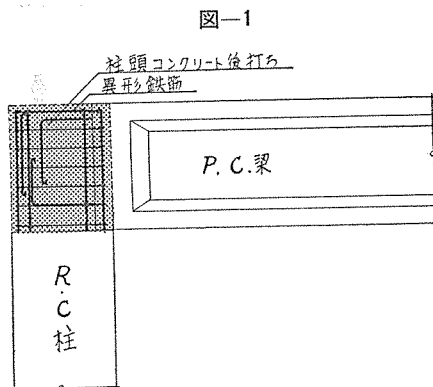


## PC バリを有する□型ラーメンの破壊実験

塚 本 猛 次\*  
 海 上 秀 太 郎\*\*  
 川 村 政 美\*\*\*

### 1. まえがき

筆者等が設計した建物で PC 部材を建築主体工事に使用しているのが 13~14 例あるが、これらの建物の大半は PC 大バリとダブルTスラブを組合わせて屋根を構成したものである。PC 大バリと鉄筋コンクリート柱との結合は、PC 大バリ端より異形鉄筋を出しておき、図-1 に示すように PC 大バリを、ハリ下端で打止めにしてある RC 柱の上に設置し、ダブルTスラブを単純バリとしての PC 大バリに乗せたのちに柱頭部分のコンクリートを打設してラーメンを完成し、以後の増加荷重（防水層および若干の積載荷重等）および地震力に対してはラーメンとして抵抗させるという設計方針で設計してきた。



ここで問題になるのは本誌 Vol. 1, No.3, July 1959 “ダブルTスラブを用いた建物の設計施工について”で述べているように、PC 大バリ端に生ずる長期曲げモーメントを普通の鉄筋コンクリート方式で受持させた点である。PC 大バリの応力、変形状態と鉄筋コンクリート柱の応力、変形状態とが、弾性理論にもとづいたラーメンのモーメントに対してどのような釣合いを保つかということである。この実験を行なう前の設計としては PC 大バリの中央部モーメントに少し余裕を持たせておけばよいという考え方で実施設計を処理してきた。

しかし、この問題を実験的に確かめ、明確な根拠を持

って実施設計に望むため実験を行なうことを考えていた。たまたま昨年上期に住友電気工業KK横浜製作所新築工事の計画にあたり、主体工事に大々的に PC 部材を使用することとなった(本号 12~19 ページ参照)。そして構造設計の考え方が前述の方法と根本的にはほぼ同じである。ただこの建物は防水層に耐久力を持たせるため必然的に重量が重くなったのでラーメンのハリ端長期曲げモーメントが大となり、かつ建物の規模が非常に大きいので、資材のわずかな節約が大きな金額となるために住友電気工業KKの協力を得てこの実験を行なうことにしたものである。本文においてはこの実験の概略と結果の要点を述べることにする。

### 2. 実験計画

実験を行なうのに小型縮小模型によるもの、部分的模型によるもの、または実物の野外試験を行なうのが一般の現状である。縮小模型による実験ではスケールエフェクトの心配があるし、屋外試験ではどうしても加力および測定が荒くなり落ちついた実験ができないうらみがある。この実験では十分にこの種ラーメンの応力、変形状態を調査する目的で、東京大学工学部総合試験所の大型構造物試験室において、実大ラーメンの室内実験を行なうことを計画した。

このラーメンの実験としては鉛直荷重時、水平荷重時の2つが考えられ両方の実験とも行なうことが望ましいが、まず問題になるのが鉛直荷重時の場合であり、水平荷重時の場合は鉛直荷重時の実験を行なうことによって類推しようと考えられるので、今回の実験では鉛直荷重時の場合のみとし供試体は同じもの2個(No. 1, No. 2 ラーメンと呼ぶこととする)を実験することとした。

供試体としては、スパン 10m、柱高 2.5m の□型ラーメンを考え、PC バリは住友電工の現場に使用する 10m の PC バリ鋼製型わくを使用して現場で製作することとし、柱および基礎バリは、それぞれべつべつに工場で作製したものを実験室に運搬し組立てることとした。基礎バリは実験時の供試体の安定性を考えて2本に分け、柱をはさむように配置することとした。

次に試験機の能力が 2000 t であり載荷荷重が小さい

\* 日建設計工務KK 副社長

\*\* ビー・エス・コンクリートKK 取締役技師長

\*\*\* 工博 日建設計工務KK

と誤差が大となるためにラーメンの破壊荷重は 100 t 以上を目標として荷重は PC バリのほぼ 3 分点に 2 点集中荷重を加えることとした。

PC バリの緊張材およびハリ端の鉄筋配置は、まず緊張材としてはストレスの導入をできるだけ明確にするため鋼棒を使用し、かつ直線配置とする。そしてハリ端部の引張鉄筋部分にはあまり圧縮応力や引張応力が生じないようにハリ端上縁の合成応力度が 0 に近くなるようにすることとした。またハリ端部鉄筋は弾性理論によるラーメンのモーメント図をもととして PC バリ中央部

