case III (図-1 (3) 参照):

1)  $P_H = \alpha P_v$  の場合

$$P_{vu} = \frac{M_2 + M_3 + (M_1 + M_2) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_2 + \{a_1 - \alpha(H - a_4)\} \frac{\Delta H}{H - \Delta H}} \dots\dots (13)$$

断面力:

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = P_H - N_3$	$S_1 = P_{vu}$
下スラブ	$N_3 = \frac{1}{\Delta H} (P_{vu} \cdot a_2 - M_2 - M_3)$	$S_3 = P_{vu}$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S_2 = N_1, N_3$

.....(14)

2)  $P_H = \text{一定値の場合}$

$$P_{vu} = \frac{M_2 + M_3 + \{M_1 + M_2 + P_H(H - a_4)\} \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_2 + \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \cdot a_1} \dots\dots (15)$$

断面力:

部 材	軸方向力, $N$	せん断力, $S$
上スラブ	$N_1 = P_H - N_3$	$S = P_{vu}$

下スラブ	$N_3 = \frac{1}{\Delta H} (P_{vu} \cdot a_2 - M_2 - M_3)$	$S_3 = P_{vu}$
側 壁	$N_2 = P_{vu}$	$S_2 = N_1, N_3$

.....(16)

$\Delta H = a_4$  のときの破壊荷重は次のようになる。

$P_H = \alpha P_v$  の場合:

$$P_{vu} = \frac{M_2 + M_3 + (M_1 + M_2) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_2 + \{a_1 - \alpha(H - a_4)\} \frac{a_4}{H - a_4}} \dots\dots (17)$$

$P_H = \text{一定値の場合}$ :

$$P_{vu} = \frac{M_2 + M_3 + \{M_1 + M_2 + P_H \cdot (H - a_4)\} \frac{a_4}{H - a_4}}{a_2 + a_1 \cdot \frac{a_4}{H - a_4}} \dots\dots (18)$$

#### 4. 使用材料の性質および試験体

セメントは普通ポルトランドセメント (秩父社) を用いた。骨材は粗骨材が渡良瀬川中流産, 細骨材が利根川中流産のもので, その物理的性質は表-1 のとおりである。

鉄筋は SD 30 (東洋社), PC 鋼棒は IV 種  $\phi 16$  (高周波熱錬社) のもので, その機械的性質は, それぞれ表-2, 3 のとおりである。

表-1 骨材の性質

種 別	最大寸法 (mm)	粗 粒 率 F.M.	比 重	吸 水 率 (%)
粗 骨 材	25	7.14	2.63	1.8
細 骨 材	5	3.14	2.66	2.1

表-2 鉄筋の性質

種 別・公称寸法	実径 (mm)	降 伏 点 応 力 度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引 張 強 度 (mm)	伸 び (%)	し ぼ り (断 面 縮 小 率) (%)
SD 30, D 13 $\phi$	12.7	36.4	55.6	25.0	65.5

表-3 PC 鋼棒の性質

種別・公称寸法	降伏点応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%) (GL 8 D)
16 $\phi$ (NPR 4)	128.4	137.6	7.7

表-4 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	減 水 剤
25	8	3.0	35	50	154	440	896	896	4.4

表-5 コンクリートの強度

材 令 (日)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kg/cm <sup>2</sup> )
14	480	32.0	45.0	3.40 · 10 <sup>5</sup>

コンクリートの示方配合および試験時の諸強度はそれぞれ表-4, 5 のとおりである。

試験体, 標準供試体ともに最高温度約 60°C の蒸気養生を行った。コンクリートの練上がり温度は 20°C, 60°C に保持した時間は 3 時間, 蒸気養生完了までの時間は 12 時間である。

ボックス フレーム試験体の寸法および主要鉄筋を図-2 に示した。支間 332.0 cm, 高さ 224.5 cm, 幅 115.0 cm で, 上下スラブにプレストレスを導入した。主要鉄筋その他は図-2 を参照されたい。

### 5. プレストレス導入による 2 次応力

上, 下スラブにプレストレスを導入したときに生ずる 2 次応力を次の方法で計算し, 有効プレストレスおよび側壁の 2 次応力を求める。上, 下スラブにプレストレスを導入したときの 2 次応力を別々に求め, それを重合して 2 次応力の合計値を得る。

スラブ A, B のプレストレス モーメントによって部材端 A と B に生ずる自由回転角  $\theta_A, \theta_B$  は, PC 鋼材の配置が左右対称であれば

$$\begin{aligned} \theta_A = -\theta_B = \theta_0 &= \int_0^{L/2} \frac{M_x}{E_c I_c} \cdot dx = \int_0^{L/2} \frac{P_e \cdot e_p}{E_c I_c} \cdot dx \\ &= \frac{P_e}{E_c I_c} \int_0^{L/2} e_p \cdot dx \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

また, 部材端の短縮量は

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} \frac{P_e \cdot L}{E_c A_c} \dots\dots\dots(20)$$

スラブ端の回転を拘束したときの拘束モーメントは

$$M_{r1} = -2 \frac{E_c I_c}{L} \theta_0 \dots\dots\dots(21)$$

側壁下部または上部の回転を拘束して, 側壁の上部または下部に変位  $\Delta\delta$  を与えたときの拘束モーメントは

$$M_{r2} = -6 \frac{E_c I_c}{H^2} \cdot \Delta\delta \dots\dots\dots(22)$$

これらの  $\theta_0, \Delta\delta, M_{r1}$  および  $M_{r2}$  を用いて, 上下スラブの有効プレストレスモーメントと側壁の 2 次モーメントを計算する。試験したボックス フレームの場合の計算結果を表-7 に示した。計算に必要な PC 鋼材の配置は図-3 のとおりである。図-4 はプレストレス導入後の上下スラブの有効プレストレスモーメントおよび側壁に生じた 2 次モーメントを示したものである。

### 6. 試験方法および試験結果

ボックス フレームをカルバートなどのような地中構造物として用いる場合は図-5 (a) のような土圧による分布荷重が作用するものとして設計する。鉛直土圧, 水平土圧の推定方法については, 多くの提案があるが,

