

鋼製・合成橋脚柱の耐震性を探るためのハイブリッド実験

福井工業大学工学部教授
大阪市立大学名誉教授

中 井 博

1. はじめに

高速道路網を支える鋼製橋脚については、これまで、それらの耐荷力¹⁾や隅角部のせん断遅れ特性²⁾などに着目した地道な研究が進められてきた。これらの研究は、あくまで荷重が単調に増大するときの静的な挙動についての研究に限られてきた。

しかしながら、平成7年1月17日の早朝に起こったあの忌まわしい兵庫県南部地震時に、鋼製・合成橋脚柱のあるものは、繰返し作用する地震荷重によって、著しい損傷を被ったものが多い。

この種の地震荷重による鋼製橋脚の保有耐荷力と変形性能とを調べる研究も、古くから考案され、研究が進められてきた。それが、いわゆるハイブリッド実験と呼ばれるものである。すなわち、ハイブリッド実験とは、構造物の任意の荷重状態のもとでの復元力を得るための載荷実験と、任意の時刻における地震力を受ける構造物の地震応答シミュレーションとを同時にオンラインで実施する実験のことを意味している。

まず、アナログ計算機で制御されたアクチュエーターを用いるハイブリッド実験は、1969年に、伯野（東京大学）ら³⁾によって開発された。つぎに、1974年に、高梨ら⁴⁾（東京大学）は、伯野らのアイデアを応用し、現在のハイブリッド実験に発展させた。また、1981年に、山田・家村（京都大学）ら⁵⁾は、8ビットのデジタルコンピュータを用いたハイブリッド実験システムの開発に成功した。その後、このハイブリッド実験システムは、1997年に発生した兵庫県南部地震までに、幾つかの大学や企業の研究所で整備されている。

兵庫県南部地震ののち、ハイブリッド実験は、鋼・合成構造物などの耐荷力、および変形性能について検討するための有力な方法として不可欠となった。とくに、座屈した板要素を有する鋼構造物の終局限界状態、および終局限界状態以降における挙動を解析的に再現することが困難なため、鋼製橋脚柱が兵庫県南部地震のような巨大地震を受ける時の挙動の再現には、ハイブリッド実験が採用されるようになった。

このような背景のもとで、1990年に、「材料及び構造物の動的実験システム (MODEL-2804A)」が、文部省によって、大阪市立大学大学院・工学研究科の大学院最先端設備備品として認可され、大型構造物実験室内に設置された。ちなみに、このシステムは、最大荷重100tf、50tfおよび10tfの能力を有する3台のアクチュエーター（サーボ弁により荷重、あるいは変位を電気信号で制御できる油圧ジャッキ）、その主制御盤、および、それらとGP-IBで結ばれた32ビットのパーソナル・コンピュータとで構成されている。

そして、1991年には、巨大地震を受ける鋼製柱、ならびに合成柱の耐荷力、および変形性能について検討するために、ハイブリッド実験用のプログラムが新たに構築され、また新たに二軸方向の載荷装置も製作され、この実験システムと併せることで、ハイブリッド実験システム（オンラインの地震応答シ

ミュレーションシステム)が誕生した。その後、この実験システムを用いた橋脚柱の地震時挙動に関する研究が、多数実施されてきている⁶⁾。

本文では、これらのハイブリッド実験装置を用いて実施された研究成果の一部を紹介する。

2. ハイブリッド実験の概要⁷⁾

(1) ハイブリッド実験のメカトロニクス

図1(a)に示す橋脚柱を、同図(b)の1自由度系振動体に置換したとする。すると、この対象振動モデルの運動方程式を解析する際には、構造物や構造部材の未知の復元力が必要となる。そこで、図2に示すように、各時刻増分ステップ毎にオンラインで、逐次、実験結果から取り込んでシミュレーションを行う。この種の実験が、まえがきで述べたように、ハイブリッド実験である。

すなわち、地震加速度が与えられるものとして、コンピューターで対象とする振動モデルの運動方程式を解析するとき、対象とする振動モデルの復元力特性を知ることが、不可欠となる。ここで、対象とする振動モデルが弾性領域にあるとき、その復元力は、Hookeの法則にしたがう弾性理論によって容易