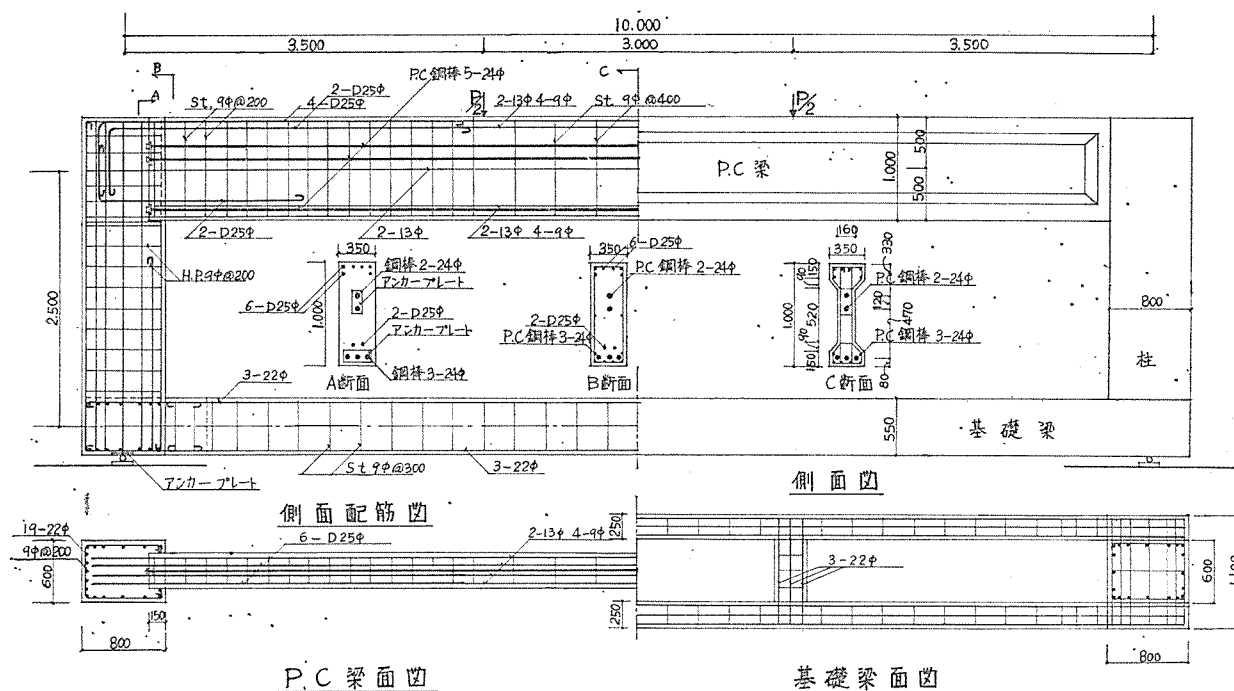
にきれつが発生するときにはほぼ鉄筋の降伏点に近くなるように配置することとした（きれつ発生時に鉄筋応力度が長期設計応力  $1600 \text{ kg/cm}^2$  になるごとく配置を考えたのであるが鉄筋本数が多くなりすぎるので、このようにきめている。

### 3. 供試体

#### (1) 供試体形状

供試体寸法および断面、配筋、形状を 図-2 に示す。

図-2 供試体



#### (2) 材料の性質

供試体に使用した材料の性質を以下に示す。

a) コンクリート セメントはアサノ ベロセメント

	PC バリ	柱	基礎バリ	柱 頭 部
調 合 (重量比)	1 : 1.88 : 2.88	1 : 3 : 6	1 : 3 : 6	1 : 2.13 : 2.98
スランブ (cm)	5	6	6	19
水セメント比 (%)	40	40	40	54
ヤング係数 ( $10^5 \text{ kg/cm}^2$ )	3.25	2.55	2.80	—
圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	430	267	307	No. 1 224 No. 2 283
材 令 (日)	35	72	72	No. 1 8 No. 2 14

b) 鋼棒 住友電気工業KK製 24 mm 鋼棒を使用  
引張強度 48.9 t/本 ( $11300 \text{ kg/cm}^2$ )  
降伏点 44.4 t/本 ( $10200 \text{ kg/cm}^2$ )

c) 鉄筋 主筋は異形鉄筋を使用  
引張強度  $4700 \text{ kg/cm}^2$   
降伏点  $3200 \text{ kg/cm}^2$

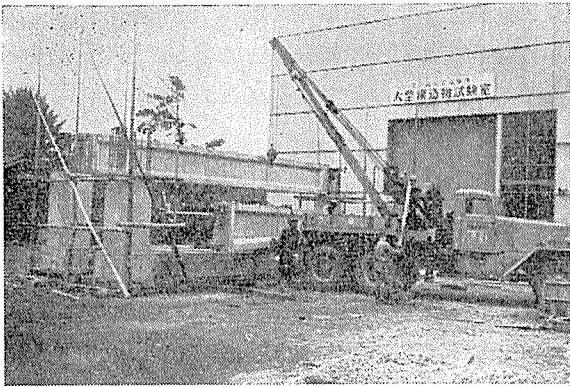
のび 27.4%

d) グラウト配合 グラウト液 100 l あたり  
セメント 96 kg, フライ アッシュ 32 kg  
ポゾリス液 1.6 l, アルミ粉末 19 g  
水 52 l