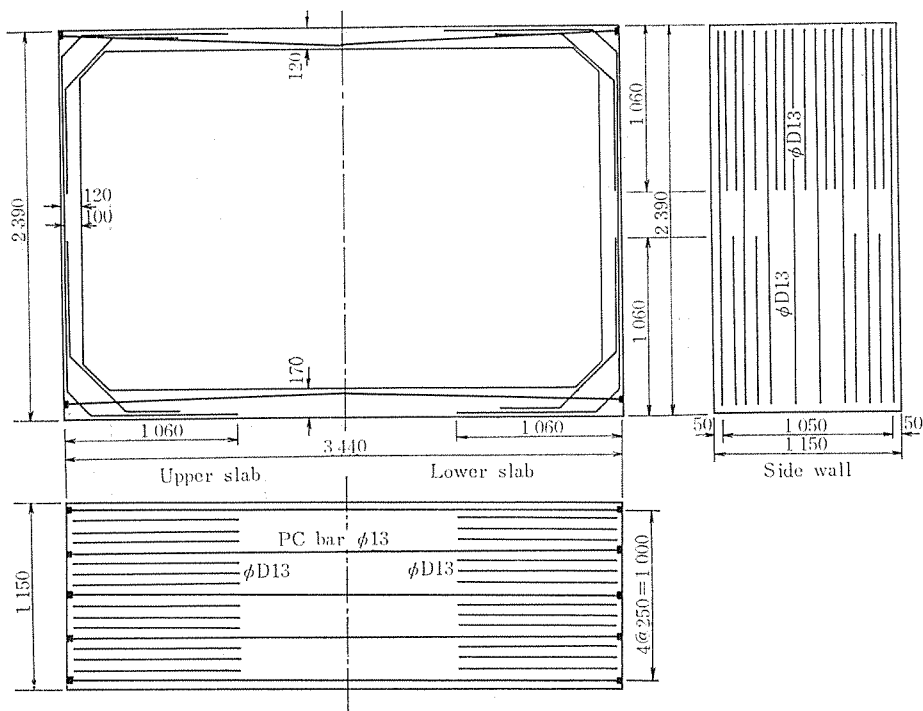


図-2 主要鉄筋の配置図

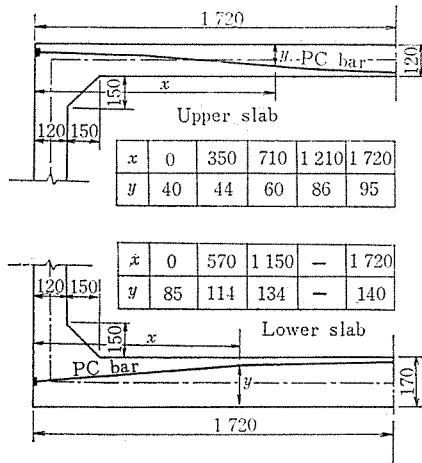


図-3 上・下スラブのPC鋼材の配置

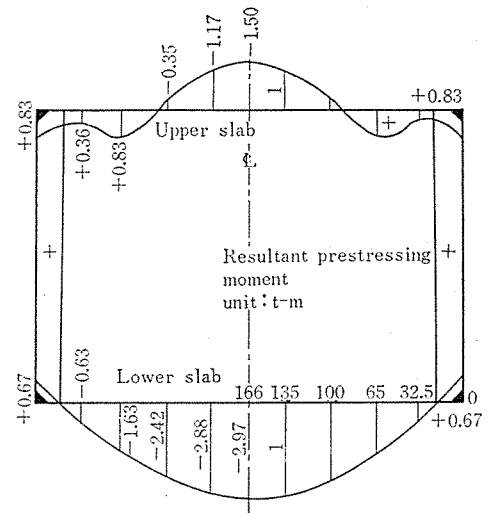


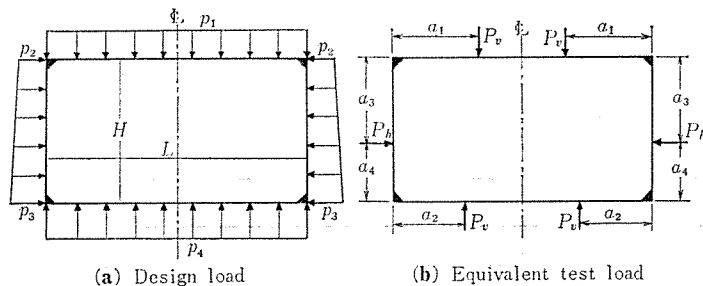
図-4 合成モーメントおよび2次モーメント

表-6 試験ボックスフレームの断面諸係数

断面諸係数	部 材	上 ス ラ ブ	側 壁	下 ス ラ ブ
軸線の長さおよび高さ	(cm)	$L=332.0$	$H=225.0$	$L=332.0$
断面の全厚	$h$ (cm)	12.0	12.0	12.0
断面幅	$b$ (cm)	115.0	115.0	115.0
断面積	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	1380	1380	1955
断面係数	$z_c$ (cm <sup>3</sup> )	2760	2760	5540
断面2次モーメント	$I_c$ (cm <sup>4</sup> )	16560	16560	47083
PC鋼材断面積	$A_p$ (cm <sup>2</sup> )	5-φ16=8.692	—	5-φ16=8.692
鉄筋断面積	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	—	$A_s=12\text{-}\phi\text{D}13=15.24$ $A_s'=8\text{-}\phi\text{6}=2.26$	—
部材中央断面	部材端断面	—	$A_s=19\text{-}\phi\text{D}13=24.13$ $A_s'=8\text{-}\phi\text{D}13=10.16$	—
		—	—	—
PC鋼材緊張力	$P_t$ (t)	66.50	—	66.50

