

## PC 不静定構造物終極破壊荷重の計算 “2 ヒンジ PC ラーメンの破壊荷重”

神 山 一\*

### 要 旨

この報告は、PC不静定構造物終極破壊荷重計算法の最も簡単な例として2ヒンジPCラーメンの破壊荷重の計算法について述べたものである。普通鉄筋およびPC鋼材のひずみ硬化などの影響が、PC部材のプラスチックヒンジの性質、特に曲げモーメントと回転能力におよぼす効果を検討した。鉄筋やPC鋼材のひずみ硬化がプラスチックヒンジの性質に顕著な影響をおよぼすことを明らかにした。数値計算の結果は、鉄筋やPC鋼材の応力度一ひずみ度の関係がPC部材の降伏から破壊の間の曲げモーメントおよび変形能力の余裕に著しい影響を与えることが示された。

PC不静定構造物の最も簡単な例として2ヒンジラーメンの理論的研究および実験的研究を行ったが、鉛直荷重および交互に作用する水平荷重が作用する状態では、普通鉄筋がプラスチックヒンジの性質の改善にきわめて役立つことを確かめた。

### 1. 終極破壊荷重計算の問題点

鉄筋コンクリート構造物やプレストレスト コンクリート構造物の破壊荷重の計算、塑性設計の方法については多数の研究が報告されているが、部材の強度と変形能力の計算や構造物が崩壊するときに形成されるプラスチックヒンジの位置の推定方法などに問題が残されている<sup>1)~6)</sup>。

鋼構造物の分野で発達した終極破壊荷重の計算法や塑性設計の方法がそのままコンクリート構造物に適用できないのは、鋼と鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリートの材料の性質の相違によるものである。終極状態でコンクリートあるいはコンクリート鋼材との複合材料の性質がどのように現われ、評価するかが問題である。特に強度と同等に変形能分の分野に研究課題が多い。

コンクリート部材に関する研究、実験の多くは強度に

重点がおかれ、変形についてはたわみの測定や計算の程度にとどまり、限界断面の曲率、回転能力あるいは曲げ剛度の研究はそれほど重視されなかった。これらの部材の変形に関する基本的な性質は、部材の破壊荷重の計算や破壊荷重設計法には直接的に問題とならないが、構造物の終極破壊荷重の計算や設計には、変形能力は避けることのできない問題である。

鋼構造物の終極破壊荷重の計算方法はかなり進歩している。鋼材が延性に富む材料であり、プラスチックヒンジの回転能力に制限がなく、形成位置も理想化されて、計算式の単純化が行われている。しかし、プラスチックヒンジの回転能力を制限せずに計算式を適用すれば、ひずみあるいは変形の適合条件に矛盾がおこる。軟鋼は降伏ひずみの約10~20倍のひずみで硬化域に入るとは考慮されておらず、冷間加工鋼、高強度鋼あるいはPC鋼材などでは保証強度 (proof strength) を降伏点応力度として、これを単純化して応力度一ひずみ度の関係を表現して降伏曲げモーメントその他の強度はほぼ適切に評価できても、ひずみの適合条件は満足していないことが多い。

鋼構造物の分野で発達した終極破壊荷重計算法や設計法をコンクリート構造物に適用しようとする、次の点で無理を生じる。これはコンクリートという材料の特徴によるものである。

1) コンクリートは低応力度で塑性性質が現われるが、破壊に近い応力度では塑性に欠ける性質がある。また、ひずみ勾配があるときの強度低下、限界ひずみの増大に関する基礎資料が不十分である。

2) コンクリート部材はひびわれが発生しやすい。ひびわれによって曲げ剛度に変化が起り、部材力の再分布を誘起する。PC部材のひびわれ発生による曲げ剛度の低下に関する基礎資料がきわめて少ない。

3) プレストレスト コンクリートまたは鉄筋コンクリート部材はコンクリートと鋼との複合部材で、部材の降伏あるいは破壊にそれぞれの材料の特徴が複雑に現われる点が鋼構造物と異なる。引張側のPC鋼材あるいは

\* 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

鉄筋の降伏と部材の降伏とは必ずしも一致せず、後者が多少は大きい傾向がある。

4) プラスチックヒンジは点ではなく、ある長さをもっている。鋼構造物の場合は点として扱われ、形成長さはほとんど検討されていない。プレストレスト コンクリート部材または鉄筋コンクリート部材では、プラスチックヒンジ形成域の形成長さを十分に検討しなければならないが、これに関する研究は理論、実験研究ともに少なく、経験的な推定値が用いられている。したがって、プラスチックヒンジの回転能力、形成位置、PC鋼材比または鉄筋比の選択または推定の確かな指標が得られない。

5) プラスチックヒンジの形成位置の推定は、最初は弾性理論による断面力の分布を基本にする方法が一般に用いられているが、ひびわれが発達した領域では曲げ剛度が低下し、断面力の再分布が誘起されるので、推定誤差が大きくなると推察される。プラスチックヒンジの形成位置は断面強度との相対的關係できまるが、これを数式で求めることは手数がかかる。

模形実験によるプラスチックヒンジの形成位置の推定には多くの問題があるが、各種形式の不静定コンクリート構造物の模形実験による形成位置の推定は有効な手がかりとなる。

6) 軸方向力が部材の強度と変形能力におよぼす影響は大きい。軸方向圧縮力と曲げモーメントとをうける部材の理論的研究、実験的研究は多いが、軸方向引張力と曲げモーメントとをうける部材の研究は少なく、今後の研究課題の一つである。

7) せん断力が部材の強度と変形能力におよぼす影響も未解決で、古くて新しい研究課題の一つである。せん断力が影響するいくつかの見かけ上、異なる破壊形式を統一して理解できる理論的研究が必要である。

以上のような問題点を考慮すれば、低次不静定PC構造物であっても、基礎的な問題を解決しながら、終極破壊荷重の計算を進めなければならない。低次不静定PC構造物の終極破壊荷重計算の過程で、プラスチックヒンジの回転能力、形成位置の推定、軸方向力とせん断力の

影響を理論的に検討し、実験で確かめることによって、終極破壊荷重計算のための仮定の単純化の手がかりが得られる。

多くの基礎的問題を残している現状で、不静定PC構造物の終極破壊荷重を試みることは多少の無理がありいくつかの仮定を設けなければならないが、構造物を構成するPC部材の任意の断面力が作用する状態における強度と変形能力がどのように重要であるかを認識することができる。また、これからPC部材の強度と変形能力に関する基礎的研究の一つの視点を得ることもできる。

## 2. プラスチックヒンジの抵抗曲げモーメントと曲率

PC不静定構造物の終極破壊荷重計算の基礎となるものであるから、あらゆる断面力を想定して計算式を導きできうれば図表化しておく必要がある。2ヒンジPCラーメンを例にとれば、鉛直荷重に対してはほぼ予期したようにプレストレスが有効に働くが、水平荷重が作用する場合、特に大きな水平荷重が作用するときはプレストレスモーメントが有効に働かないことがある。予期されない作用方向および大きさの荷重が作用することはまれであるとしても、終極状態で脆性破壊を避けるためには、普通鉄筋を付加配置しておく必要がある。このために、PC構造物の終極破壊荷重の計算には、プレストレスト コンクリート部材の終極状態の検討だけではなく、鉄筋コンクリート部材としての終極状態の検討も必要である。

鉄筋コンクリート：(図-1の(a)と(d)参照、他は記号参照のこと)

### 1) 軟鋼の場合<sup>7)</sup>

#### (a) プラスチックヒンジの形成

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_s &= \varepsilon_{s_y}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_{s_y} \cdot k_{s_y} / (1 - k_{s_y}) : \\ M_{s_y} / b d^2 f_{c0} &= C_m \cdot k_{s_y}^2 + \rho \beta_y (1 - k_{s_y}) \\ \phi_{s_y} \cdot d &= \varepsilon_{s_y} / (1 - k_{s_y}) \\ k_{s_y} &= \rho \beta_y / C_f, \quad C_f = \int_0^{\xi} \eta \cdot d \xi, \\ C_m &= \int_0^{\xi} \eta \cdot \xi \cdot d \xi, \quad \eta = f_c / f_{c0}, \quad \xi = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

図-2 参照

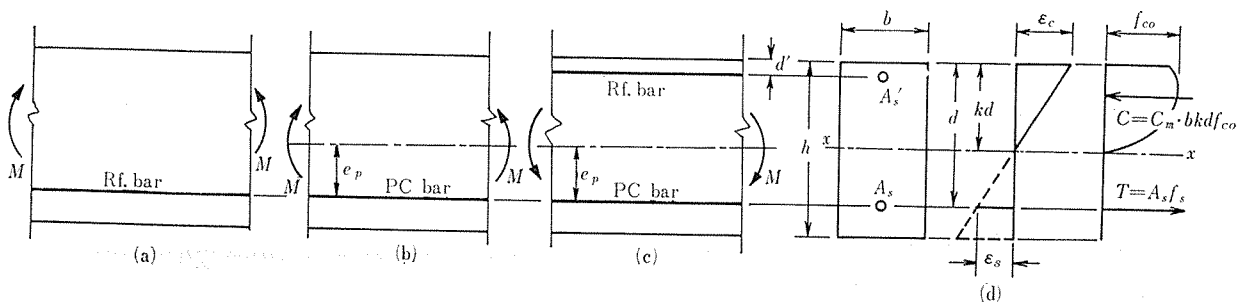


図-1

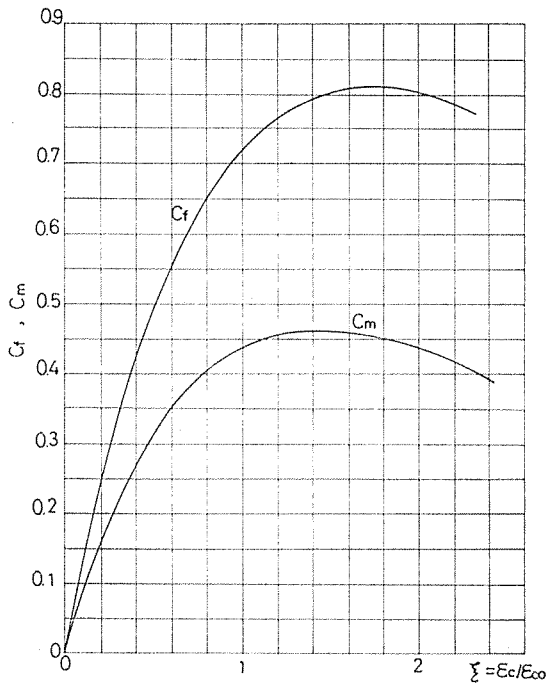


図-2 係数  $C_f, C_m$

(b) プラスチックヒンジの完了

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_{cu}, \quad \epsilon_{sh} \geq \epsilon_s = \epsilon_{cu} \cdot (1 - k_{cu}) / k_{cu} \geq \epsilon_{sy}; \\ C_m &= C_{mu}, \quad C_f = C_{fu} \\ M_{cu} / bd^2 f_{co} &= C_{mu} \cdot k_{cu}^2 + p \beta_y (1 - k_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / k_{cu}, \quad k_{cu} = p \beta_y / C_{fu} \\ \epsilon_s &= \epsilon_{cu} (1 - k_{cu}) / k_{cu} \geq \epsilon_{sh}; \\ q &= f_s / f_{sy} = 1 + A \cdot \log_e \epsilon_s / \epsilon_{sh} \\ M_{cu} / bd^2 f_{co} &= C_{mu} \cdot k_{cu}^2 + p \beta_y \cdot q (1 - k_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / k_{cu}, \quad k_{cu} = p \beta_y / C_{fu}, \\ \text{例えば SD 35 の場合, } A &= 0.255 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