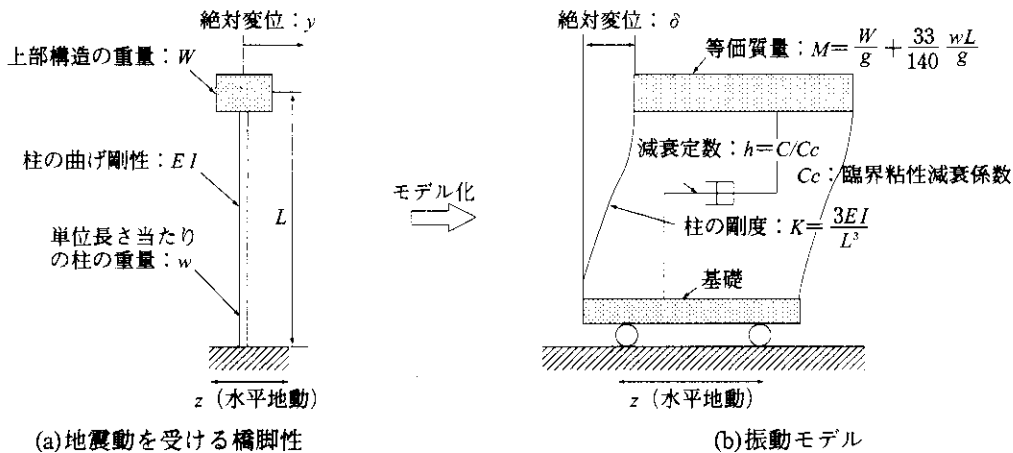


図1 地震動を受ける橋脚柱とその振動解析モデル

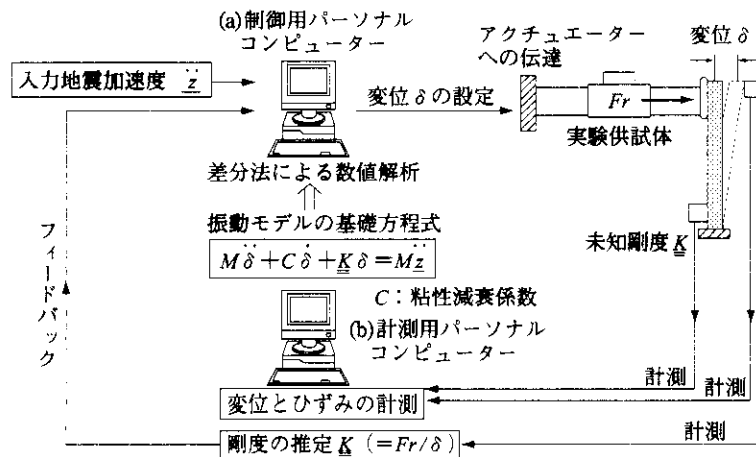


図2 ハイブリッド実験の原理

に導くことができる。ところが、対象とする振動モデルが弾塑性領域に入ったり、座屈を起こしたりすると、その復元力を、解析的に求めるのが困難となる。そこで、ハイブリッド実験においては、その復元力を、解析の対象とする振動モデルの運動方程式にしたがって制御された載荷実験によって、各時刻増分ステップ毎にオンラインで、逐次、取り込むようにしている。

(2) 載荷装置

載荷装置は、鉛直方向の荷重と水平方向の荷重とを独立に、また同時に載荷できるように設計されている。ここで、鉛直方向の荷重（実験供試体に死荷重による軸方向圧縮力を導入するための荷重）、および変位は、最大荷重が30tfで、最大ストロークが50mmの静的油圧ジャッキにより載荷することができる。また、水平方向の荷重（実験供試体に曲げモーメントを導入するための地震荷重）は、最大荷重が10tfで、最大ストロークが±150mmのアクチュエーターを用いてコンピューター制御で載荷することができる。なお、実験供試体頂部の回転変形を拘束しないように、載荷フレームとアクチュエーターとの間、および荷重の作用点には、それぞれ円筒ベアリング、およびピン載荷治具を用いて所要の実験ができるように工夫されている。