表-7 有効プレストレスモーメントおよび2次モーメント

部 材		部材端からの距離 $x$ (cm)	0	32.5	65.0	100.0	135.0	166.0 (中央点)
上スラブ	偏心距離 $e_x$ (cm)		-2.50	-1.79	0	+1.77	+3.00	+3.50
	自由モーメント $P_e \cdot e_p$ (t-m)		+1.66	+1.19	0	-1.18	-2.00	-2.33
	2次モーメント (t-m)		-0.83	-0.83	+0.83	+0.83	+0.83	+0.83
	有効モーメント (t-m)		+0.83	+0.36	+0.83	-0.35	-1.17	-1.50
下スラブ	偏心距離 $e_x$ (cm)		0	-1.95	-3.47	-4.64	-5.33	-5.50
	自由モーメント $P_e \cdot e_p$ (t-m)		0	-1.30	-2.30	-3.09	-3.55	-3.67
	2次モーメント (t-m)		+0.67	+0.67	+0.67	+0.67	+0.67	+0.67
	有効モーメント (t-m)		+0.67	-0.63	-1.63	-2.42	-2.88	-2.97
側 壁	2次モーメント (t-m)		側壁にはプレストレスを導入しないので、2次モーメントのみである。					
	上 端		+0.83					
	下 端		+0.67					



(a) Design load (b) Equivalent test load

図-5 試験荷重

一般に単純化した土圧分布が用いられる。さらに重要なことは施工時の一時的荷重であるが、設計に考慮されることは少ない。

載荷試験で上記のような分布荷重を作用させることは容易でないで、各部材の曲げモーメントの大きさが等値になるような等価集中荷重を作用させた。図-5 (b) の鉛直荷重  $P_v$  と水平荷重  $P_H$  およびその作用点を、図-5 (a) の場合の各部材の曲げモーメントの最大値と等値になるように決めた。しかし、曲げモーメントの分布、せん断力および軸方向力と、その大きさには差異がある。このような等価試験荷重を採用する場合は、試験体の寸法および構成部材の強度比についても検討しておく必要がある。構成部材の曲げ降伏が起りにくく、せん断ひびわれなどが発達しやすい場合などは、曲げモーメントを対象とした等価試験荷重は不適當で、せん断力や軸方向力に注目して、等価試験荷重を決めるべきである。

本試験に用いた試験体はフレームの寸法に比較して部材厚が薄いため、曲げモーメントを対象とした等価試験荷重が適當と考えられる。鉛直荷重  $P_v$  と水平荷重  $P_H$  との比  $\alpha = P_H/P_v$  を一定にする方法と、いずれかの荷重を一定にする方法とが考えられるが、ここでは  $\alpha = 0.40$  (一定値) とする方法を採用した。この載荷方法で、ひびわれ発生荷重、ひびわれ発生後の変形回復、ひびわれの発達状況、プラスチック ヒンジの形成、破壊荷重などを調べた。

荷重は図-6 に示した載荷用鋼製フレームに反力をとらせジャッキで載荷した。設計荷重を数回繰り返して作

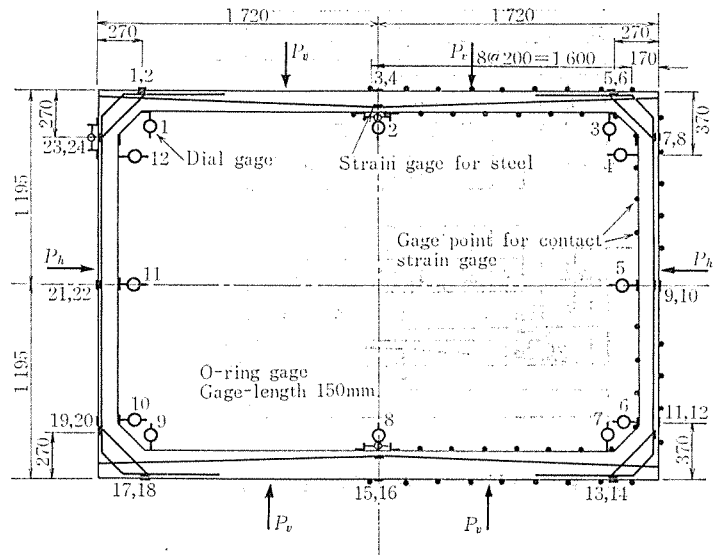


図-7 ひずみ、変形測定計器の配置

用した後に、破壊に至るまで漸増載荷した。部材のたわみはダイヤルゲージ、鉄筋のひずみは鉄筋ゲージ、コンクリートのひずみはワイヤーストレインゲージおよびコンタクトゲージ、プラスチック ヒンジ 成形部分の変形 (ひびわれを含む) はO型リングひずみ計、等を用いて測定した。各測定器の配置の大略を図-7 に示した。コンタクトゲージとO型リングひずみ計は、ひびわれを含む見かけのひずみを測定するために使用した。

荷重を漸増載荷したときの、ひびわれの発達状況を 図-8 および 図-9 に示した。発生したひびわれの大部分は曲げ引張ひびわれで、斜引張ひびわれはほとんど見られなかった。上下スラブのひびわれは鉛直荷重載荷点間に分散して、ほぼ一様に発生した。破壊に近い荷重でもこの傾向は変わらないが、わずかながら載荷点近傍のひび