2) 冷間加工鋼, 高強度鋼の場合<sup>7)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{s0}, \quad \epsilon_c = \epsilon_{s0} k_{s0} / (1 - k_{s0}) < \epsilon_{cu}; \\ M_{s0} / bd^2 f_{co} &= C_m \cdot k_{s0}^2 + p \beta_0 (1 - k_{s0}) \\ \phi_{s0} \cdot d &= \epsilon_{s0} / (1 - k_{s0}), \quad k_{s0} = p \beta_0 q' / C_f \\ \epsilon_c &= \epsilon_{cu}, \quad \epsilon_s = \epsilon_{cu} (1 - k_{cu}) / k_{cu} > \epsilon_{c0}; \\ M_{cu} / bd^2 f_{co} &= C_{mu} \cdot k_{cu}^2 + p \beta_0 q' (1 - k_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / k_{cu}, \quad k_{cu} = p \beta_0 q' / C_{fu} \\ q' &= 1 + (\xi - 1) / \{A + B(\xi - 1)\}, \\ \text{例えば } A &= 3.28, \quad B = 2.04 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

プレストレスト コンクリート<sup>7)</sup>:

1) 正の曲げモーメントが作用する場合 (図-1 の

(b), (d) 参照)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{sy} = \epsilon_{ss} + f_s / E_s, \quad \epsilon_c = \epsilon_{sy} \cdot k_{sy} / (1 - k_{sy}) \\ &< \epsilon_{cu}; \quad M_{sy} / bd^2 f_{co} = C_m \cdot k_{sy}^2 + p \beta_y (1 - k_{sy}) \\ \phi_{sy} \cdot d &= \epsilon_{sy} / (1 - k_{sy}), \quad k_{sy} = p \beta_y / C_f \\ \epsilon_c &= \epsilon_{cu}, \quad \epsilon_s = \epsilon_{cu} (1 - k_{cu}) / k_{cu} \geq \epsilon_{sy}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} M_{cu} / bd^2 f_{co} &= C_{mu} \cdot k_{cu}^2 + K \cdot p \beta_y (1 - k_{cu}) \\ \phi_{cu} \cdot d &= \epsilon_{cu} / k_{cu}, \quad k_{cu}^2 + 2 b_0 k_{cu} + C_0 = 0 \\ b_0 &= \frac{1}{2} \frac{B \cdot \gamma + \{-A + (1+B)(1+\gamma)\} p \beta_y / \alpha}{C_{fu} \{-A + B(1+\gamma/C_{fu})\}} \\ C_0 &= \frac{(1+B) \gamma p \beta_y / \alpha}{C_{fu} \{-A + B(1+\gamma/C_{fu})\}} \\ \alpha &= f_{sy} / f_{s0}, \quad \gamma = \epsilon_{cu} / \epsilon_{s0}, \quad K = f_s / f_{sy}, \\ \text{例えば } A &= 0.81 \sim 0.98, \quad B = 5.16 \sim 5.20 \end{aligned} \right\}$$

..... (4)

2) 負の曲げモーメントが作用する場合 (図-1 の (c) と (d) 参照) (鉄筋コンクリートの特殊な場合)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{sy}, \quad \epsilon_c = \epsilon_{cg} + \epsilon_{sy} \cdot k_{sy} / (1 - k_{sy}) < \epsilon_{cu} \\ (M_{sy} + M_p) / bd^2 f_{co} &= C_{me} \cdot k_{sy}^2 + p \beta_y (1 - k_{sy}) \\ &\quad - (1/2 - k_{sy} d/h) f_{cg} / f_{co} \\ \phi_{sy} \cdot d &= \epsilon_{sy} / (1 - k_{sy}), \\ k_{sy} &= \{p \beta_y - (h/d) (f_{cg} / f_{co})\} / C_{fe} \\ C_{fe} &= \int_{\epsilon_0}^{\xi} \eta \cdot d \xi, \\ C_{me} &= \int_{\epsilon_0}^{\xi} \eta \cdot \xi \cdot d \xi, \quad (\text{図-2 から求められる}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_{cu}' = \epsilon_{cu} - \epsilon_{ce}' \quad \epsilon_s = \epsilon_{cu}' (1 - k_{cu}') / k_{cu}' \\ \epsilon_{sy} &\leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}; \\ (M_{cu} + M_p) / bd^2 f_{co} &= C_{meu} \cdot k_{cu}'^2 + p \beta_y (1 - k_{cu}') \\ &\quad - (1/2 - k_{cu}' d/h) f_{cg} / f_{co} \\ \phi_{cu}' \cdot d &= \epsilon_{cu}' / k_{cu}', \\ k_{cu}' &= \{p \beta_y - (h/d) (f_{cg} / f_{co})\} / C_{feu} \\ \epsilon_s &\geq \epsilon_{sh}; \\ (M_{cu} + M_p) / bd^2 f_{co} &= C_{meu} \cdot k_{cu}'^2 + p \beta_y \cdot q (1 - k_{cu}') \\ &\quad - (1/2 - k_{cu}' d/h) f_{cg} / f_{co} \\ \phi_{cu}' \cdot d &= \epsilon_{cu}' / k_{cu}', \\ k_{cu}' &= \{p \beta_y \cdot q - (h/d) (f_{cg} / f_{co})\} / C_{feu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

材料の品質による諸係数を用いれば  $M_{sy} / bd^2 f_{co}$ ,  $M_{cu} / bd^2 f_{co}$ ,  $\phi_{sy} \cdot d$  および  $\phi_{cu} \cdot d$  を計算しておくことができる。図-3~7 は計算例を図示したものである。数値計算で手数がかかるのは中立軸係数の計算であるが、 $C_f, C_{fe}$  が中立軸係数の関数であることに注目して図式計算法によって求めるのがよい。また、降伏曲げモーメントの計算値は実験値よりも約 10% 程度小さい値である。

3. プラスチックヒンジの形成位置の推定

部材の強度と変形能力, 荷重の大きさと作用方向との

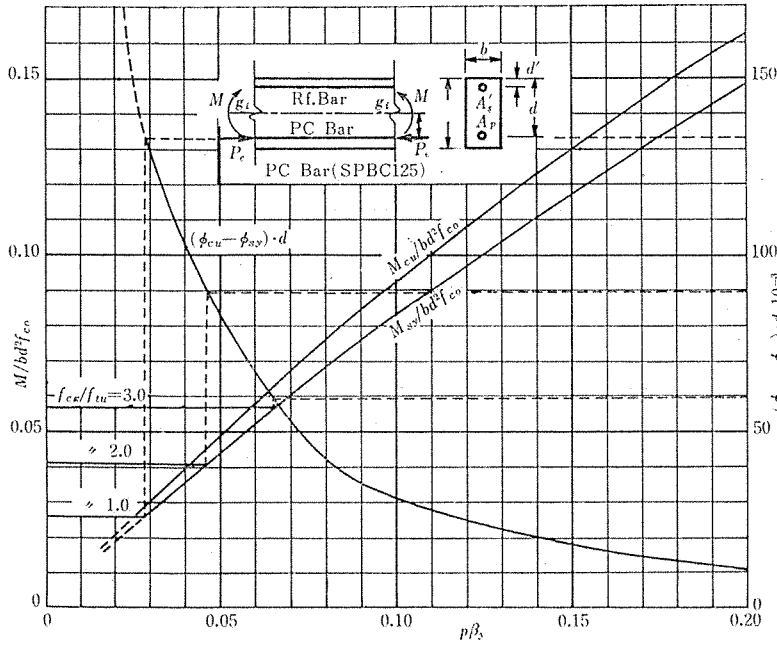


図-3

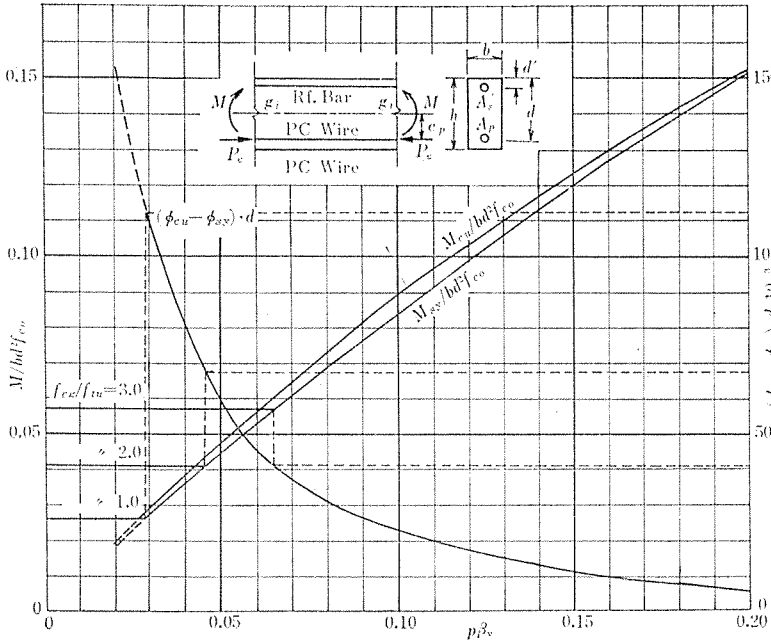


図-4

相関関係でプラスチックヒンジの形成位置はきまる。その位置は簡単な計算では求められないので、極端に理想化するか、実験を参考にしてくめる経験的方法が一般に用いられる。また、弾性理論による断面力の分布から推定する場合は、外力による曲げモーメントの分布と抵抗曲げモーメントの分布とを比較して求める。軸方向力は曲げモーメントに対する効果として取り扱うのがよい。十分にせん断補強してせん断破壊が起らないようにし、軸方向引張力の影響などは重合の法則を適用すれば、プラスチックヒンジの抵抗曲げモーメントおよび曲率または回転能力が求められる。