#### (3) 供試体の製作、組立

供試体は 2. 実験計画 で述べたように、PC バリは大船の工事現場で鋼製型わくを使用して製作、コンクリート打設後 4 日で予備緊張を行なっている（予備緊張力 23 t/本）。また柱および基礎バリはピー・エス・コンクリート KK 鴨宮工場で木製型わくを使用して製作。いずれも大船および鴨宮から 10 t 積トラックで東京大学まで運搬している。ラーメンの組立は実験室前の広場でレッカーを使用して行なった。ラーメン組立前に PC バリの鋼棒の再緊張（緊張力 20.5 t/本、有効 20 t/本と考えている）を行なってからグラウティングを行ない、また節点部分の異形鉄筋に W.S.G. を貼布し養生を行なっ

写真-1 ラーメンの組立

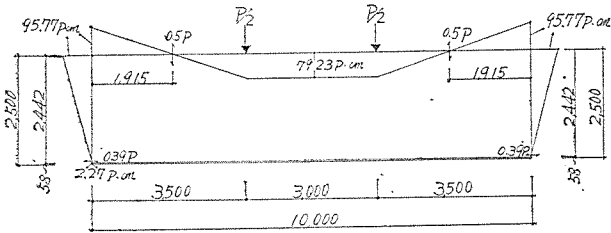


ている。柱頭部は生コンクリートを打設し、実験室への供試体搬入は柱頭コンクリート打設後5日および11日で慎重にコロとトラックのウインチを使用して行なっている。

(4) ラーメンの応力図と P C バリ断面の諸常数

このラーメンに2点集中荷重を加えた場合の曲げモーメントを、弾性理論により剛域は考えず鋼材の影響を考慮して求めたのが図-3である。

図-3 ラーメンの応力

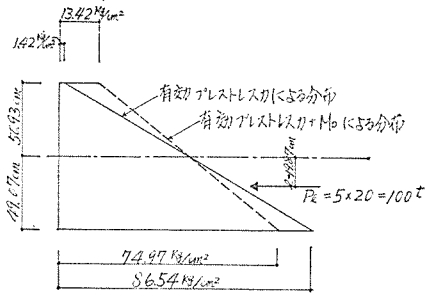


P C バリ中央断面の諸常数は次のとおりである。

- 断面積  $A=2451.57 \text{ cm}^2$  (鋼棒, 鉄筋考慮)
- 断面2次モーメント  $J=2671282.47 \text{ cm}^4$
- 断面係数  $Z_1=54443.75 \text{ cm}^3$
- $Z_2=52444.93 \text{ cm}^3$

有効プレストレス力による P C バリ中央コンクリート断面の応力分布を図-4に示す。

図-4 有効プレストレス力による P C バリ中央コンクリート断面の応力分布



4. 変形の測定

変形測定の対称としては、たわみ、回転角およびコンクリート面、鉄筋面のひずみを考えている。まずたわみの測定には口絵写真に見るように供試体の周囲に設けた観測用パイプ足場の内側にこれと独立して測定用パイプ足場を組み、この足場に1/100 mmダイヤルゲージを取りつけて図-5に示すように4節点およびハリ中央部、荷重点下、基礎バリ中央のたわみを測定している。またハリ中央部にはスケールを取りつけ口絵写真にみるようにトランシットでたわみを測定している。節点回転角は各節点に埋め込んだボルトにアルミアングル製のアームを取りつけ、検長50 cmにして1/100 mmダイヤルゲージを用いて測定している。また今回の実験では柱頭部節点の剛性低下を見るのが大きな目的の一つであるため、図-5で見ると、柱頭節点からハリの方へ50 cm、柱の方へは61 cmのラーメン線上にボルトを埋込み、節点と同じ方法でその点の回転角を測定している。

鉄筋およびコンクリート面のひずみ測定はW.S.Gで測定するものを主として1個の供試体に102点東京測器製ポリエステルゲージを貼布している。測定計器には共和無線の20接点用を5台使用している。