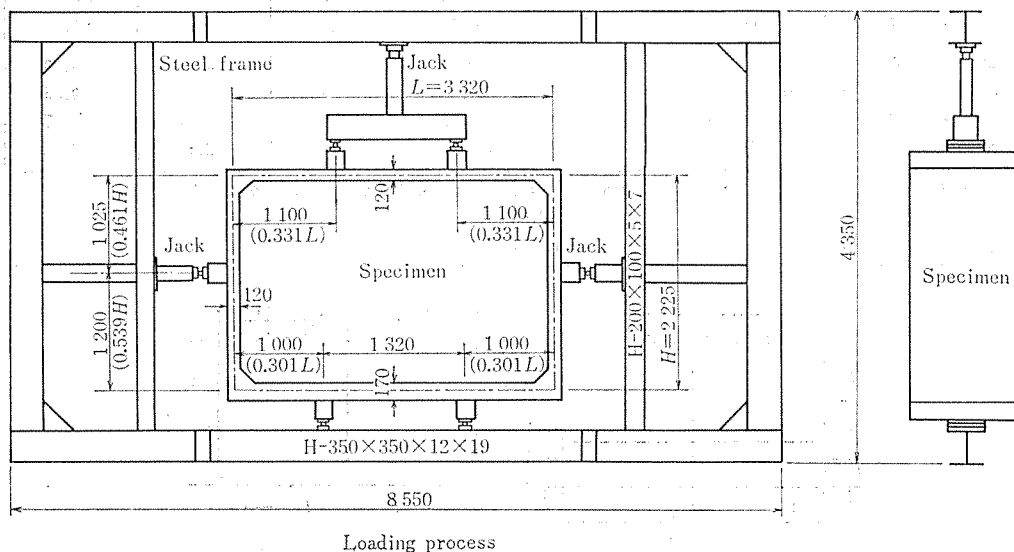


図-6 載荷装置

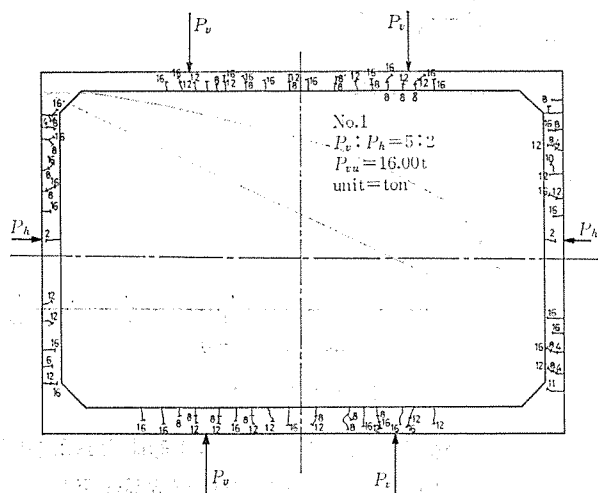


図-8 ひびわれ図

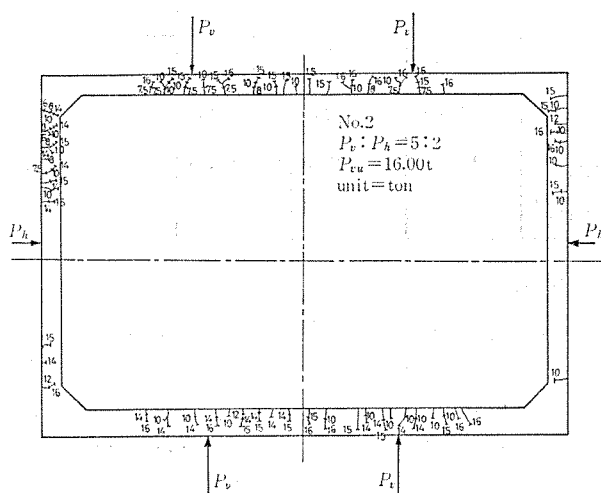


図-9 ひびわれ図

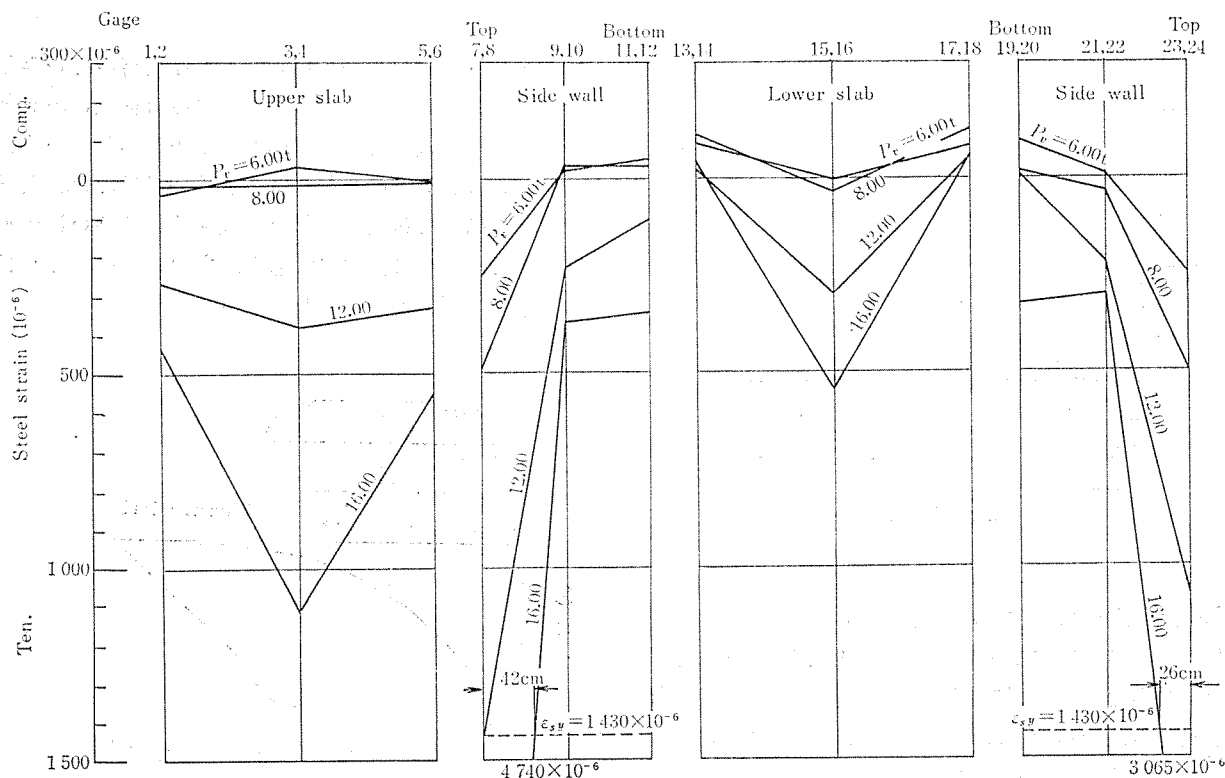


図-10 鋼材のひずみ

われ幅が大きくなっている。側壁のひびわれはほとんどが負の曲げモーメントによるひびわれで、上下のハンチの近傍に集中して発達している。この傾向は側壁の上部で特に顕著である。