2 ヒンジラーメンを例にとれば、次のような方法が考えられる。図-8 は柱およびはりの正負の抵抗曲げモーメント図である。これには普通鉄筋の影響は考慮してあるが、平均プレストレスの効果は考慮していない。ここでは、それほど厳密な計算を必要としない。正負の抵抗曲げモーメントは近似的に次のように表わせる。座標  $x, y$  および  $x'$  はそれぞれ節点 B と断面 E を原点とする。

柱材;

負の抵抗曲げモーメント

$$M_y' = -M_B' \cdot \alpha_{cy}' \\ \doteq -40.39(1 - 0.274 y), \text{ t-m}$$

正の抵抗曲げモーメント

$$M_y = M_B \cdot \alpha_{cy} \\ \doteq 18.11(1 - 0.064 y), \text{ t-m} \\ \dots\dots\dots (7)$$

はり材;

負の抵抗曲げモーメント

$$M_x = -M_B \cdot \alpha_{cx} \\ \doteq -39.26(1 + 0.018 x - 0.279 x^2), \text{ t-m}, \\ 0 \leq x \leq 1.25 \text{ m}$$

$$M_{x'}' = -M_E \cdot \alpha_{cx}' \\ \doteq -33.83(1 + 0.101 x' - 0.174 x'^2), \text{ t-m}, \\ 0 \leq x' \leq 1.50 \text{ m}$$

正の抵抗曲げモーメント

$$M_{x'} = M_E \cdot \alpha_{cx} \\ \doteq 33.62(1 + 0.101 x' - 0.174 x'^2), \text{ t-m}, \\ 0 \leq x' \leq 1.25 \text{ m}$$

$$M_x = M_E \cdot \alpha_{cx} \\ \doteq 40.39(1 + 0.018 x - 0.279 x^2), \text{ t-m}, \\ 0 \leq x \leq 1.50 \text{ m} \\ \dots\dots\dots (8)$$

この係数  $\alpha_{cx}, \alpha_{cx}'$  は、はりの反曲点の近傍には適用できない。係数  $\alpha_{cx}, \alpha_{cx}'$  は PC 鋼材、鉄筋の配置によるもので、プラスチックヒンジ推定のための有効な係数である。

図-9 (a) は、はりの中央点 E に鉛直荷重のみが作用したときの弾性理論による曲げモーメントが抵抗曲げモーメントとほぼ等しくなるように鉛直荷重  $P_V = 50 \text{ t}$  に

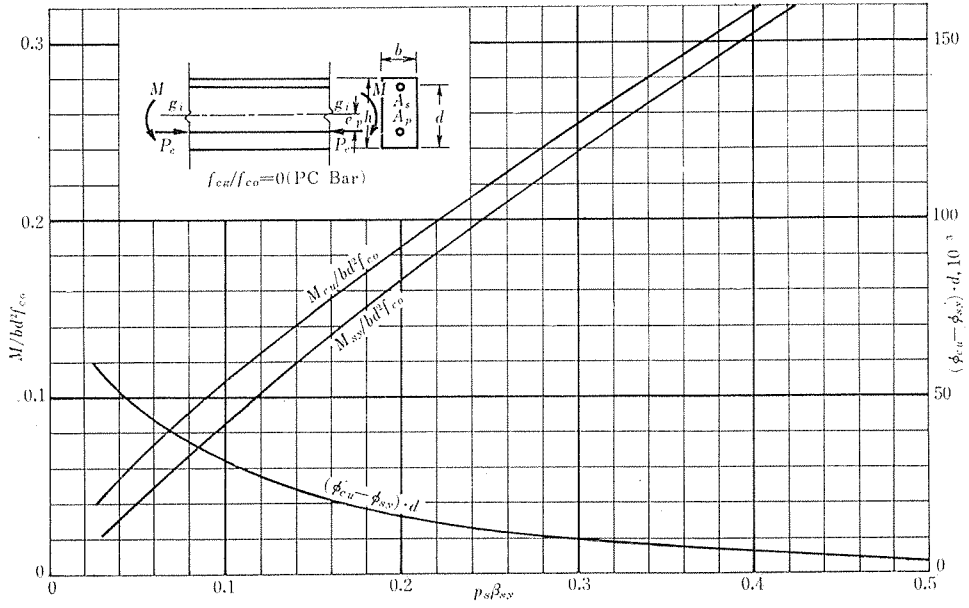


図-5

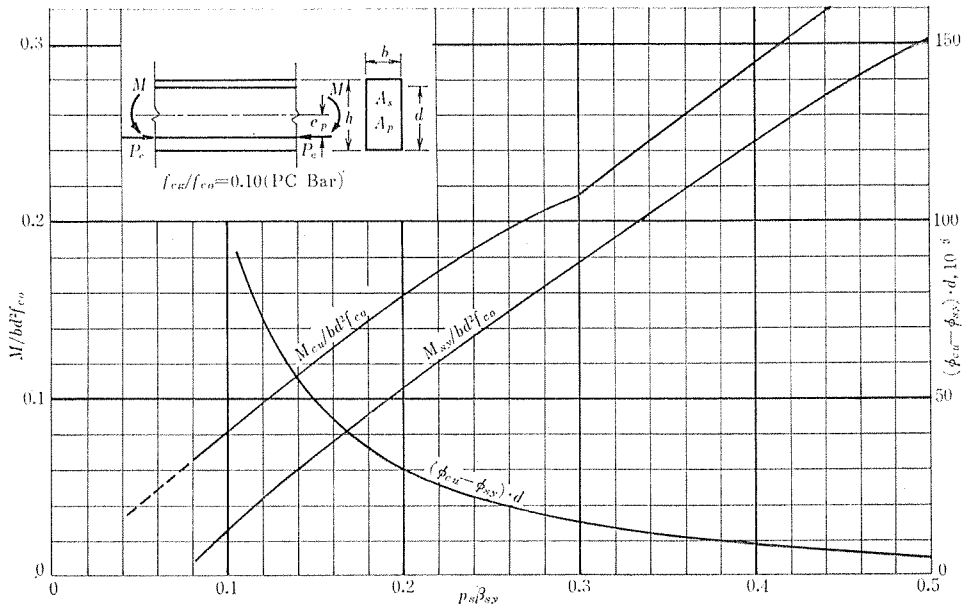


図-6

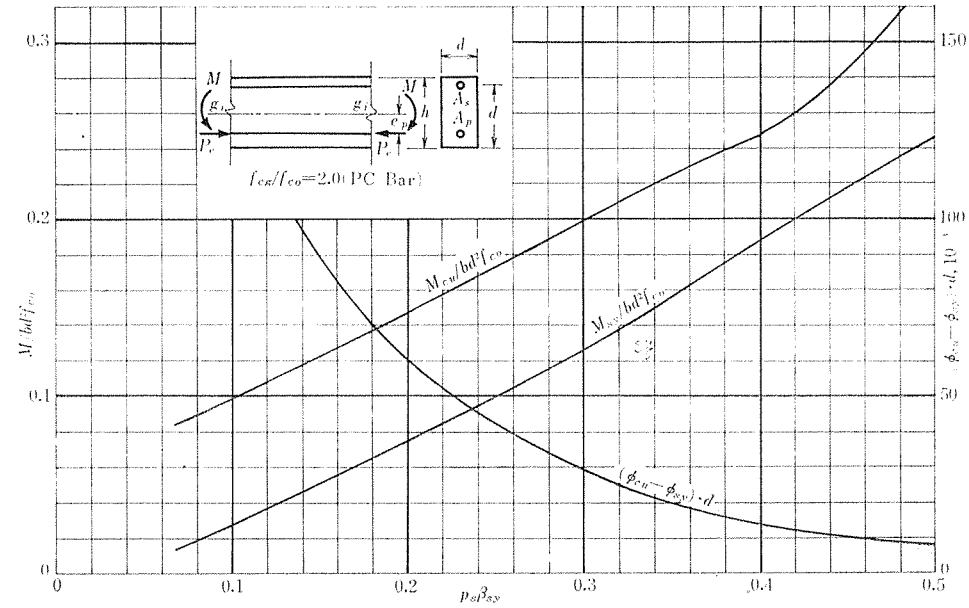
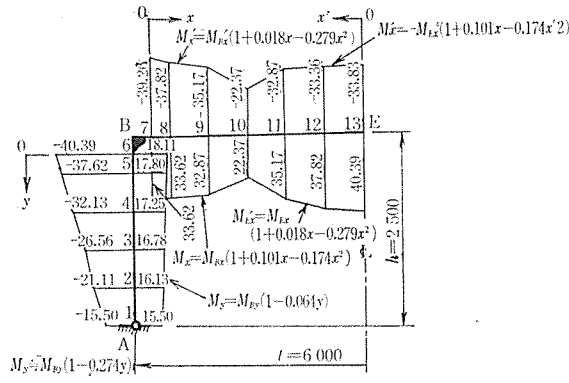
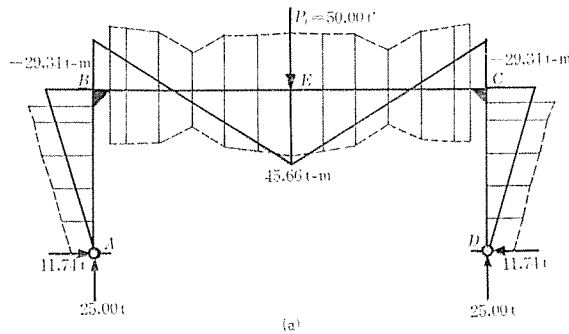
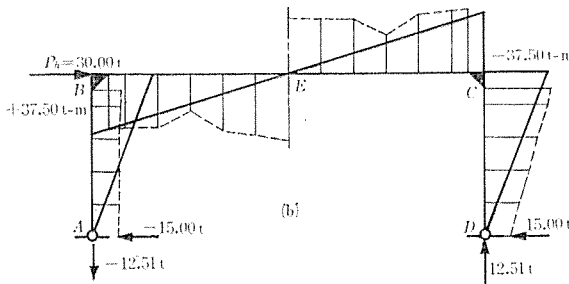
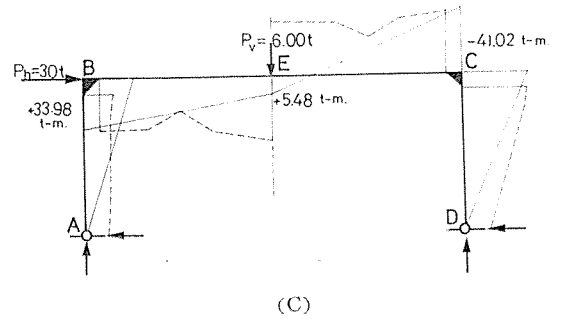
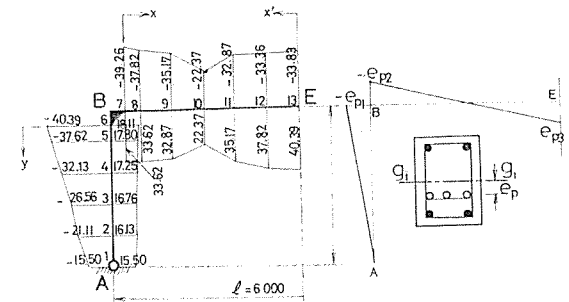