鉄筋面へのゲージ(PL10)貼布はP-2接着材を用いマイクロクリスタリンワックスとブラックテープで

図-5 たわみおよび回転角の測定点

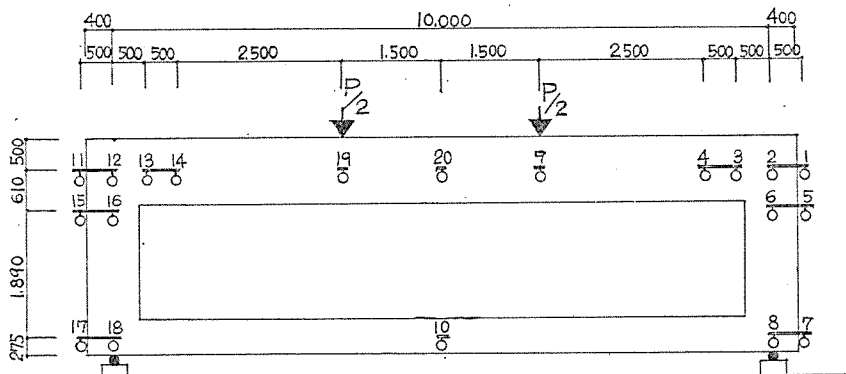
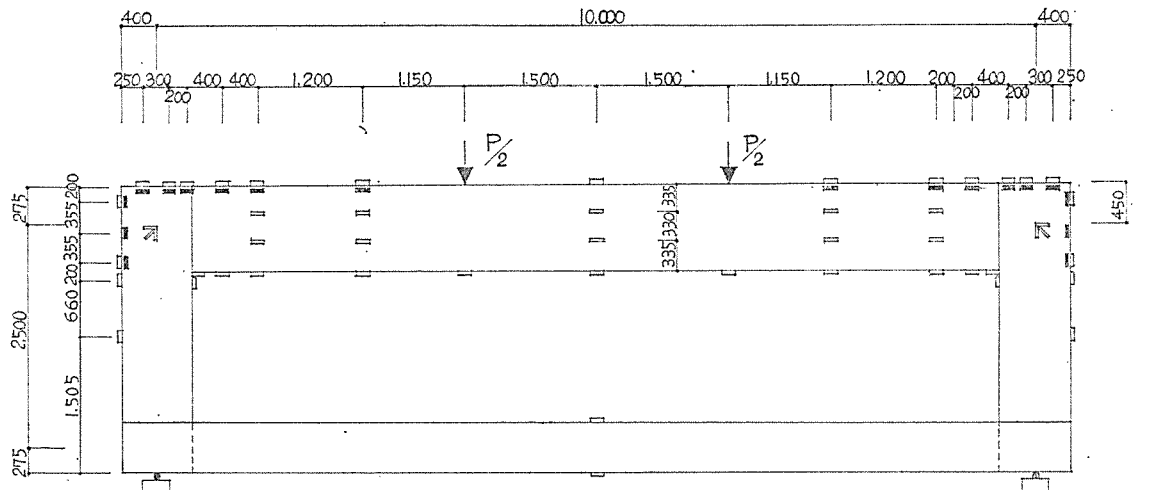


図-6 W.S.G によるひずみ測定点



注：■印は鉄筋面，□印はコンクリート面への貼布

四重の防水処理を行なっている。コンクリート面へのゲージ (PL 60 および PR 20) 貼布は PS 接着材による。

### 5. 実 験

実験は供試体 2 個ともほぼ同様に行ない、同じような結果を得た。加力はほぼ 5 t きざみに荷重を上昇させ計器の測定、きれつの調査を行なっている。くり返し加力は PC バリ中央下端にきれつが発生した  $P=70$  t 付近で 1 回、変形量がかなり増大した  $P=100$  t 付近で 1~2 回行なって変形回復量の状態をみている。きれつは最初、柱と柱頭部コンクリート打継面に発見 ( $P=40$  t)、ついで柱頭部上面 PC バリとの打継面に発見、 $P=65 \sim 70$  t で PC バリ中央下端にきれつ発生、 $P=100$  t で PC バリにせん断きれつ発生、最終は  $P=113$  t (No. 1)、 $P=110$  t (No. 2) で柱頭部破壊が起こり、PC バリ中央圧縮側コンクリート圧壊で実験を終了した。実験

写真-2 No. 1 ラーメン最終きれつ ( $P_{max}=113$  t)

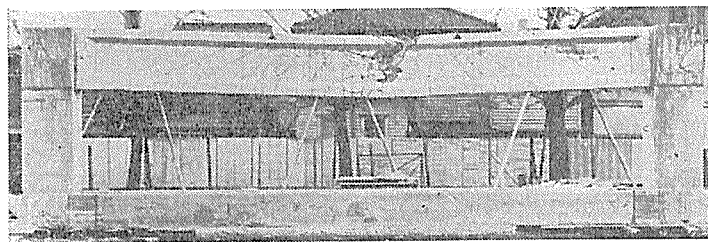


写真-3 No. 2 ラーメン最終きれつ ( $P_{max}=110$  t)