鋼材のひずみには以下の傾向が見られる。上下スラブの中央断面 および 両端断面（ハンチ端部），側壁の中央断面および上下端断面（ハンチ端部）のひずみの測定値の例を 図-10 に示した。当然のことではあるが，鉄筋および PC 鋼材のひずみは 図-8, 9 に示したひびわれ分布図に対応して，上下スラブの中央断面，側壁頂部で

大きくなっている。この傾向は破壊に近づくにしたがって顕著になる。特に側壁の鉄筋のひずみに顕著で，破壊に近い荷重における降伏域の広がり，平均して  $l_x \geq 2.8h$  となっている。上下スラブの PC 鋼材のひずみは破壊荷重近傍で急激に増加するが，増加割合は鉄筋ほど大きくない。図-10 は側壁上端断面の降伏によって，この部分にプラスチック ヒンジが成形され，不静定次数の低下によって断面力の再分布が起り，その後上スラブの中央断面近傍，下スラブの中央断面近傍の順序で降伏が起り，プラスチック ヒンジを成形して崩壊に至

表-8 表面ひびわれ幅 (mm)

部 材	設計荷重 $P_v=7.50\text{ t}$	$P_v=14.00\text{ t}$ (破壊荷重の 87.5%)		備 考
		載 荷 時	残 留	
側 壁 (RC)	$0.10\pm 0.07$	$0.57\pm 0.45$	$0.32\pm 0.39$	斜引張ひびわれなし
上下スラブ (PC)	0.05	$0.35\pm 0.04$	$\div 0$	" "

ることを示唆している。

ひびわれ幅は側壁(RC)が大きく、上下スラブ(PC)は小さい。ひびわれ幅は表-8の傾向を示した。上下スラブのひびわれ幅は載荷時も小さく、除荷したときは肉眼で見えない程度に閉縮した。側壁のひびわれ幅は上下スラブに比較して、載荷時および除荷後ともに大きい。また、その変動係数も65~120%と大きく、最大値は平均値の2倍以上になることもある。

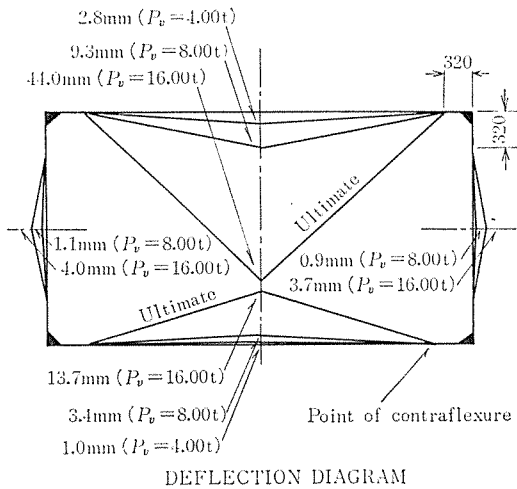


図-11 たわみ

剛節点に近い断面のたわみを測定し、この断面を基準とした上下スラブの中央断面および側壁の水平荷重作用点のたわみを図-11に示した。図-11は上下スラブおよび側壁のたわみを比較したもので、上スラブのたわみが最も大きく、側壁の負のたわみは最も小さい。破壊直前の上下スラブ中央断面のたわみ集中は著しい。

表-9 設計荷重および破壊荷重のたわみ

部 材	測定間離 $l$ (mm)	たわみ $\delta$ (mm)		たわみ比	
		設 計 荷 重	破 壊 荷 重	設 計 荷 重	破 壊 荷 重
上スラブ	2680	9.3	44.0	1/288	1/61
下スラブ	2680	3.4	13.7	1/788	1/196
側 壁	1585	1.0	3.9	1/1585	1/406

図-12はたわみが最も大きい上スラブ中央断面の荷重-たわみ図である。補助的に与えたプレストレスの効果は設計荷重( $P_v=7.50\text{ t}$ )ではそれほど目立たないが、

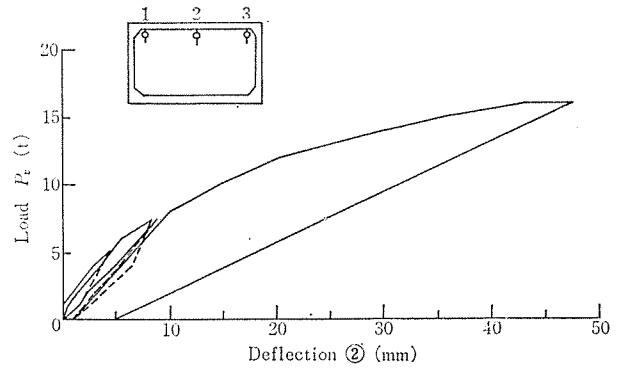


図-12 上スラブのたわみ

破壊荷重に近い荷重を載荷したときの変形能力および回復にあらわれている。破壊荷重に近い荷重が作用したときの残留たわみは約1/10であった。しかし、上スラブの設計荷重作用時のたわみは大きく、曲げ剛度が不足している。

表-9は設計荷重および破壊荷重作用時のたわみとたわみ比である。上スラブのたわみは設計荷重、破壊荷重作用時ともに大きく、曲げ剛度の不足を示している。下スラブおよび側壁のたわみは小さく問題はない。上下スラブともに中央断面のたわみが大きく、ひびわれ状態図とあわせてみれば、この断面にプラスチックヒンジが形成される可能性を示唆している。

