

氏名	多賀直恒
	たがなおつね
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第276号
学位授与の日付	昭和44年5月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	鋼構造架構の弾塑性挙動に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 横尾義貫 教授 若林 実 教授 金多 潔

### 論文内容の要旨

この論文は鋼構造建築架構の横力による弾塑性挙動を、できるだけ実証的に、簡潔かつ総括的な関数で表示しようとしたもので理論解析によってもその妥当なことを裏付け、塑性設計や動的応答解析などの基礎的な資料を提供しようとしたものであり、6節からなる。

第I節は、H型鋼から構成された柱脚固定の単層単スパンラーメン架構の実験を行ない、その結果を総括するような関数表示をこころみ、また構造減衰性について論じたものである。

供試体はSS41相当品のH型鋼を用い、隅角部は降伏しないよう補剛した溶接接合による架構で14体からなる。加力の型は梁中央に作用する鉛直荷重だけによる梁崩壊型の参考実験をのぞき、水平荷重H、及び両柱頭に作用する鉛直荷重Pとの比を1.0及び2.0に保ちながら、正負両振りの繰返し載荷を、荷重振幅を漸次増大しながら行なったものである。なお鉛直荷重はつねに鉛直を保持するよう加力装置に特別の工夫を加えている。実験の結果を要約すると下記のごとくである。

(1) hysteresis loop の形状は紡錘形をなし、ループは大変形でも安定しており、数回の繰返しで定常化する。ただしループの中心は当初載荷方向へ多少偏移する傾向をもつ。(2) 繰返しによる剛性低下は10%前後である。(3) 本実験の最終変形量は、横座屈、局部座屈などの影響で多少不明確であったがじん性率は鉛直荷重がない場合は3、鉛直荷重がある場合は2程度は期待できるものと推定された。ただし降伏点は荷重変形曲線が初期勾配の1/3の点をもって定義し、本論文は以下すべてこれを採用している。(4) 次にskeleton curve の関数表示をこころみ、Ramberg—Osgoodによる表式を修正した

$$(1+\alpha) \delta = \phi + \alpha \phi^\gamma \quad (a)$$

がきわめてよく適合することを示している。ここに $\alpha$ 及び $\gamma$ はそれぞれ、降伏点変位 $X_Y$ および降伏点 $H_Y$ に対する比変位 $\delta = X/X_Y$ および比荷重 $\phi = H/H_Y$ である。実験の結果は $\alpha$ は0.15~0.2、 $\gamma$ は奇の整数で7,9程度であることを示した。 $\alpha$ は主として、本論の定義による降伏点以下の形状に、 $\gamma$ は降伏点以上の形状を支配するものである。(5) hysteresis loop は、除荷重を原点とし、上式の与える曲線を2倍に拡大し

た曲線で、かなりよく表現できることを示している。(6) 構造減衰性については、1サイクル当り損失エネルギー  $E_d$ 、等価粘性減衰係数  $n_e$ 、及び specific damping capacity  $d_s$  の値を実験結果から求め、 $E_d$  は降伏点をこえると変位に関してほぼ直線的に増大し  $n_e$  は最大値0.17、 $d_s$  は0.85を示した。上記関数表示にもとづくこれらの値も実験結果とかなりよい近似を示した。

第II節は、H型鋼を用いた単スパン1層及び2層ラーメン架構の実験で、それぞれ鉛直荷重を、 $P=0.275P_Y$  及び  $0.367P_Y$  の一定値に保った二つの場合につき両振繰返し加力を行なったものである。なお供試体は架構隅角部の横座屈を防ぐ意味で同じ架構を横につなぎ併立させている。その結果について第I節同様の考察を加えている。すなわち

- (1) hysteresis loop の形状は紡錘形をなし、安定しており、繰返しによる剛性の低下はやはり10%程度である。
- (2) じん性率は  $P/P_Y$  が0.3~0.4で3~4は期待できることを示した。
- (3) (a)式の関数表示はよく適合し、 $\alpha$ は0.2~0.3、 $\gamma$ は11~19の間にあることが判かった。
- (4) 既往の諸家による同様の実験13例90体についても上記関数表示をこころみ、 $\alpha$ は0.15~0.3、 $\gamma$ は7~23の範囲にあることを示した。
- (5) 損失エネルギー、specific damping capacity についても、実験結果から求めた値と、上記関数表示による計算値とが、前節同様かなりよい近似を示した。