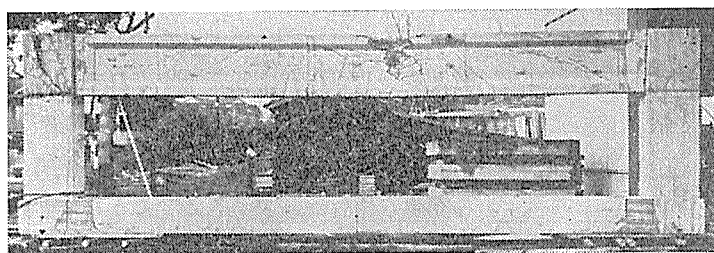


写真-4 柱頭部最終破壊状況 (柱頭部フープは PC バリを貫通していない)



に要した時間は正味 5 時間程度であるが供試体の搬入、搬出、整備に時間を要したので供試体 No. 1 と No. 2 の実験は 1 週間の間をおいて行なっている。なお実験の計器測定等に要した人員は 1 回ほぼ 30 人であった。

### 6. 実験結果の考察

#### (1) 荷重—変形曲線

実験で測定した主要な荷重—変形曲線を示すこととする。

a) 荷重—たわみ曲線 図-7 にハリ中央部の荷重—たわみ曲線を示す。このグラフに弾性理論線を記入してあるが、この線は図-3 のモーメント図をもとにして計算した理論線である。実験線は最初のうちは理論線に大体合致しているがハリ端異形鉄筋が長期応力 ( $\sigma_t=1600$  kg/cm<sup>2</sup>) に

図-7 No. 2 ラーメン荷重-たわみ曲線

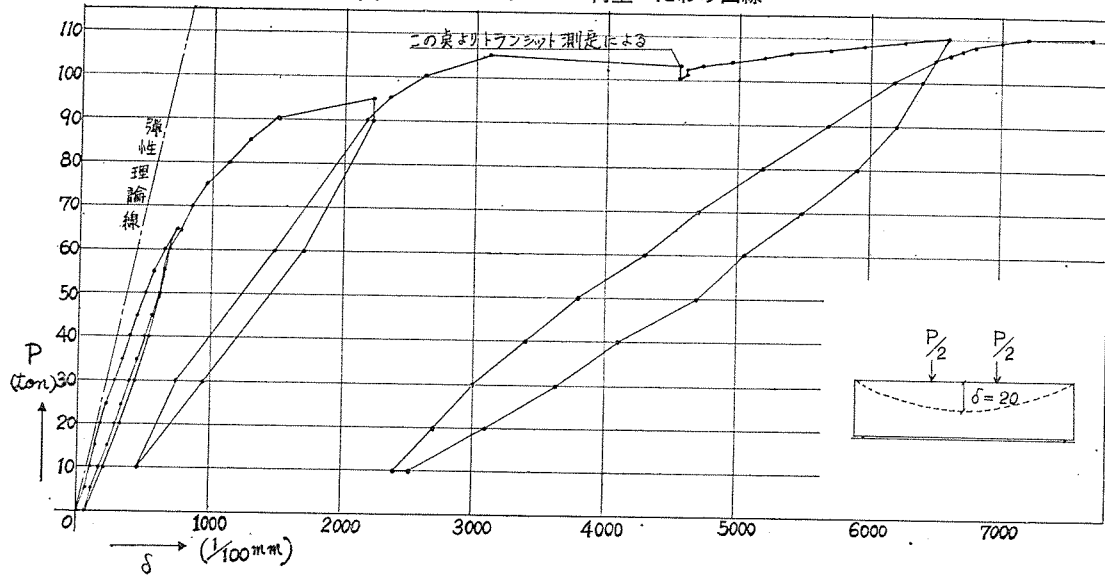


図-8 No. 2 ラーメン荷重-たわみ曲線

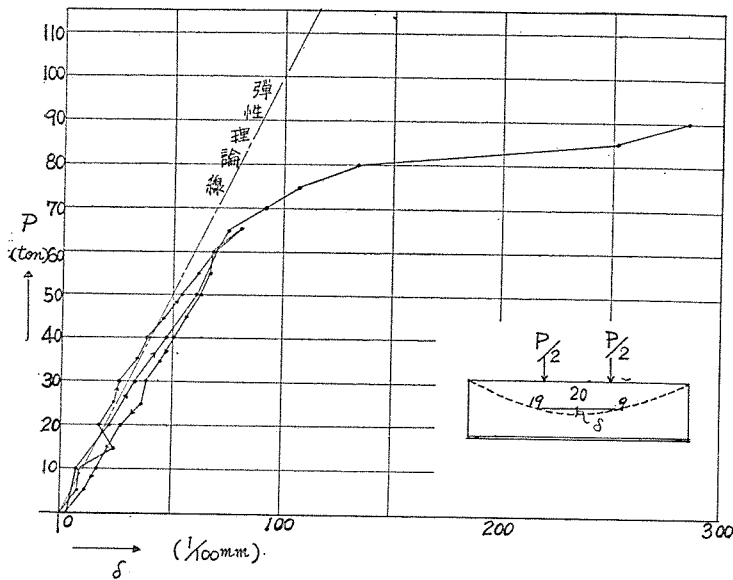
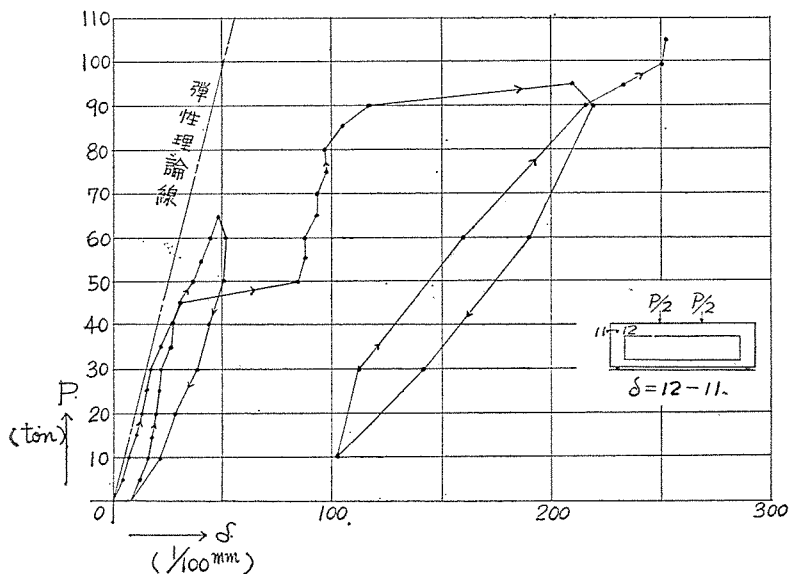