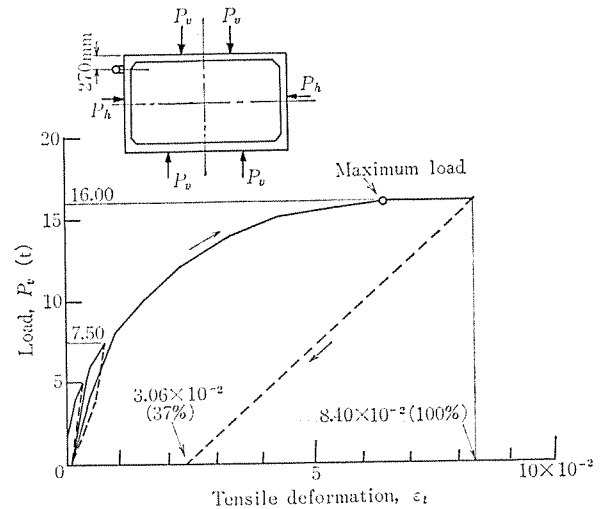


図-13 プラスチック形成位置の見かけのひずみ

図-13は側壁(RC)上部に最初に形成されるプラスチックヒンジの、ひびわれを含む見かけの引張ひずみと鉛直荷重との関係である。この変形測定にはO型リングひずみ計(差動トランス)を用い、標点間距離 $l_g=150\text{ mm}$ とした。最大荷重に到達し、コンクリートが圧縮破壊を起す直前まで測定した。

図-13は、コンクリートの見かけの引張ひずみ度が約 $6500 \cdot 10^{-6}$ で最大荷重に到達し、最大値は $8400 \cdot 10^{-6}$ 以上になることを示している。この状態ではまだ圧縮域



が残っているが、曲率と回転角を近似的に  $\phi \doteq \epsilon_t/h$ ,  $\theta \doteq \epsilon_t \cdot l_g/h$  で表わせば、最大荷重に到達したときの値は  $\phi > 5420 \cdot 10^{-6}/\text{cm}$ ,  $\theta > 81250 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$  である。また、測定できた曲率と回転角の最大値は  $\phi > 7000 \cdot 10^{-6}/\text{cm}$ ,  $\theta > 105000 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$  であった。この荷重を除いたときの残留ひずみは、載荷時の約 37% であった。

ひびわれを含む変形量から計算した上記の曲率および回転角は、当然のことではあるが、鉄筋の降伏ひずみ度およびコンクリートの圧縮ひずみ度から計算した理論値よりもかなり大きい。

### 7. 降伏荷重または破壊荷重の計算

降伏荷重も破壊荷重も、構成部材の変形能力が十分であれば同じ計算式を用いられる。ただ、部材の降伏モーメントを用いるか、破壊モーメントを用いるかの違いだけである。本試験は構成部材が崩壊するまで載荷しなかったため、降伏荷重を計算し、測定値と比較してみる。

降伏荷重または破壊荷重の計算は、構造物が降伏あるいは破壊するときの部材断面力が不明であるから、逐次近似計算によるのが原則である。しかし、軸方向力やせん断力が小さく、抵抗曲げモーメントにたいする影響が小さいときは、これを無視できる。最初の計算には軸方向力やせん断力の影響を無視したプラスチック ヒンジの降伏または破壊曲げモーメントを用いる。また、プラスチック ヒンジの形成位置の組合せを考え、Case I ~ Case III のいずれかの計算式を適用する。本試験の場合は Case I に相当するので、計算式 (1) を適用する。数値計算の結果を以下に示す。

$$P_{vu} = \frac{M_1 + M_2 + (M_2 + M_3) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}{a_1 + (L/2 - a_2 - \alpha a_4) \frac{\Delta H}{H - \Delta H}}$$

$$d = h/2 + (\text{ハンチの高さ}) = 0.06 + 0.15 = 0.21 \text{ m}$$

$$H = 2.25 \text{ m}, \quad \frac{\Delta H}{H - \Delta H} = \frac{0.21}{2.25 - 0.21} = 0.104,$$

$$a_1 = 1.10 \text{ m}, \quad a_2 = 1.00 \text{ m}, \quad a_4 = 1.20 \text{ m},$$

$$L = 3.32 \text{ m}, \quad H = 2.25 \text{ m}, \quad \alpha = P_H/P_v = 0.40,$$

$$a_1 + (L/2 - a_2 - \alpha a_4) \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \\ = 1.10 + (1.66 - 1.00 - 0.40 \times 1.20) \times 0.104 \\ = 1.12 \text{ m}$$

$$P_{vu} = 0.893(M_1 + M_2) + 0.093(M_2 + M_3)$$

- 1) プラスチック ヒンジ 1 の降伏曲げモーメント、

$$M_1 = M_{1sy}$$

$$b = 115.0 \text{ cm}, \quad d_p = 9.5 \text{ cm}, \quad h = 12.0 \text{ cm},$$

$$A_p = 5 - \phi 16 = 869.2 \text{ mm}^2, \quad f_{py} = 128.4 \text{ kg/mm}^2,$$

$$f_c' = 480 \text{ kg/cm}^2, \quad A_p \cdot f_{py} = 111.61 \text{ t},$$

$$x \doteq \frac{A_p f_{py}}{b \cdot 0.85 f_c'} = \frac{111.610}{46.920} = 2.38 \text{ cm}.$$

$$M_{1sy} \doteq A_p f_{py} (d_p - x/2) \\ = 111.61 \times (0.095 - 0.0119) \\ = 9.27 \text{ t-m}$$

- 2) プラスチック ヒンジ 2 の降伏曲げモーメント、

$$M_2 = M_{2sy}$$

$$b = 115.0 \text{ cm}, \quad d_s = 10.0 \text{ cm}, \quad h = 12.0 \text{ cm},$$

$$A_s = 24.13 \text{ cm}^2, \quad f_{sy} = 3000 \text{ kg/cm}^2,$$

$$f_c' = 480 \text{ kg/cm}^2, \quad A_s f_{sy} = 72.39 \text{ t}.$$

$$x \doteq \frac{A_s f_{sy}}{b \cdot 0.85 f_c'} = \frac{72.390}{46.920} = 1.54 \text{ cm}.$$

$$M_{2sy} \doteq A_s f_{sy} (d_s - x/2) \\ = 72.39 \times (0.10 - 0.0077) = 6.73 \text{ t-m}$$