図-7



図—8 抵抗曲げモーメント

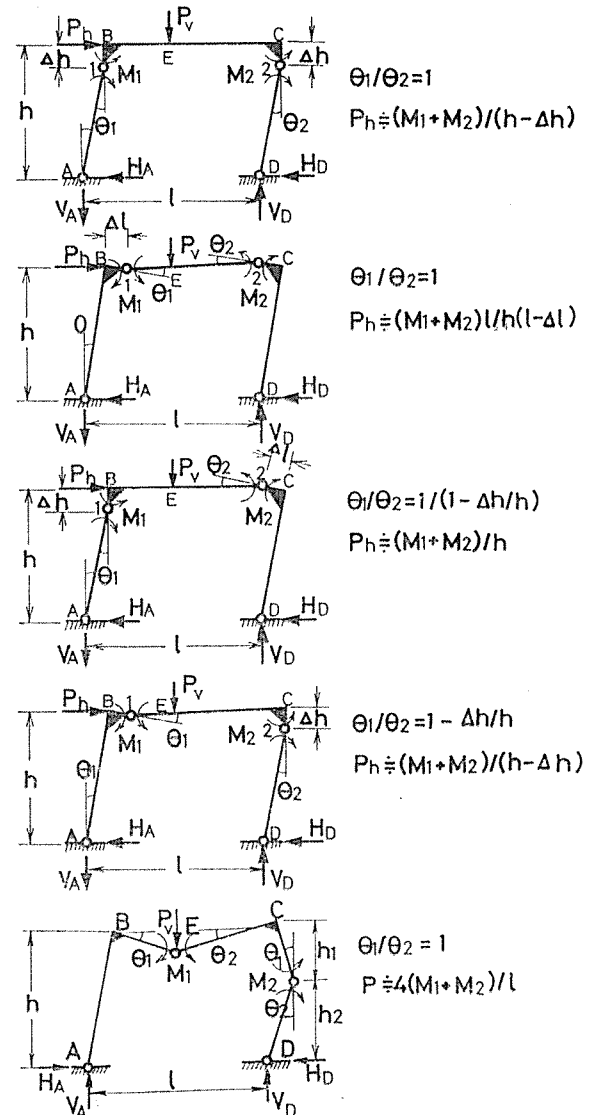


図—9

とった場合の曲げモーメント図である。この場合、鉛直荷重作用点Eの近くに最初のプラスチックヒンジができ、次にはりの両端または柱の柱部のいずれの部分かにプラスチックヒンジが形成されて崩壊する可能性がある。

図—9 (b) は剛節点 B または C に水平荷重が作用したときの弾性理論による曲げモーメントと抵抗曲げモーメントとの比較である。水平荷重の大きさは剛節点 B に近い柱の頂部の正の抵抗曲げモーメントがほぼ限界値になるように  $P_{hB} = 30 \text{ t}$  にとった。この場合は剛節点 B に近い部分に最初のプラスチックヒンジができ、次に剛節点 C に近い部分にプラスチックヒンジができて崩壊する可能性がある。

図—9 (c) は鉛直荷重  $P_V = 6 \text{ t}$ 、水平荷重  $P_h = 30 \text{ t}$ 、が作用したときの弾性理論による曲げモーメントと抵抗曲げモーメントとの比較である。この場合、剛節点 B に近いはりの端部に最初のプラスチックヒンジを生じ、節点 B に近いはりの端部または柱の頂部に第 2 のプラスチ



図—10

プレストレスト コンクリートの諸分野における現況と展望

ックヒンジを形成して崩壊する可能性がある。

このような弾性理論による断面力の分布と抵抗曲げモーメントとの関係からプラスチックヒンジの形成位置を推定する方法は、軸方向力やせん断力の影響、ひびわれ発生による部分的曲げ剛度の低下に原因する部材力の再分布、荷重の組合せなどによって変動がおこる欠点がある。この点を考慮してプラスチックヒンジの幾つかの組合せを想定する必要がある。

以上の諸点を考えてプラスチックヒンジの形成位置の組合せの中、実際に問題になるのは 図-10 の場合である。2 種以上の組合せ荷重が作用する場合は、一定荷重と変動荷重とを区別して終極破壊荷重を求めるのが便利である。図-10 の (a)~(d) は鉛直荷重を一定とし水平破壊荷重を求めるものである。図-10 (e) は鉛直破壊荷重を求めることを目的としている。これらのプラスチックヒンジの想定によって、部材力によるヒンジの抵抗曲げモーメントの修正ができる。

4. ひびわれの発達と破壊の状態

実験した 2 ヒンジ PC ラーメンは高さ 2.50 m、スパン 6.00 m で、断面寸法、PC 鋼材および鉄筋の配置は 図-11, 12 のとおりである。PC 鋼棒はウルボンで、はりに 3φ20、柱に 2φ24 を用い、緊張力は柱で 62.4 t、はりで 65.6 t である。コンクリートの品質は材令 14 日で圧縮強度 400 kg/cm<sup>2</sup> を目標とした。なお鉄筋は主鉄筋として D 25 (SD 30) を、スタラップとして D 10 (SD 30) を用いて、PC 鋼材の定着部には鉄筋を配置して補強した。

図-13~18 はひびわれの発達状況を示したものである。スパン中央に作用した鉛直荷重によるひびわれは点線で、剛節点 B に作用する水平荷重によるひびわれは実線で、節点 C に作用する水平荷重によるひびわれは破線で示した。ひびわれに沿って記入してある数字は荷重 (t) である。

図-13 は剛節点 B, C に交互に水平荷重  $P_{hB}, P_{hC}$  を 6.0 t まで載荷した後に、鉛直荷重を漸増しながら載荷した場合のひびわれの発達状態を示したものである。きわめて小さい水平荷重でラーメン内側にひびわれが発生し、特に柱の頂部のハンチ下に発達しやすい。鉛直荷重によって載荷点の近傍に正の曲げモーメントによるひびわれが、柱の頂部に負の曲げモーメントによるひびわれが発生する。このひびわれが発達して載荷点近傍にま