図-9 No. 2 ラーメン荷重-節点回転角曲線



達する  $P=40t$  付近では、すでに若干理論線からずれている。図-8 に荷重点とハリ中央部の相対たわみ曲線を示す。この曲線も最初は理論線とよく一致している。

b) 荷重-節点回転角曲線 図-9 にダイヤルゲージで測定した荷重-節点回転角曲線を示す。この場合、回転角は節点とそれに固定した検長 50 cm のアームによる点の相対たわみで表わしている。この曲線は 図-7 の荷重-たわみ曲線とよく一致して弾性理論線と最初のうちはよく一致しているが、若干復元力が少ない。

c) 荷重-ひずみ曲線 図-10 に P C バリ 端部および柱頭部主筋に貼布した W.S.G で測定した荷重-ひずみ曲線を示す(カッコで示す数字は測定点番号でありプロットした点はこの測定値の平均である)。この曲線は 2 個の供試体、左右端部ともに非常ににていて、ともにハリの方では節点に向かって発散するようにひずみ度が大きくなり、柱の方では節点に向かって収れんするといった面白い特長を示している。またハリでひずみ度が+より-に変わる点が反曲点位置を示すはずであるが理論による反曲点位置より若干ずれている。しかし 図-3 に示すような柱のせん断力によるハリへの軸力を計算すると実験による反曲点位置は理論値と最初のうちほとんど一致している。

図-11 に PC バリ中央断面の荷重-ひずみ曲線を示す。この曲線にも弾性理論線を記入してあるが、やはり  $P=30t$  ぐらいまではよく実験線と一致しているが、きれつが発生した  $65t$  付近ではかなりひずみ度が増加している。

(2) きれつ

コンクリートの引張強度を圧縮強度の  $1/14$  と仮定、 $c\sigma_t=30 \text{ kg/cm}^2$ 、また、コンクリートの曲げ引張強度を  $1.6 \times c\sigma_t=48 \text{ kg/cm}^2$  と仮定する。PC バリ中央断面のコンクリート引張側ファイバー ストレスが  $48 \text{ kg/cm}^2$  となるときを、きれつモーメント  $M_c$  とすれば

$$M_c = Z\sigma = 54\,443.75 \times (74.97 + 48) = 6.69 \text{ tm}$$

(この場合 PC バリへの軸力は考えていない)

図-3 に示すモーメント図のハリ中央部モーメントが  $M_c$  に達するときの試験機荷重  $P_c$  を求めると

$$P_c = 6\,690/79.23 = 85 \text{ t}$$

となり、この値は前述のようにハリ端部主筋の降伏点に近い値である。しかるに実験値は  $P_c=65\sim70t$  であるので

$$\text{実 } P_c / \text{理 } P_c = 0.77 \sim 0.83$$

という値を示し、この値は柱のせん断力による PC バリへの軸力を考えると、さらに小さな値となってくる。この理由は普通の鉄筋コンクリートである柱頭部に、すでにきれつが生じているので柱頭部の剛性が低下し、従って PC バリに図-4 に示すハリ中央部モーメントより大きなモーメントを生じているためと考えられる。

次に PC バリに生じたせん断きれつであるが PC バリの軸力を考えないときの斜張力破壊時の最大せん断応力  $\tau$  は  $c\sigma_t=30 \text{ kg/cm}^2$  とした場合

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_g + 2\sigma_t)^2 - \sigma_g^2} = 47.18 \text{ kg/cm}^2$$