第III節は高張力鋼 SM 50 及び WELTEN 60 のH型鋼を用いた単層単スパンラーメン架構の実験で、加力は一定軸力  $P=0.3P_Y$  及び  $0.4P_Y$  の二つの場合の両振り繰返し試験である。その結果は、第I節及び第II節とはほぼ同様で、高張力鋼を採用したことによる特別の差異はみとめられなかった。関数表示における  $\alpha$  は0.15~0.3、 $\gamma$  は7~19の間にあった。なお第I節—第II節の実験を通観して

- (1) 終局耐力は simple plastic theory の場合より高い。
- (2) 柱軸圧が大きい場合も荷重変形曲線に負勾配は表われない。これらは歪硬化の影響が大きいことを示している。
- (3) また本実験では、じん性率は前例より大きく3~6を示したが、終局状態は、横座屈、局部座屈あるいは溶接部の破壊などに関係している。

第IV節は鋼構造物の復元力特性と動的応答について論じたものである。

構造モデルは粘性減衰をもつ1自由度系とし、復元力特性は、第I節—第III節において実証的にみちびいた関数表示を用いている。前節までの考察にもとづき建築加工の弾塑性挙動を、 $\delta-\phi$  曲線で示すとかなり限定された範囲におさまり、 $\alpha$ は0.15~0.3、 $\gamma$ は7~23の範囲にあることが示されている。

地動加速度としては、三角形、正弦波形及び矩形のパルスを採用している。

諸量は無次元化し、構造物の弾性固有周期  $T_0$  と地動加速度パルスの見掛けの周期  $T$  との比  $T_R=T_0/T$ 、加速度パルスの強さ  $Y$  と構造の降伏レベル  $L_Y=H_Y/M$  との比、 $Q=Y/L_Y$ 、また比変位  $\delta=X/X_Y$  などを用いて、 $T_R=0.3\sim 10.0$ 、 $Q=0.25\sim 2.0$  の間に変動させ、動的応答解析を行ない、じん性率  $|\delta|_{\max}$  を求めている。各種地震波パターンに応じ、 $Q$  を変化させた場合の、 $|\delta|_{\max}-T_R$  曲線をえがいている。最大変形量は変形が弾性域にとどまるときは  $T_R=1$  で生じ、塑性域に入るにしたがって  $T_R$

$<1.0$ に傾き、 $Q$ の増大とともに左側による。 $\alpha$ の値は $0.15\sim 0.30$ の範囲に変動するがその影響は小さい。 $\gamma$ の値は $7\sim 23$ 程度の変域をとるが、弾性的振動域ではその影響は小さいが、塑性変形が増大する $Q>1.0, T_R<2.0$ で、 $\gamma$ の変動による効果は $Q$ の増大とともに大きくなる。一般に完全弾塑性体の応答( $\gamma=\infty$ に相当)は、この関数表示による場合に較らべて、塑性変形量を非常に過大評価している。

入力波形による応答量の変化は、力積を一定に設定すると、 $T_R>4.0$ では $Q$ の値にかかわらず、弾性的振動をし差異はほとんどない。 $T_R<4.0$ では加速度パルスの振幅が大きい程大きく三角、正弦、矩形の順であり、前二者の差は少ない。

第V節は、bilinearな応力歪曲線を仮定し、水平力をうける架構の弾塑性解析を行ない、歪硬化の影響をくらべたものである。第2分枝の勾配は、 $\mu(\sigma_x/\epsilon_x)$ で与え、また曲げモーメント軸力、及び曲率などは降伏点における諸量で除した無次元量  $m=M/M_Y$ ,  $n=P/P_Y$  及び  $\phi=\phi/\phi_Y$  で取り扱う。まず  $\mu=0\sim 0.02$ ,  $n=0\sim 1.0$ に変化させ、断面形としてはH断面をとり数値計算により一定値  $\mu$ ,  $n$ の組に対してそれぞれ  $m-\phi$  曲線を求める。ついでこれらの曲線を3個のパラメータ  $a$ ,  $b$  及び  $c$  をもつ Ramberg—Osgood 型の関数表示で近似する。この近似  $m-\phi$  曲線はかなりの精度をもっている。架構は単層単ネopanラメンとし、一定軸力と漸増水平力を受ける場合の非線型挙動を厳密に追究する解析方法をたて、著者の行なった繰返し载荷実験2例及び他の単調载荷重実験例に相当する場合を解析している。解析の結果えられる荷重変形曲線は実験結果と対比すると前者では  $\mu=0.04\sim 0.05$ , 後者は  $0.015\sim 0.020$ の値を用いた解析結果がよく適合することを示している。平均して $0.03$ 程度と評価するのが一応妥当だと考えている。