- 3) プラスチック ヒンジ 3 の降伏曲げモーメント、

$$M_3 = M_{3sy}$$

$$b = 115.0 \text{ cm}, \quad d_p = 14.0 \text{ cm}, \quad h = 17.0 \text{ cm},$$

$$A_p = 5 - \phi 16 = 869.2 \text{ mm}^2, \quad f_{py} = 128.4 \text{ kg/mm}^2,$$

$$f_c' = 480 \text{ kg/cm}^2, \quad A_p f_{py} = 111.61 \text{ t},$$

$$x \doteq \frac{A_p f_{py}}{b \cdot 0.85 f_c'} = \frac{111.610}{46.920} = 2.38 \text{ cm}.$$

$$M_{3sy} \doteq A_p f_{py} (d_p - x/2) \\ = 111.61 \times (0.14 - 0.0119) = 14.29 \text{ t-m}$$

したがって、破壊荷重の第一次近似値は次の値になる。

$$P_{vsy} = 0.893(M_1 + M_2) + 0.093(M_2 + M_3) \\ = 0.893 \times (9.27 + 6.73) + 0.093 \\ \times (6.73 + 14.29) = 16.24 \text{ t-m}$$

このときの各部材の軸方向力とせん断力は次の値になる。

上スラブ:

軸方向圧縮力

$$N_1 = \frac{1}{\Delta H} (a_1 P_{vu} - M_1 - M_2) \\ = \frac{1}{0.21} \times (1.10 \times 16.24 - 9.27 - 6.73) \\ = 8.88 \text{ t}$$

$$S_1 = P_{vu} = 16.24 \text{ t}$$

$$f_{cN} = \frac{N_1}{A_c} = \frac{8.880}{12.0 \times 115.0} = 6.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_1 = \frac{S_1}{bh} = \frac{16.240}{12.0 \times 115.0} = 11.8 \text{ kg/cm}^2$$

側 壁:

軸方向圧縮力

$$N_3 = P_{vu} = 16.24 \text{ t}$$

$$S_3 = P_H - N_1 = 6.40 - 8.88 = -2.48 \text{ t}$$

$$f_{cN} \doteq \frac{N_3}{A_c} = \frac{16.240}{12.0 \times 115.0} = 11.8 \text{ kg/cm}^2$$

表-11 破壊荷重その他

試験体	ひびわれ発生状況	破壊荷重* $P_{usy}$ (t)		
		測定値	計算値	測定値 計算値
No. 1	$P_H=2.0t$ で側壁載荷断面にひびわれ $P_v=4.0t$ で側壁上部にひびわれ $P_v=8.0t$ で上下スラブにひびわれ	16.00	16.24	0.99
No. 2	$P_v=4.0\sim 5.0t$ で側壁上部にひびわれ $P_v=6.0t$ で側壁下部にひびわれ $P_v=7.5t$ で上下スラブにひびわれ	16.00	16.24	0.99

\* ここでいう破壊荷重とは、変形が大きくなり、荷重が増加しなくなるときの値で、構成部材の一部が圧縮破壊を起すまでは載荷していない。したがって、この値は降伏荷重と破壊荷重との中間の値を考えられる。

$$\tau_3 = \frac{S_3}{bh} = \frac{2480}{12.0 \times 115.0} = 1.8 \text{ kg/cm}^2$$

下スラブ:

軸方向力

$$N_2 = P_H - N_1 = 6.40 - 8.88 = -2.48 \text{ t}$$

$$S_2 = P_{vu} = 16.24 \text{ t}$$

$$f_{cN} = \frac{N_2}{A_c} = \frac{-2480}{17.0 \times 115.0} = -1.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_2 = \frac{S_2}{bh} = \frac{16240}{17.0 \times 115.0} = 8.3 \text{ kg/cm}^2$$

構造物の降伏または破壊時の断面力は、上スラブのせん断応力度、側壁の軸方向圧縮力がやや大きい、その大きさはコンクリートの圧縮強度の3%以下であって、プラスチックヒンジの抵抗曲げモーメントや回転能力にほとんど影響しない。したがって、構造物が崩壊する終極状態の部材断面力を考慮する第2次計算の必要はなく、第1次計算で十分な近似値が得られる。表-11は計算結果と測定値を示したもので、ほぼ良好な結果が得られている。この計算順序をフローチャートで示せば、図-14 のようになる。この順序によれば、それほど複雑な計算を必要としないが、プラスチックヒンジの各組合せについて、計算しなければならぬ場合もある、この点が難点である。

### 8. 結 論

簡単な不静定構造物の終極状態設計の手がかりを得るために、部分的にプレストレスを導入したボックスフレームの終極状態解析を試みた。その結果を要約すれば次のとおりである。

1) ボックスフレームの降伏または破壊荷重は、条件が同一であれば、式(1)~(18)で計算できる。終極状態の構成部材の断面力の再分布の影響は、第2次計算以後に考慮し、計算に入れる。

2) プラスチックヒンジの形成位置は、上下スラブのスパン中央断面、剛節点近傍および柱材の上端であった。剛節点に近いプラスチックヒンジは、剛節点から  $4H$  また  $4L$  の断面に生じ、 $4H$ ,  $4L \div (h/2 + s)$  と仮定できる。ここにスラブ状部材の特徴があらわれている。

3) プラスチックヒンジの曲率または回転角は、ある断面に集中すると仮定しているが、側壁上部(RC)のプラスチックヒンジ近傍の鉄筋のひずみ分布から、ヒンジの長さは  $l_z \geq 2.8h$  となっている。

4) 最初のプラスチックヒンジは最後のプラスチックヒンジ形成まで圧縮破壊を起してはならないが、一般に用いられる鉄筋量、PC鋼材量の場合は、この条件を満足している。その大略の検討は鉄筋比  $\rho$  または鉄筋係数によるのがよい。鉄筋係数と降伏モーメント、破壊モーメントおよび曲率の関係を図表化した基礎資料が必要である。