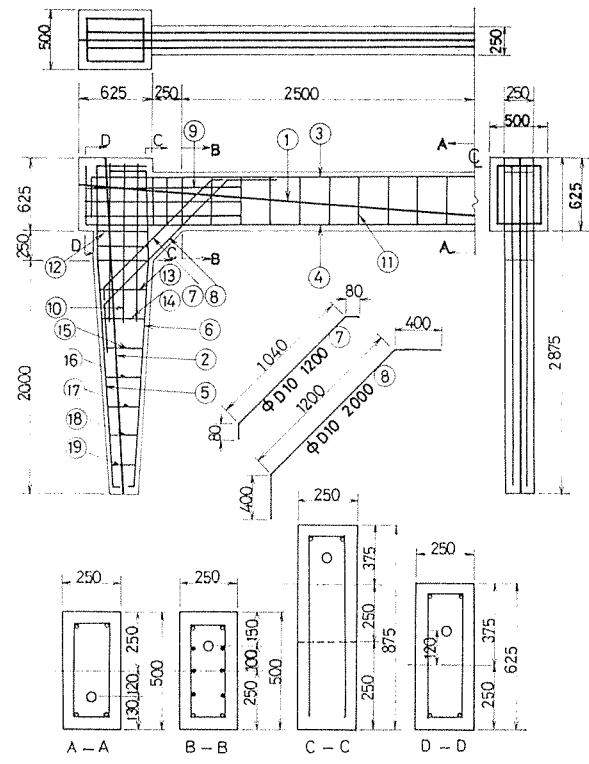


図-11

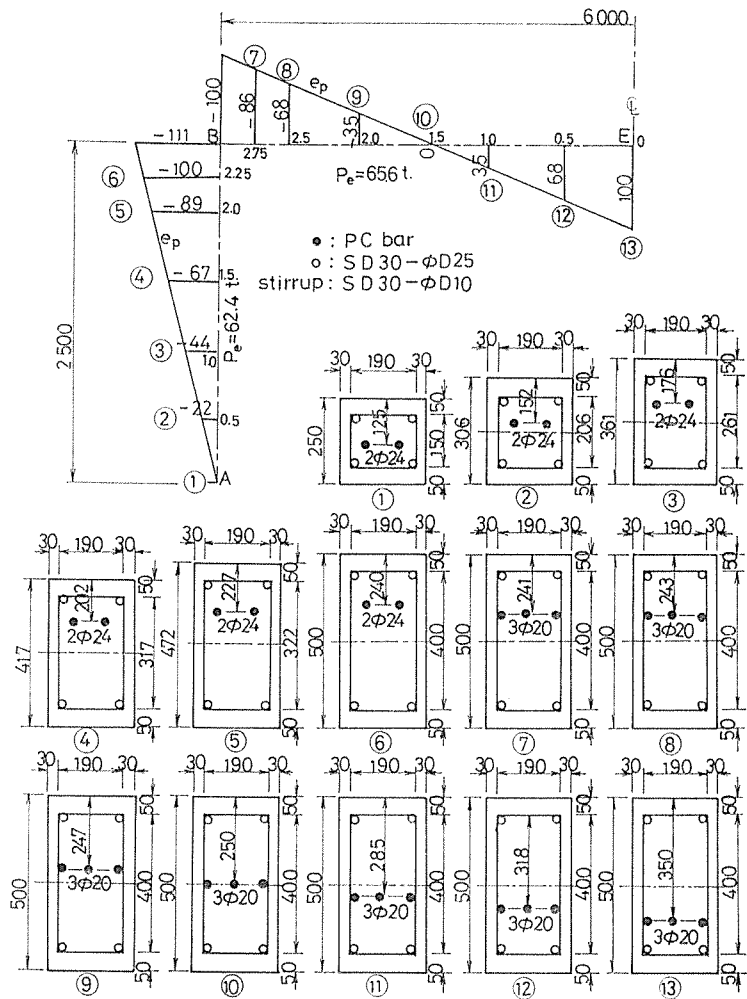


図-12

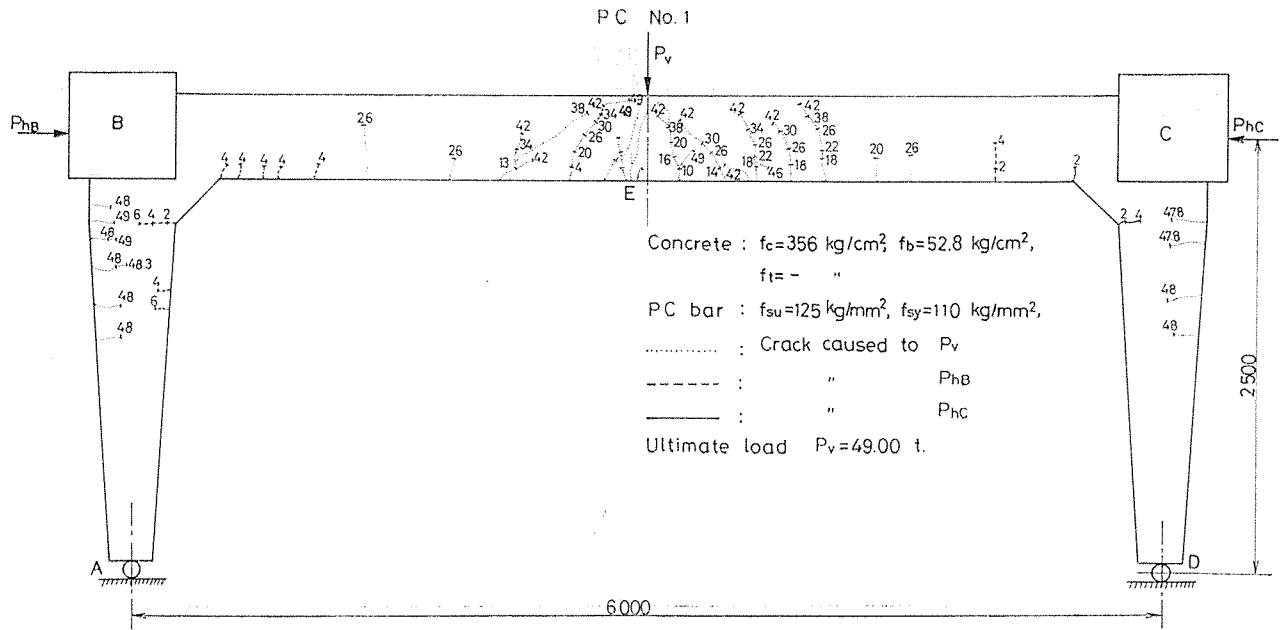


図-13

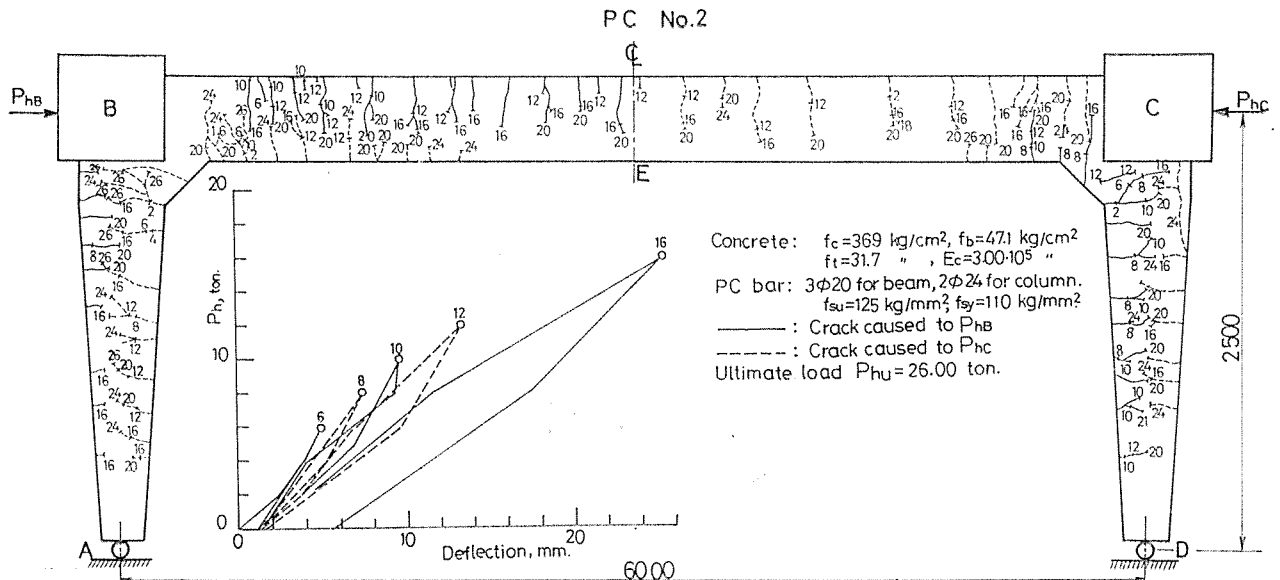


図-14

ザプラスチックヒンジを形成し、次に剛節点Bに近い柱の頂部の正負のひびわれが接近してプラスチックヒンジを形成する。さらに変形を増大すれば支承ヒンジA近傍にひびわれが発生したが、これは2次的なひびわれで、このときはすでにE断面、剛節点Bに近い断面にプラスチックヒンジが形成された後で、崩壊状態に到達した後であった。

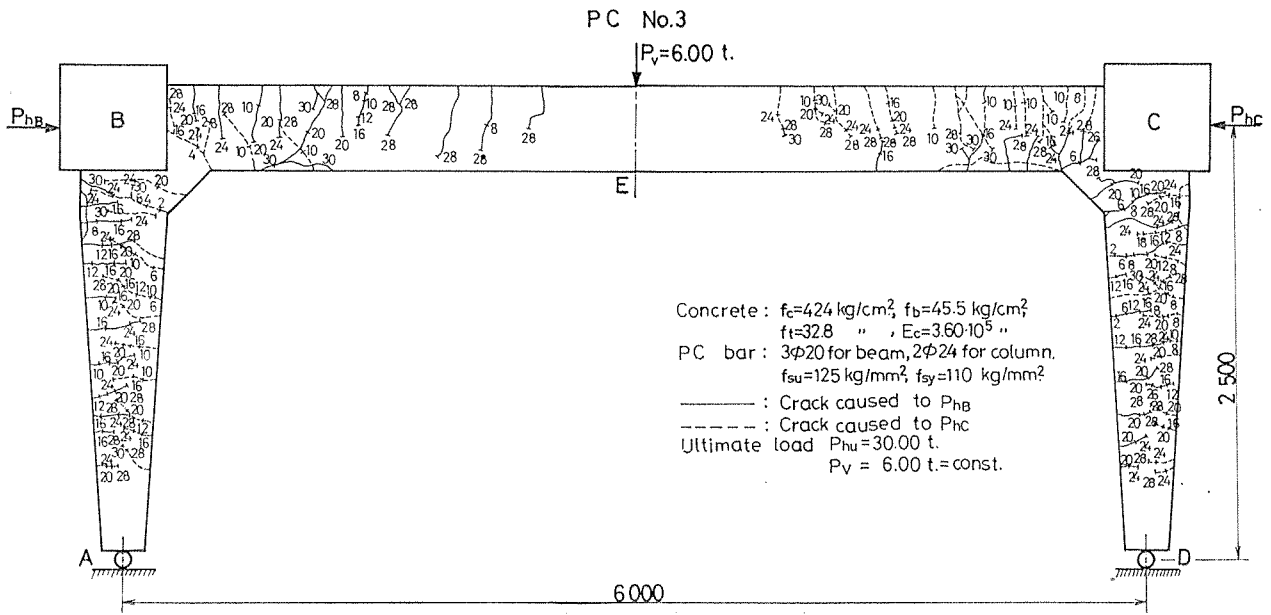
図-14は剛節点B、Cに交互に水平荷重を漸増しながら載荷したときのひびわれの発達状況を示したものである。ひびわれははりの両端と柱に発生するが、柱のほとんど全部分にわたって発達する点に特徴がある。柱の頂部に近い領域の正負のひびわれは相互に連結し、プラスチックヒンジがどの部分に形成されてもよいほどである。

るが、最も弱点となるのは、ひびわれが集中して発生する柱の頂部とはりの両端である。降伏域は曲げモーメントの大きい断面から小さい断面に向かって広がっていく。柱のひびわれは鉛直荷重が大きいほど密に発生する傾向がある。