ついで、架構の安定限界と部材の限界回転量の関係を検討している。柱及び梁の細長比は等しく、 $\lambda$ の種々の値に対して、 $n=0\sim 0.6$ の間に変化させ、 $\mu=0$ , 及び $0.03$ の場合につき計算している。さらにその結果から、上記範囲の  $\mu$  及び  $n$  の値に対する安定限界のじん性率と細長比との関係を表わす図を作成している。

第VI節は鋼構造架構の水平荷重による荷重、変形曲線を、第V節と同様の解析方法により理論的に求め、第I節及び第III節で示した、二つのパラメータ  $\alpha$ ,  $\gamma$  をもつ Ramberg—Osgood 形の関数表示を試みたものである。なお架構は抽象化し、上下端に上層柱、下層柱からうける曲げモーメントが作用し、それに連なる梁による弾塑性回転拘束をもち、side sway が可能な柱として取り扱っている。拘束材としての梁も前者の3個のパラメータをもつ Ramberg—Osgood 型の関数表示による、曲率、曲げモーメント関係をもつものとして拘束効果を求めている。数値計算は上下両端の回転角、モーメント等に関して種々の条件をおいた4つの場合につき行ない、 $n=0\sim 0.6$ に変化させ柱細長比、梁細長比の若干の組合せに対して多数の荷重—変形曲線を求めている。

これらの解析結果に第I～第III節に示した関数表示を適用すると、 $\alpha$ は $0.2\sim 0.3$ ,  $\gamma$ は $7\sim 21$ の間の数値をとることがわかり、第I節乃至第III節の実験による値ときわめてよく一致しこの荷重、変形曲線の関数表示が妥当なことを理論的にも裏付けている。

## 論文審査の結果の要旨

高層建築架構の設計においては、耐震性の検討がもっとも重要な問題である。高層建築架構は多くの場合、多層の長方形ラーメン構造をとるが、その耐震設計のために行なわれる塑性設計または動的応答解析においては水平力による各層の荷重・変形曲線あるいは復元力特性をいかに表現するかは重要な問題である。

この論文は、一つの層の荷重、変形曲線をできるだけ総括的にしかもできるだけ簡潔に関数表示することを主なる目的としてまとめられたものである。

論文の構成は6節からなるが、大別すれば上記目的のために行なわれた架構の実験的研究(第I、IIおよびIII節)、架構の解析的研究(第V及びVI節)および復元力特性と動的応答の相関性(第IV節)について論じた部分からなる。

大局的にみて、上記実験的研究および解析的研究は、できるだけ総括的かつ簡潔な荷重、変形曲線の関数表示を求めることを志向したものとみてよい。

まず実験的研究(第I、IIおよびIII節)において、荷重、変形曲線を追求している。処女荷重、変形曲線すなわち skeleton curve は、Ramberg—Osgood によって提案された表現を修正した、2個のパラメータ  $\alpha$  および  $\gamma$  を有する一つの連続な関数によって、かなり高い近似をもって表現できることを示している。この関数は、変位および水平荷重を降伏点における変位および水平荷重に対する比  $\delta$  及び  $\phi$  で表わしているが、基準となる降伏点としては初期剛性の $1/3$ 勾配を有する点を採用しているのを一つの特色とする。この表示によれば、実験架構の荷重、変形曲線は、著者の行なったもののほかに、他の研究者によって行なわれた多くの実験結果もふくめて、パラメータ  $\alpha$  の値は0.15~0.30、 $\gamma$  の値は奇整数であり7~23の範囲にあり、 $\delta$ - $\phi$  図においてきわめて限定された区域にあることを示している。水平力正負繰返し実験における hysteresis loop は、除荷点を原点とし、上記の skeleton curve の変位、荷重関係を2倍に拡大した曲線で、かなりよく表示できることを示している。なおパラメータ  $\alpha$  は主として上記定義の降伏点以下の曲線の形状に、 $\gamma$  は主として降伏点以上のそれに関係しており、 $\gamma = \infty$  は完全弾塑性の場合である。

解析的研究(第Vおよび第VI節)では、曲げモーメントの曲率関係を3個のパラメータを有する Ramberg—Osgood 型の関数で十分の近似をもって表現できることを確め、これを用いて水平力を受ける架構の厳密な弾塑性解析方法を提示している。種々の場合について多くの数値計算を行なった結果から、著者が実験的研究にもとづいて提案した Remberg—Osgood 型を修正した関数表示が妥当なことを裏付けている。 $\alpha$  の値は0.15~0.30、 $\gamma$  の値は7~21の範囲にあり、実験からえられた結果ときわめてよく一致している。