5) 設計の場合は、許容荷重に荷重係数を乗じたものを破壊荷重として、構造物を構成する部材を決める。このとき、鉄筋量またはPC鋼材量を実用上の点から適当と思われる範囲で先に決めておき、これに対応するコンクリート断面を決めるのがよい。しかし、プレストレスコンクリートのPC鋼材量はコンクリート断面積に比例し、鉄筋コンクリートの鉄筋量はコンクリート断面に逆比例するので、適切な鉄筋比、PC鋼材比の選択が重要

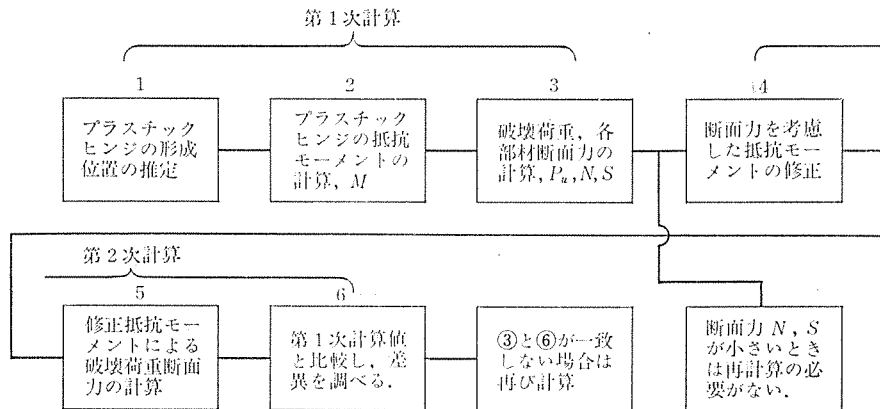


図-14 破壊荷重の計算順序

である。また、部材のじん性を増すために圧縮鉄筋、スターラップの使用も大切である。

許容荷重作用時の応力度、変形などの検査には、現在使用されている許容応力度設計法の計算式を使用できる。

記 号

$A_c$ : コンクリートの断面積  
 $A_p$ : PC鋼材の断面積  
 $A_s$ : 鉄筋の断面積  
 $E_c$ : コンクリートのヤング係数  
 $E_p$ : PC鋼材のヤング係数  
 $E_s$ : 鉄筋のヤング係数  
 $H$ : フレーム軸線の高さ  
 $I_c$ : コンクリートの断面 2 次モーメント  
 $L$ : フレーム軸線の長さ (スパン)  
 $M$ : プラスチック ヒンジの抵抗曲げモーメント  
 $M_{sy}$ : プラスチック ヒンジの降伏曲げモーメント  
 $M_{cu}$ : プラスチック ヒンジの破壊曲げモーメント  
 $N$ : 断面の軸方向力  
 $P_v$ : 鉛直荷重  
 $P_H$ : 水平荷重  
 $S$ : 断面のせん断力  
 $Z_c$ : コンクリートの断面係数  
 $a$ : 荷重位置を示す距離  
 $b$ : 断面幅  
 $d_p$ : PC鋼材の有効高さ  
 $d_s$ : 鉄筋の有効高さ  
 $e_p$ : PC鋼材の偏心距離  
 $f_c$ : コンクリートの曲げ応力度  
 $f_c'$ : 標準供試体の圧縮強度

$f_{cN}$ : コンクリートの軸方向圧縮応力度  
 $f_{py}$ : PC鋼材の降伏点応力度  
 $f_{pu}$ : PC鋼材の引張強度  
 $f_{sy}$ : 鉄筋の降伏点応力度  
 $f_{su}$ : 鉄筋の引張強度  
 $h$ : 断面の全高さ  
 $l_g$ : ゲージの長さ  
 $l_z$ : プラスチック ヒンジの長さ  
 $p_p$ : PC鋼材比  $= A_p/bd_p$   
 $p_s$ : 鉄筋比  $= A_s/bd_s$   
 $s$ : ハンチの水平または鉛直長さ  
 $x$ : 圧縮縁から中立軸までの距離, 水平距離  
 $y$ : 鉛直距離  
 $\beta_y = f_{sy}/0.85 f_c', f_{py}/0.85 f_c'$   
 $\epsilon_c$ : コンクリートの引張ひずみ  
 $\epsilon_t$ : コンクリートの圧縮ひずみ  
 $\theta$ : 部材の回転角

参 考 文 献

- 1) 坂 静雄: 鉄筋コンクリートの研究, 産業図書 (株), 昭和 29 年 12 月 (1954)
- 2) Milik Tiching, Josef Rákonsik: Kräfteumlagerung in Stahlbetontragwerken, Verlag Technischer Literatur, Prag, 1971
- 3) 神山 一: プレストレスト コンクリートはりのプラスチック ヒンジの特性, プレストレスト コンクリート, Vol. 14, No. 4, Aug. 1972
- 4) 神山 一: PC 不静定構造物終極破壊荷重の計算, プレストレスト コンクリート, Vol. 16, No. 2, April, 1974
- 5) Susumu Kamiyama: Limit State Analysis of Prestressed Concrete Portal Frame, Journal of Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Special Publication for VIIIth Congress, New-York May pp. 25~31, 1974

1975.2.6・受付

工 事 ニ ュ ー ス 提 供 の お 願 い

工事ニュースは、現在どこで、どんな PC 構造物が作られているかを知る上で非常に参考になり、また関心をもって読まれていることは会員諸兄の知るところですが、編集委員の守備範囲内だけではすべての工事を網羅することはできません。

現場におられる会員諸兄から、是非現在このような工事がここまで進行している、または完成したといったニュースを、簡単な文章と、写真・図面等を添付されたいうで協会誌編集委員会あてお寄せ下さいますようお願い致します。特にむずかしい規定はありません。採用の分には薄謝を呈します。

送付先: 東京都千代田区麴町 1 の 10 の 15 紀の国やビル

PC 技術協会編集委員会 電話 03 (261) 9151