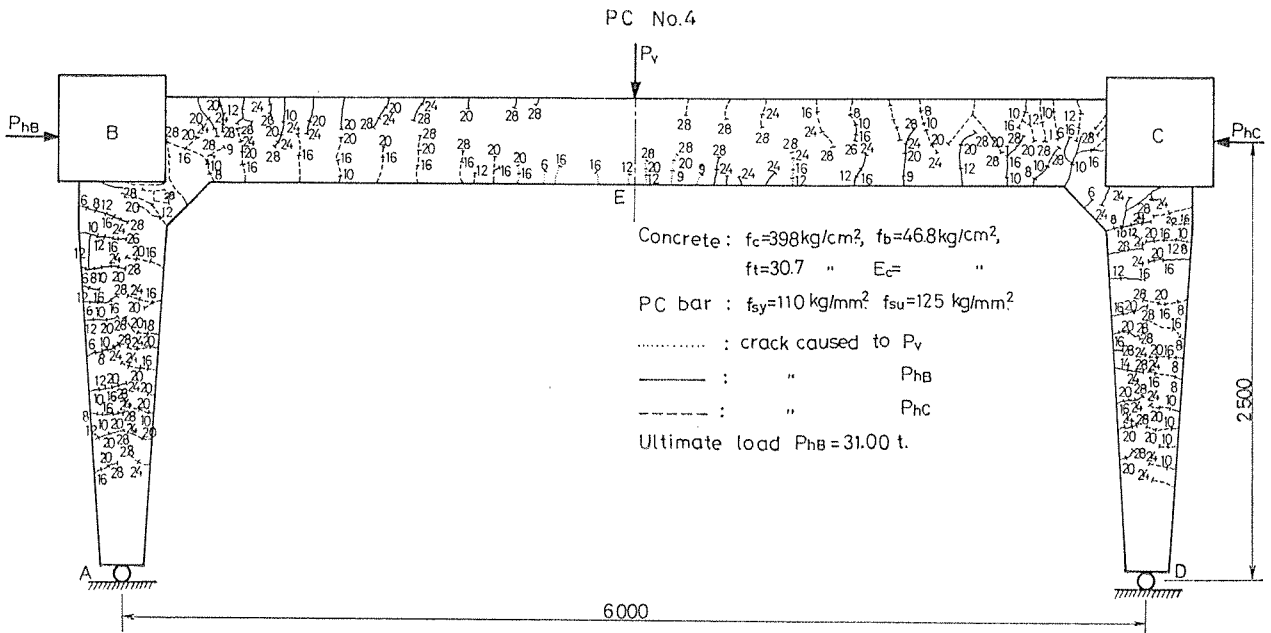
図-15~18は鉛直荷重を一定に保持し、水平荷重を左右交互に漸増載荷した場合のひびわれの発達状況である。鉛直荷重が大きいほど柱に発生するひびわれ数が多くなり、柱の頂部とはりの両端にひびわれが集中する。

プラスチックヒンジの形成位置はハンチ部分をさけて発生している。ハンチ部分の補強が十分で、ハンチの大きさが適切であれば、ほぼハンチ端断面に近い位置にプラスチックヒンジを生ずると考えてよい。本実験のよう





図—15



図—16

な載荷条件の場合の隅角部近傍のプラスチックヒンジの形成位置は、剛節点の軸線から次の距離だけ離れた断面と推定できる。

$$\Delta h \text{ or } \Delta l \doteq (h_0/2 + b_s) \sim (h_0 + b_s) \dots \dots \dots (9)$$

ここで

$\Delta h$  or  $\Delta l$  : 剛節点軸線からプラスチックヒンジ形成断面までの距離 (図—10 参照)

$h_0$  : 断面の全高さ

$b_s$  : ハンチの高さまたは長さ

はりのスパン中央付近に集中荷重が載荷される場合は載荷点近傍の抵抗曲げモーメントから推定して差異はない。

### 5. 構造物の終極破壊荷重の計算方法

構造物の降伏荷重と破壊荷重の区別は部材の場合ほど明確ではない。したがって、構造物の終極破壊荷重は部材の降伏荷重と破壊荷重との間にあると考えるのが常識かも知れないが、部材の立場からは破壊荷重に近いものと推察できる。

プラスチックヒンジの形成位置が推定できれば、以下に述べる方法で構造物の終極破壊荷重を計算できる。この計算方法は試算方法であり、部材軸力の影響を考慮する方法であるが、一回の計算で大略の値を求めることができる。

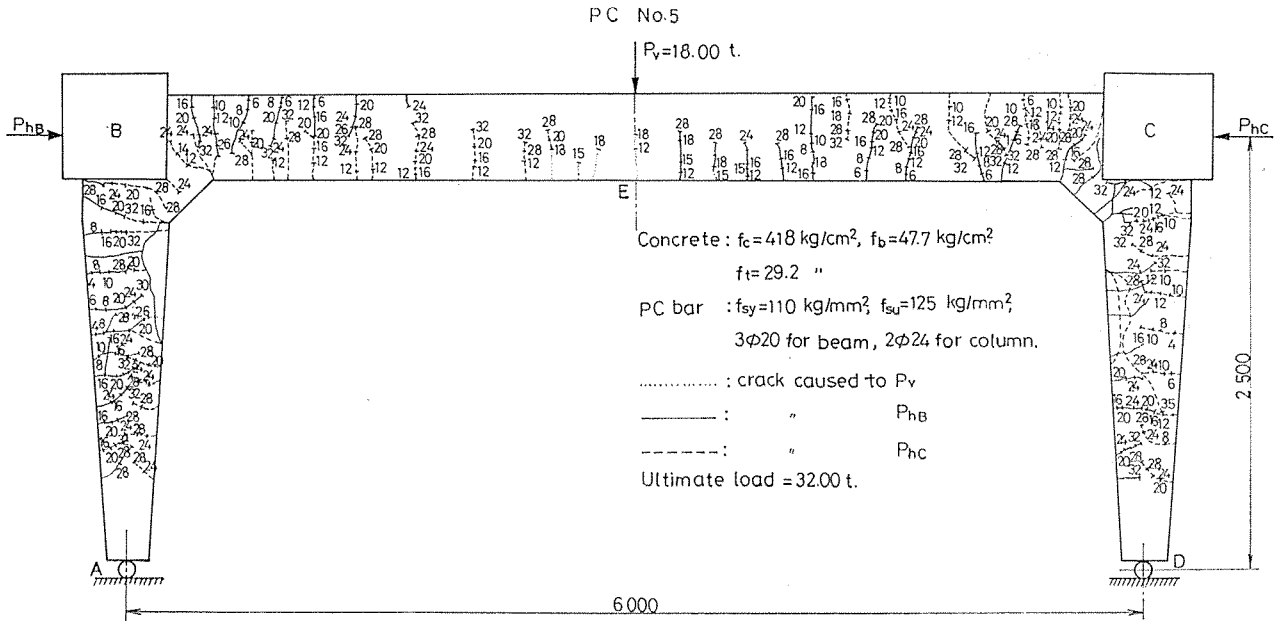


図-17

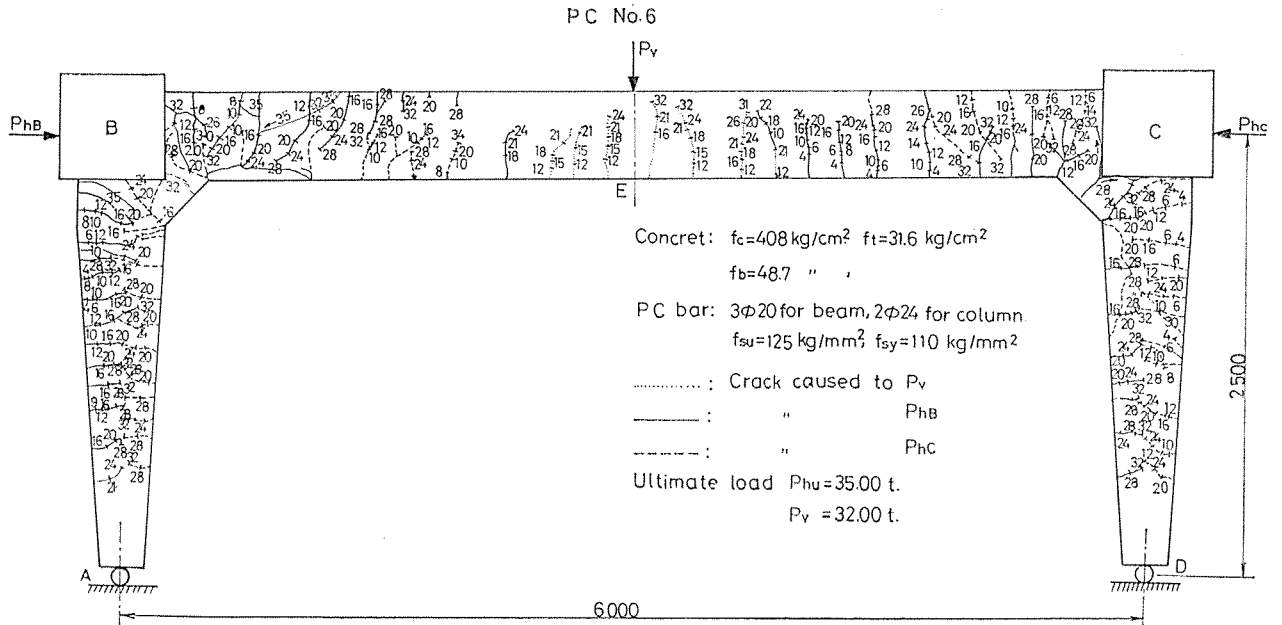


図-18

1) プラスチックヒンジ形成断面の降伏曲げモーメントまたは破壊曲げモーメントを計算する。同時に曲率または回転角を求め、曲率比または回転角比を検査する。ここで 図-3~7 を用いると便利である。

2) 破壊荷重と部材の断面力を計算する。破壊荷重の計算式は 図-10 のプラスチックヒンジの組合せに応じて次の式を用いる。

図-10 (a) の場合; ( $P_V$  の作用点はスパン中央点)

$$\left. \begin{aligned} P_V &= \text{一定値} \\ P_{hu} &\doteq (M_1 + M_2) / (h - \Delta h) \\ V_A &= -(M_1 + M_2)h / l(h - \Delta h) + P_V / 2 \\ V_D &= (M_1 + M_2)h / l(h - \Delta h) + P_V / 2 \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

$$H_A = M_1 / (h - \Delta h)$$

$$H_D = M_2 / (h - \Delta h)$$

図-10 (b) の場合; ( $P_V$  の作用点はスパン中央点)

$$P_V = \text{一定値}$$

$$P_{hu} = (M_1 + M_2) / l(h - \Delta h)$$

$$V_A = -(M_1 + M_2) / (l - \Delta l) + P_V / 2$$

$$V_D = (M_1 + M_2) / (l - \Delta l) + P_V / 2$$

$$H_A = M_2 / h + \{-P_V / 2 + (M_1 + M_2) /$$

$$(l - \Delta l)\} \Delta l / h \doteq M_2 / h$$

$$H_D = M_2 / h + \{P_V / 2 + (M_1 + M_2) /$$

$$(l - \Delta l)\} \Delta l / h \doteq M_2 / h$$

... (11)

図-10 (c) の場合; ( $P_V$  の作用点はスパン中央点)

$$\left. \begin{aligned} P_V &= \text{一定値} \\ P_{hu} &= M_1(h-dh) + M_2/h \\ &\quad - P_V \cdot l \cdot d / 2 h (l-dl) \\ &\quad \doteq M_1/(h-dh) + M_2/h \\ V_A &= P_V/2 - \{M_1/(h-dh) + M_2/h\} h/l \\ V_D &= P_V/2 + \{M_1/(h-dh) + M_2/h\} h/l \\ H_A &\doteq M_1/(h-dh) \\ H_D &\doteq M_2/h \end{aligned} \right\} \dots(12)$$