復元力特性を動的応答の相関を論じた部分(第IV節)は、上記関数表示をもちいて、パラメータ  $\alpha$  および  $\gamma$  が動的応答にどのように関係するかを論じたものである。

以下に各節の成果の概要を述べる。

(1) 第I節は、H型鋼を用いた柱脚固定単層単スパンラーメンの水平力正負繰返し加力実験であり、鉛直

荷重は0の場合および水平荷重と等大および2倍に保った比例載荷の場合からなる。実験の結果 $\alpha$ の値は0.15~0.2,  $\gamma$ の値は7, 9程度であることが示されている。また1サイクル当り損失エネルギー, 等価粘性減衰係数, specific damping capacity を実験からえられた値と, 上記関数表示から求められた値とを比較して, かなりよく近似していることを示している。

- (2) 第II節はH型鋼による柱脚固定単スパンの, 1層および2層ラーメンの水平力正負繰返しに加力実験であり, 鉛直荷重は柱の降伏荷重の0.275および0.365倍の一定値に保った場合について行なっている。実験の結果 $\alpha$ は0.2~0.3,  $\gamma$ は11~19の間にあることを示し, 構造減衰性に関する諸量についても第I節同様の結果をえている。また既往の諸家の実験的研究を集成し, その結果からは $\alpha$ は0.15~0.3,  $\gamma$ は7~23の間にあることを示している。
- (3) 第III節は高張力H型鋼を用いた単スパン単層ラーメンの水平力正負繰返し加力実験であり,  $\alpha$ の値は0.15~0.3,  $\gamma$ の値は7~19の間であり, 普通鋼の場合ととくに異なる点はないことを明らかにしている。
- (4) 第I, IIおよび第III節を通じて次のごときことが明らかにされている。
  - (i) この種の実験は, 鉛直荷重の作用方向をつねに鉛直に保つことが重要であり, 著者はベヤリングを挿入した独自の加力装置を工夫しているが, 摩擦抵抗はきわめて小さく, 有効な実験方法である。
  - (ii) 最終変形量は, 架構の横座屈, 局部座屈および溶接接合部の施工性に依存し, じん性を保持するためには, これらに対する配慮が重要である。
  - (iii) いずれの実験においても荷重, 変形曲線が負勾配に転ずる不安定限界は全く見られず, simple plastic theory による場合よりも高い値を示し, 歪硬化の影響が大きい。
- (5) 第IV節は復元力特性と動的応答の相関を調べたもので, 構造モデルとしては上記の関数による復元力特性を有する1質点粘性減衰系を採用し, 地動としては三角, 正弦および長方形の加速度パルスを与えて, 動的応答を求めている。その結果を加速度パルスの波形に応じ, 加速度パルスの強さ, じん性率, 構造物の固有周期の関係図にまとめている。パラメータ $\alpha$ の値は, じん性率にはほとんど影響がなく,  $\gamma$ の値は共振周期近傍もしくはそれ以下で, 加速度パルスの強さが大きくなると, じん性率に相当影響するが, 完全弾塑性とすることはじん性率を過大評価することを指摘している。
- (6) 第V節は架構の荷重変形曲線に対する歪硬化の影響を調べることを主な目的としたものである。材料の応力歪曲線を bilinear な折線とし, 歪硬化の度合を第2分枝と第1分枝との勾配比 $\mu$ をもって表わし, 曲げモーメント, 軸力, 曲率関係を求め, これをさらに3個のパラメータをもつ Ramberg-Osgood 型の連続関数におきかえる。架構は単層単スパンラーメンとし, 一定軸力の下に, 漸増水平力を受ける場合の非線型挙動を厳密に追求する解析方法をたて, すでに実験結果が知られている若干の例について計算をおこなっている。実験結果は勾配比 $\mu$ が0.015~0.05平均して0.03の値に相当することを示し, 歪硬化の影響を見逃せないことを指摘している。
- (7) 第VI節は, ラーメンの層の挙動を調べるために, 上下端に梁と接続した side sway 可能な柱の挙動を調べている。梁及び柱の曲げモーメント, 軸力, 曲率関係は前節にえられた3個のパラメーターをもつ関数で表示し, 前節同様の解析方法によって, 種々の材端条件, 部材細長比, 軸力の大きさの場合に

ついて計算を遂行している。その結果は既述のように実験にもとづいてえられた関数表示ときわめてよく一致しており、その適当なことを裏付けている。

以上を要するに、本研究は建築鋼構造架構の弾塑性挙動に関して、耐震工学上きわめて有用な基礎的資料を提供したものであり、学術上、工業上寄与するところは大きい。よって本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。