となり、このときのせん断破壊面のせん断力  $Q_s$  を求めると

$$Q_s = \frac{b_0 I \tau}{S_0} = 55.1 \text{ t}$$

となり、ハリ自重および加力装置重量を考慮してせん断破壊時の試験機荷重  $P_s$  を求めると、

$$P_s = 2Q_s - 7.0 \text{ t} = 110.2 \text{ t} - 7.0 \text{ t} = 103.2 \text{ t}$$

となり、実験による値  $P_s=100t$  とほとんど一致している。柱のせん断力によって生ずる PC バリの軸力を考慮しなかった理由は終局強度の項で述べる。

(3) 終局強度

PC バリの中央断面において曲げ破壊耐力を求めるにあたって、圧縮側コンクリート ストレス ブロックを矩形、鋼棒の引張力を降伏点にとり補助鉄筋の影響を考慮、ただし柱のせん断力による軸力を無視して降伏抵抗モーメント  $M_M$  を求めると

$$M_M = 153.76 \text{ tm}$$

また柱頭部における鉄筋コンクリート部分の曲げ破壊耐力  $M_E$  を同様な仮定に従って求めると

$$M_E = 84.00 \text{ tm}$$

図-10 No. 2 ラーメン荷重-ひずみ曲線

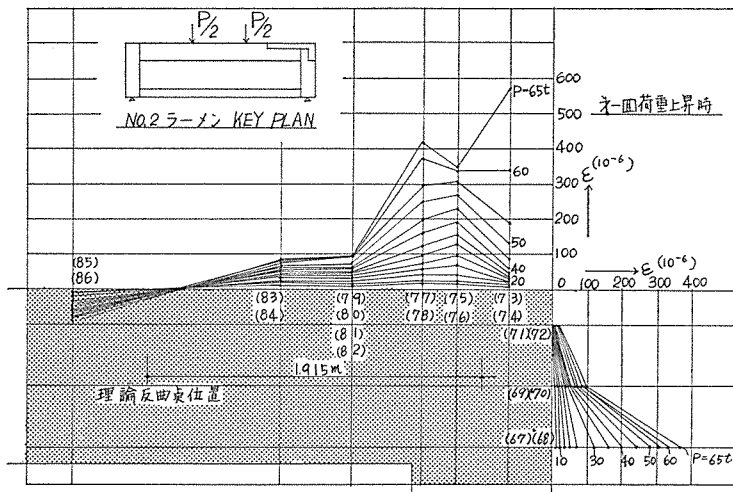
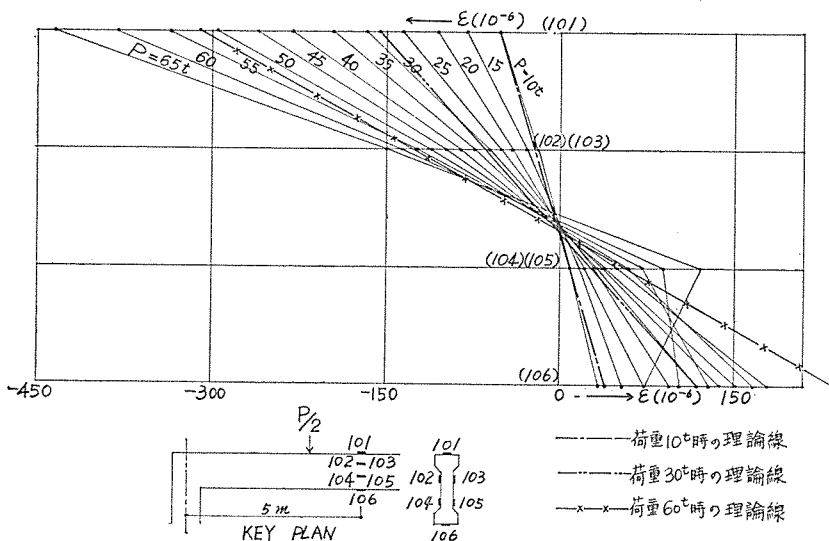


図-11 No. 2 ラーメン PC バリ中央断面荷重-ひずみ曲線

第一目上昇時



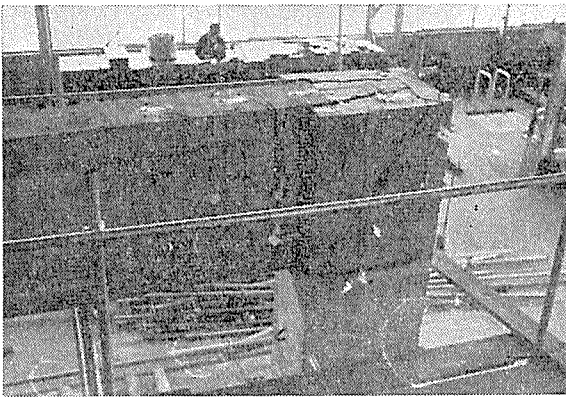
従ってリミット デザインが成立するものと仮定すれば、理論による最終試験機荷重  $P_{max}$  は

$$P_{max} = \frac{2(M_M + M_E)}{l} = \frac{2(153.76 + 84.00)}{3.5} = 135.9 \text{ t}$$