図-10 (d) の場合; ( $P_V$  の作用点はスパン中央点)

$$\left. \begin{aligned} P_V &= \text{一定値} \\ P_{hu} &= M_1/h + M_2/(h-dh) \\ &\quad - P_V \cdot l \cdot d / 2 h (l-dl) \\ &\quad \doteq M_1/h + M_2/h(-dh) \\ V_A &= P_V/2 - \{M_1/h + M_2/(h-dh)\} h/l \\ V_D &= P_V/2 + \{M_1/h + M_2/(h-dh)\} h/l \\ H_A &\doteq M_1/h \\ H_D &\doteq M_2/(h-dh) \end{aligned} \right\} \dots(13)$$

図-10 (e) の場合; ( $P_V$  の作用点はスパン中央点)

$$\left. \begin{aligned} P_h &= 0 \\ P_{Vu} &= 4(M_1 + M_2)/l \\ V_A &= 2(M_1 + M_2)/l \\ V_D &= 2(M_1 + M_2)/l \\ H_A &= M_2/h_2 \\ H_D &= M_2/h_2 \end{aligned} \right\} \dots(14)$$

式 (12), (13) の鉛直荷重の係数  $C = l \cdot d / 2 h (l-dl)$  は一般に小さい値であるが、ラーメンの形状寸法、プラスチックヒンジの形成位置によっては無視できない。係数  $C$  の値を表-1 に示したので参考にするといよい。

3) 断面力の影響：最初の破壊荷重，軸方向力，せん断力の計算結果をもとにして，軸方向力とせん断力の大きさを計算する。

表-1 係数  $C$  の値

$d/l$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
$h/l$	0.1	0	0.5556	1.2500	2.1429	3.3334	5.0000
	0.2	0	0.2778	0.6250	1.0715	1.6667	2.5000
	0.3	0	0.1852	0.4167	0.7143	1.1111	1.6667
	0.4	0	0.1389	0.3125	0.5357	0.8334	1.2500
	0.5	0	0.1111	0.2500	0.4286	0.6667	1.0000
	0.6	0	0.0926	0.2084	0.3571	0.5556	0.8334
	0.7	0	0.0794	0.1786	0.3061	0.4762	0.7143
	0.8	0	0.0695	0.1563	0.2679	0.4167	0.6250
	0.9	0	0.0618	0.1389	0.2381	0.3704	0.5556
	1.0	0	0.0555	0.1250	0.2143	0.3333	0.5000
	2.0	0	0.0278	0.0625	0.1071	0.1667	0.2500
3.0	0	0.0185	0.0417	0.0714	0.1111	0.1667	
4.0	0	0.0139	0.0313	0.0536	0.0833	0.1250	
5.0	0	0.0111	0.0250	0.0429	0.0667	0.1000	

$$\left. \begin{aligned} f_{cN} &= \pm N/A_c \\ \tau_c &= S/A_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

せん断応力度  $\tau_c$  が大きい場合はスターラップで補強する。軸方向引張応力度，軸方向圧縮応力度が大きい場合は，この影響を考慮して， $(f_{cg} \pm f_{cN})$  の軸方向応力度が作用するときの降伏曲げモーメントまたは破壊曲げモーメントの修正値を求める。同時に曲率または回転角の修正値も計算し，両者の比を求める。

4) 修正した降伏曲げモーメントまたは破壊曲げモーメントを用いて破壊荷重を計算する。同時に断面力も計算する。2) で求めた断面力と比較して，計算仮定の妥当性を検査する。

5) 計算仮定が妥当でなければ以上の計算を繰り返すか，プラスチックヒンジの形成位置を推定しなおして，以上の計算を行う。

この破壊荷重の計算はプラスチックヒンジの位置が正しいことが前提となっているので，プラスチックヒンジのいくつかの組合せがあれば，それぞれの組合せについて計算する必要がある。

一般に組合せ荷重が作用するが，静荷重は一定荷重とし，作用方向の異なる2種以上の動荷重が作用する場合は，一方向の荷重を除き他は一定値とするか，荷重比をきめておき，破壊荷重を計算する。

数値計算は次のようにして行う。スパン中央に鉛直荷重が作用する場合を例にとれば，図-10 (e)，式 (14) を用いて終極破壊荷重を計算する。抵抗曲げモーメントは図-8，式 (7), (8) の値を基本にする。プラスチックヒンジはスパン中央断面と柱の頂部に形成される。プラスチックヒンジの抵抗曲げモーメント  $M_1, M_2$  は次のとおりである。

$$\begin{aligned} M_1 &= M_E = 40.39 \text{ t}\cdot\text{m}, \\ M_2 &= M_B(1-0.274y) = 40.39(1-0.274\cdot y), \text{ t}\cdot\text{m} \\ P_{Vu} &= 4(M_1 + M_2)/l \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 4\{40.39 + 40.39(1-0.274y)\}/6.00 \\ &= 26.93(2-0.274y), \text{ t}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

$$V_A = V_D = 13.46(2-0.274y), \text{ t}$$

$$H_A = H_D = 16.16(1-0.274y), \text{ t}$$

$$\begin{aligned} M_2 &\doteq 0.194 bd^2 f_{c0} + A_s \cdot f_{sy} \cdot d \\ &= 0.194 \times 25 \times 35^2 \times 356 + 10.14 \times 3200 \times 45.0 \\ &= 35.75 \text{ t}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

$$M_1 = M_E = 40.39 \text{ t}\cdot\text{m},$$

$$\begin{aligned} P_{Vu} &= 4(M_1 + M_2)l = 4(35.75 + 40.39)/6.00 \\ &= 50.76 \text{ t}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

測定値は水平荷重  $P_H = 6.00 \text{ t}$  を剛節点 B, C に交互に作用し，ひびわれを発生させた後にスパン中央に鉛直荷重を作用したもので，鉛直破壊荷重は  $P_{Vu} = 49.00 \text{ t}$

y, m	0	0.25	0.75	1.25	1.75	Note
$P_{Vu}$ , t	53.85	53.11	48.32	44.63	40.94	回転能力は十分である 係数から $y=0$ , すなわち柱の頂部にプラスチックヒンジが形成される
$V_A=V_D$ , t ( $f_{cN}=V/A_c$ , kg/cm <sup>2</sup> )	26.93 (21.5)	26.56 (21.2)	24.16 (23.2)	22.32 (24.7)	20.47 (26.8)	
$H_A=H_D$ , t ( $\tau_c=H/A_c$ , kg/cm <sup>2</sup> )	16.16 (12.9)	15.05 (12.8)	12.84 (12.3)	10.63 (11.8)	8.41 (11.0)	
$f_{cg}$ , kg/cm <sup>2</sup>	49.9	52.9	59.9	69.1	81.6	
( $f_{cg}+f_{cN}$ ), kg/cm <sup>2</sup>	71.4	74.1	83.2	93.8	108.4	
( $f_{cg}+f_{cN}$ )/ $f_{tu}$	2.38	2.47	2.77	3.13	3.61	
$p_p$	0.0093	0.0106	0.0118	0.0144	0.0184	
$p_s$	0.0090	0.0096	0.0112	0.0130	0.0158	
$p_p\beta_{py}$	0.287	0.328	0.365	0.445	0.057	
$p_s\beta_{sy}$	0.081	0.086	0.101	0.117	0.142	

表-2 終極破壊荷重と計算値との比較

No.	コンクリートの強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			荷重条件		破壊荷重計算値
	$f_c$	$f_t$	$f_l$	$P_{V,t}$	$P_{h,t}$	t
1	356	52.8	—	49.00	6.00 (除荷)	$P_{Vu}=51.49$
2	369	47.1	31.7	0	26.00	$P_{hu}=24.25$
3	424	45.5	32.8	6.00 (一定値)	30.00	$P_{hu}=29.54$
4	398	46.8	30.7	12.00 (一定値)	31.00	$P_{hu}=32.28$
5	418	47.7	29.2	24.00 (一定値)	32.00	$P_{hu}=27.08$
6	408	48.7	31.6	32.00 (一定値)	35.00	$P_{hu}=27.67$

であった。測定値は計算値の 97% である。近似計算の結果と測定値との比較を表-2 に示した。

### 6. 変形回復

図-19 は鉛直荷重  $P_V=6.00$  t (一定値) を作用した状態で、剛節点 B, C に交互に水平荷重  $P_h$  を漸増しながら載荷したときの、剛節点 B の水平変位図である。柱の頂部近傍には、非常に小さい水平荷重でひびわれを生ずるが、これは正の曲げモーメントによるひびわれで、ひびわれ発生時の水平変位の約 1/3 が残留たわみになっている。

さらに荷重を増すと、一般に、荷重増加の場合は直線性があるが、荷重減少の場合は履歴を描き、曲線になる。

変形回復は破壊荷重の約 60% の荷重で残留たわみは約 15%、破壊荷重の約 77% の荷重で残留たわみは約 15% であって、かなり良好である。この性状は柱頂部の正負のひびわれが連結した後も現われており、P C 鋼材とともに普通鉄筋が変形回復に有効であることを示唆している。

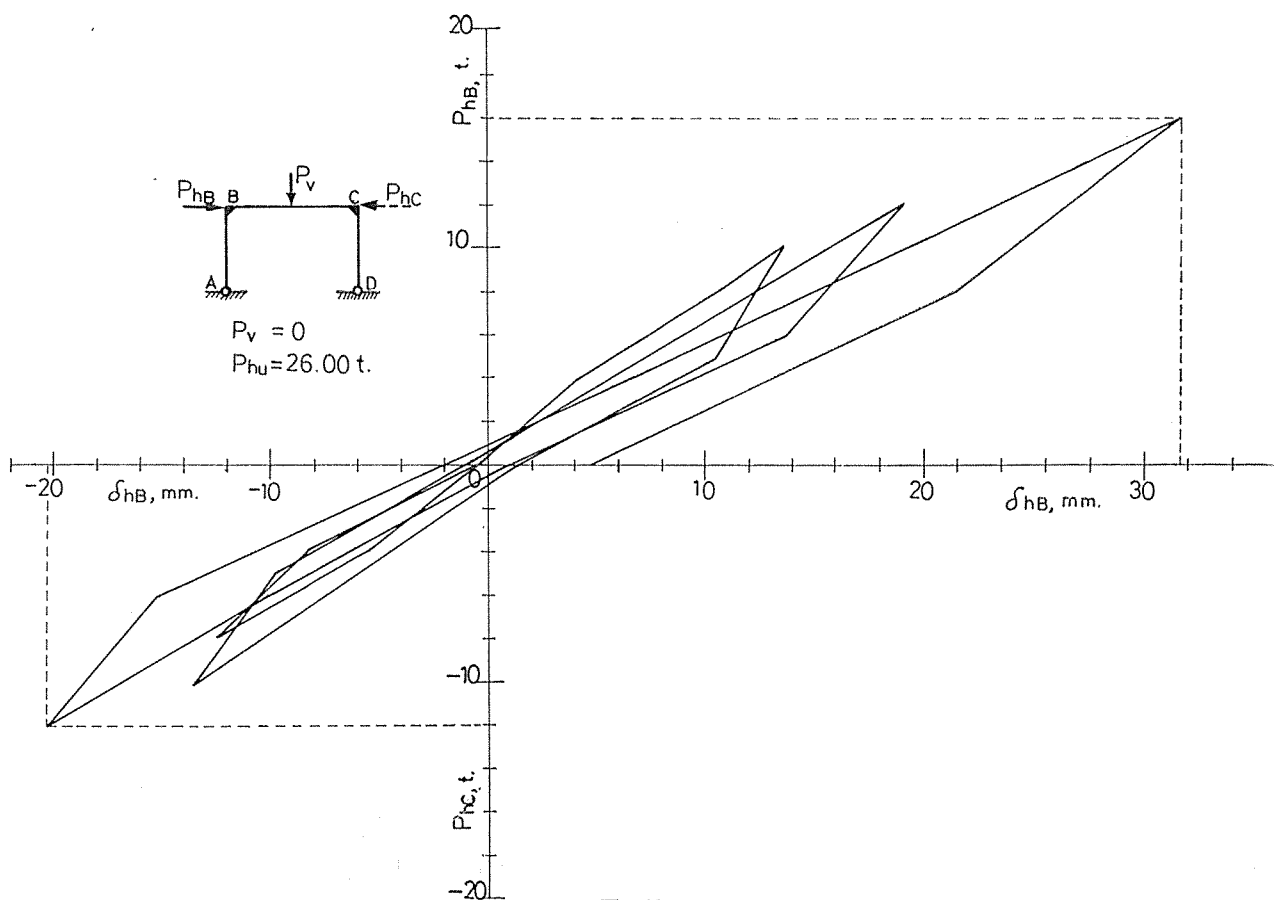


図-19

## 7. む す び

プレストレスト コンクリート不静定構造物の終極破壊荷重の計算方法には、荷重の大きさと作用方向、部材の抵抗曲げモーメントと変形能力、この両者の相関関係でできるプラスチックヒンジの形成位置の推定、部材力の再分布、軸方向力やせん断力の影響、PC鋼材以外の鉄筋の効果など多くの不明確な問題がある。ここで2ヒンジPCラーメンの終極破壊荷重の理論計算と実験を試みた理由は、低次不静定PC構造物から解析の手がかりを得るためである。その結果、低次不静定構造物であっても、コンクリート構造物の特徴がきわめて顕著に現われ、コンクリートという材料の特性を的確に生かす補強方法、終極破壊荷重の計算方法の確立が痛感された。その重要な点を要約すれば次のとおりである。

1) 2ヒンジPCラーメンの剛節点に水平荷重が作用すると、きわめて小さい荷重で柱の頂部の内側にひびわれを発生する。水平荷重を剛節点に交互に漸増しながら載荷すると、柱の頂部とはりの両端に生じた正負のひびわれが連結してプラスチックヒンジを形成する。プラスチックヒンジ形成後はPC鋼材と反対側に配置した鉄筋が有効に働くようになる。鉄筋の効果は強度のみではなく、ひびわれ幅の制御による曲げ剛度の低下防止、変形回復の点できわめて有効であることが確かめられた。これらの点からパーシャルプレストレッグの考え方によるか、これを少し拡張して考え、プレストレスと鉄筋を併用して補強する方法が、水平荷重が作用する場合の終極破壊状態からみて合理的である。

2) 2ヒンジPCラーメンのスパン中央に鉛直荷重を載荷したときは、載荷点とはりの両端または柱の頂部にプラスチックヒンジを形成して崩壊した。この場合の鉄筋の効果は水平荷重の場合ほど顕著ではない。しかし、鉛直荷重と水平荷重とが同時に作用する場合は鉄筋が有効に働く。

3) 剛節点に近い断面にプラスチックヒンジが形成される場合は、軸線から  $d_x$  だけ離れた位置である。 $d_x$  は式(9)で求められる。ハンチの大きさが適切であり、隅角部が十分に補強されていれば、ハンチの端部近傍と考えてよい。

4) プラスチックヒンジの形成長さは実験でも明確にきめることができなかった。鉄筋のひずみ、コンクリートに発達したひびわれの状況からみて、ほぼ桁高さに等しい。斜引張ひびわれを伴う場合は、ほぼ桁高さの2倍に広がる。

5) 2ヒンジPCラーメンの降伏荷重は不明確であったので、破壊荷重を計算値と比較した。計算値は測定値

よりわずかに小さい値であった。

6) ひびわれ発生後の変形回復はきわめて良好であった。水平荷重による変形の回復は破壊荷重の約77%程度まで低荷重と同じ割合で変形回復し、残留変形は約15%であった。

7) 鉄筋の定着が悪いときは支承ヒンジ近傍にひびわれを生ずる。多くの場合、ひびわれは二次的なものであるが、脆性破壊を誘起するので、スターラップと軸鉄筋で十分に補強する必要がある。

高次不静定コンクリート構造物の終極破壊荷重の計算はプラスチックヒンジの形成位置の推定が最初の問題である。安易なプラスチックヒンジ形成位置の仮定による計算の単純化は危険な場合がある。模型実験によってあらかじめプラスチックヒンジ形成位置を調べておくことが、終極破壊荷重の計算の立場からも、設計の立場からも重要である。交番荷重によって正負の応力度を生ずる部分は重要であるから、コンクリートに発達するひびわれの状況に注目する必要がある。模型実験ができない場合は、弾性理論による曲げモーメントその他の断面力の分布と、抵抗曲げモーメントの分布とを比較して、プラスチックヒンジの形成位置を推定するのがよい。

設計荷重が作用している状態と終極状態とは構造形式が異なるので、脆性破壊をさけるために補助鉄筋を利用すべきである。この意味ではパーシャルプレストレッシングとするのが有利である。また、PC鋼材比、鉄筋比の適切な選択が大切である。

### 記号

$A, B$ : 鋼材の塑性変形を表わす定数

$A_c$ : コンクリートの断面積

$A_p$ : PC鋼材の断面積

$A_s$ : 引張鉄筋の断面積

$A_s'$ : 圧縮鉄筋の断面積

$C_f$ : コンクリートの圧縮側合力に関する係数、最大値  $C_{fu} = 0.80$

$C_m$ : コンクリートの圧縮側合力の中立軸についてのモーメントに関する係数、最大値  $C_{mu} = 0.46$

$H$ : 水平反力

$K$ : 鋼材のひずみ硬化域の応力度と降伏点応力度との比

$M_{sy}$ : 部材の降伏曲げモーメント

$M_{cu}$ : 部材の破壊曲げモーメント

$M$ :  $P_e \cdot e_p$  = プレストレスによる曲げモーメント

$N$ : 部材の軸方向力

$P_e$ : PC鋼材の有効引張力

$P_h$ : 水平荷重

$P_V$  : 鉛直荷重  
 $V$  : 鉛直反力  
 $t$  : 部材断面の幅  
 $d$  : 部材断面の有効高さ  
 $d'$  : 圧縮鉄筋図心から圧縮縁までの距離  
 $e_p$  : P C鋼材の偏心距離  
 $f_{c0}$  : コンクリートの最大応力度  
 $f_{sy}$  : 鉄筋, P C鋼材の降伏点応力度  
 $f_{s0}$  : 高強度または冷間加工鉄筋, P C鋼材などの比例限度の応力度  
 $f_{cg}$  : 平均プレストレス  $= P_e/A_c$   
 $h$  : 断面の高さ, またはラーメン柱材の高さ  
 $l$  : スパン  
 $x, y$  : 座標軸  
 $\rho$  : 鉄筋比または P C鋼材比  
 $\epsilon_c$  : コンクリートの圧縮ひずみ  
 $\epsilon_{c0}$  : 最大応力度に対応するコンクリートの圧縮ひずみ  
 $\epsilon_{cu}$  : コンクリートの圧縮破壊ひずみ  $\cong 1.40 \epsilon_{c0}$   
 $\epsilon_{cu}'$  :  $\epsilon_{cu} - \epsilon_{cg}$   
 $\epsilon_{cg}$  : 平均プレストレスによる圧縮ひずみ  
 $\epsilon_s$  : 鉄筋または P C鋼材のひずみ  
 $\epsilon_{s0}$  : 鉄筋または P C鋼材の比例限度のひずみ  
 $\epsilon_{sy}$  : 鉄筋または P C鋼材の降伏点ひずみ

$\epsilon_{sh}$  : 鉄筋がひずみ硬化を起すひずみ  
 $\phi_{sy}$  : 部材降伏時の断面の曲率  
 $\phi_{cu}$  : 部材破壊時の断面の曲率  
 $\eta$  :  $f_c/f_{c0}$  = 応力度比  
 $\xi$  :  $\epsilon_c/\epsilon_{c0}$  = ひずみ度比,  $\xi_0 = \epsilon_{ce}/\epsilon_{c0}$

参 考 文 献

- 1) 坂 静雄 : 鉄筋コンクリートの研究, 産業図書 KK, 昭和 29.12 (1954)
- 2) Baker, A.L.L. : Concrete Publications, London, 1956, Magazine of Concrete Research, Vol. 11, No. 33, Nov., 1959, England.
- 3) Chan, W.W.L. : Magazine of Concrete Research, Vol. 7, No. 21, Nov., 1955 Magazine of Concrete Research, Vol. 14, No. 41, July, 1962
- 4) L.L. Jones : Chatto and Windus, London, 1962
- 5) Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, Proceedings of International Symposium held in Miami, FLA, ASCE-ACI, 1964
- 6) Milík Tichý, Josef Rákonsík : Kräfteumlagerung in Stahlbetontragwerken, Verlag Technischer Literatur, Prag, 1971
- 7) 神山 一 : 土木学会年次講演概要集 (昭和 46 年度, 1971)  
 " " (昭和 47 年度, 1972)  
 " " (昭和 48 年度, 1973)  
 プレストレストコンクリート, Vol. 14, No. 4, 1972  
 P C技術協会第 13 回研究発表講演概要, 1973

1974.3.7・受付