となるはずである。また柱のせん断力によるハリの軸力を考えると  $P_{max}$  の値はさらに高くなるし、鋼棒も最終段階においては降伏強度よりも破断強度に近づくはずである。しかるに実験による試験機最終荷重は 110 t および 113 t で理論値の 80 % 程度しか出ていない。

この理由は柱頭部のフープがこの実験においてはコ字型に配置しただけであり PC バリを貫通させていない。従って荷重が増加するにつれて写真-5 に見るように PC バリに沿った柱頭部コンクリートがはく離するようにきれつがハリの外側主筋に沿って入り、柱頭部が先に破壊し十分なプラスチック ヒンジが形成されなかったためと考えられる。この状態はこの実験特有の現象であり、柱頭部のフープが PC バリを貫通し補強が完全であれば、当然リミット デザインが成立するものと考えられる（実際の建物はフープを貫通させてある）。

写真-5 柱頭部上面の最終きれつ

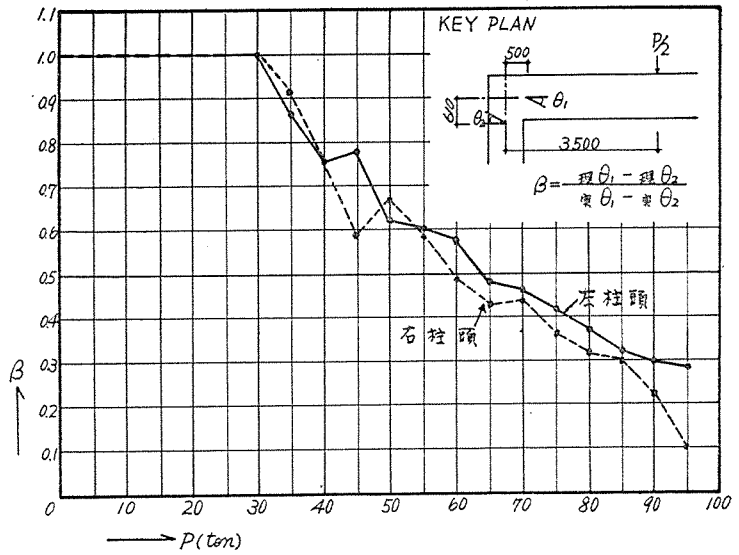


(4) 柱頭部剛性

前述のようにこの実験の主要な目的の一つが柱頭部剛性の調査であり、このために節点を中心として3カ所で回転角を測定している。実験の結果では節点部分のきれつは大部分ハリ端部と柱頭の回転角を測定した位置の間にある。従ってハリ端部の回転角を  $\theta_1$ 、柱頭の回転角を  $\theta_2$  として弾性理論による回転角の差 理  $\theta_1 - \text{理} \theta_2$  と実験で測定した回転角の差 実  $\theta_1 - \text{実} \theta_2$  の比を  $\beta$  とすれば

$$\beta = \frac{\text{理} \theta_1 - \text{理} \theta_2}{\text{実} \theta_1 - \text{実} \theta_2}$$

図-12 No. 2 ラーメン柱頭部剛性の低下率



$\beta$  は柱頭部分剛性の低下率を示す係数ということが出来る。 $\beta$  と荷重との関係を示したグラフを図-12 に示す。この図で  $P=30 \text{ t}$  までは測定の誤差が大きく響くので他の荷重-変形曲線から判断して  $\beta=1$  と仮定している。 $\beta$  の低下は大胆に言って直線的であり、ハリ主筋が長期応力のとき  $\beta=0.8$ 、短期応力のとき  $\beta=0.5 \sim 0.6$  という事が出来る。

7. むすび

実験結果の要点をあげると

- (1) 低応力時においてラーメンは弾性理論どおりの応力変形状態を示している。
- (2) 柱頭部主筋が長期設計用応力 ( $1600 \text{ kg/cm}^2$ ) に達する頃はすでに柱頭部剛性の低下が見られ弾性理論線から若干ずれてくる。
- (3) PC バリの中央部初きれつは柱頭部剛性低下の影響により弾性理論値よりも早く発生している。
- (4) PC バリのせん断きれつは大体理論で説明しうる。
- (5) 終局強度はフープの配置不備により柱頭部プラスチック ヒンジが十分に形成されなかったため、リミット アナリシスによる理論値よりも低い値を示したが、これはこの実験特有のものであり、柱頭部補強を完全にすればリミット デザインが成立すると考えるのが妥当である。
- (6) 柱頭部剛性の低下率  $\beta$  はこの実験の場合、鉄筋の長期設計応力時に 0.8、短期設計 応力時に 0.5~0.6 を示した。

以上の実験結果からこの種ラーメンの実施設計に対する注意事項としては、