図3には、10tfのアクチュエーターを用いて製作した二軸載荷装置を例示する。

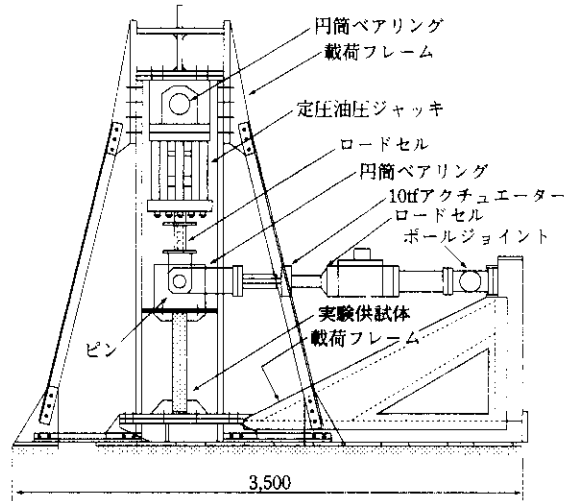


図3 10tfアクチュエーターを用いた二軸方向載荷装置（寸法単位：mm）

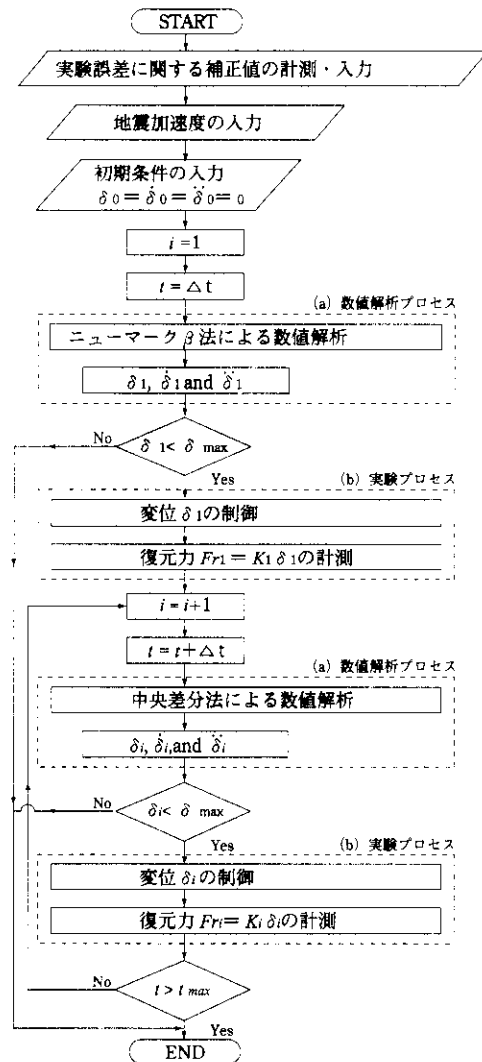


図4 ハイブリッド実験のフロー・チャート

3. ハイブリッド実験における数値処理

(1) ハイブリッド実験のフロー・チャート

ハイブリッド実験システムは、オンラインで結ばれた数値解析プロセスと実験プロセスとの2つから成っている。図4には、ハイブリッド実験のフロー・チャートを示す。

まず、データ・ファイルから、予備実験により得られた装置の不具合の調整に関するデータ、実験供試体に与える地震加速度の時刻歴、ならびに振動モデルの等価質量の初期変位、初期速度、および初期加速度を入力する。

つぎに、Newmarkの β 法を用いて、実験供試体頂部における時間刻みの第1ステップの水平変位 δ_1 、速度 $\dot{\delta}_1$ 、および加速度 $\ddot{\delta}_1$ を、計算する。その結果にしたがい、実験供試体頂部に水平変位 δ_1 を与え、同時に実験供試体頂部における第1ステップの復元力 $K\delta_1$ 、すなわち水平荷重 F_1 を計測する。

さらに、中央差分法を用いて、実験供試体頂部における時間刻みの第2ステップの水平変位 δ_2 、速度 $\dot{\delta}_2$ 、および加速度 $\ddot{\delta}_2$ を計算する。その結果にしたがい、実験供試体頂部に水平変位 δ_2 が与えられ、同時に実験供試体頂部における第2ステップの復元力 F_2 を計測する。その後、この中央差分法によるこれらのプロセスが、時刻 t が載荷時刻 t_{max} を超える、あるいは水平変位 δ が限界水平変位 δ_{max} を超えるまで、繰り返して計算・計測する。

(2) 数値処理法

数値処理は、以下に示す運動方程式とその数値積分とによって、あるステップまでの変位、あるいは荷重などから次のステップの変位を予測する。

いま、図1(a)~(b)に示した質量 M で、剛度 K のバネをもつ1自由度系の振動モデルが、地動 z を受けるものとする。このときの応答としては、絶対変位 y の代わりに、構造物自身、すなわちバネやダッシュポットが受ける相対変位 $\delta (=y-z)$ を用いる。この相対変位 δ に対する運動方程式は、d'Alembertの原理を適用すれば、

$$M\ddot{y} + C(\dot{y} - \dot{z}) + K(y - z) = -M\ddot{z} \quad (1)$$

で表される。したがって、最終的には、

$$\ddot{\delta} + \frac{C}{M}\dot{\delta} + \frac{K}{M}\delta = -\ddot{z} \quad (2)$$

が得られる。ここに、 δ 、 $\dot{\delta}$ 、および $\ddot{\delta}$ は、それぞれ相対変位、相対速度、および相対加速度である。また、 C は、粘性減衰係数である。

ここで、数値積分には、安定条件の限界が $\Delta t \leq 2/p$ であることに注意して、主として中央差分法を用いている。ここに、 Δt 、および $p (= \sqrt{K/M}$ (rad/s)、 K :剛度、 M :質量)は、それぞれ時間刻み、および固有円振動数である。ただし、初期条件を決定するために、数値積分の第1ステップにおいてのみ、Newmarkの β 法が用いられている。

なお、中央差分法を数値積分に主として用いている理由は、実験供試体が降伏点を超え、弾塑性状態に至るような実験において、Newmarkの β 法を用いれば、まだ収束していない値を用いて、収束計算させる矛盾が生じる。そのため、解が発散する可能性も、あり得るからである。

(3) 相似則

縮尺模型の実験結果を用いて実橋脚柱の耐荷性、変形性、および耐震性を推定する場合、対象橋脚柱と実験供試体との相似則は、必ず考慮しておかねばならない。

いま、実験供試体(添字 m で示す)における質量、減衰係数、および剛度を、それぞれ M_m 、 C_m および K_m と置く。また、対象橋脚柱(添字 a で示す)におけるこれらを、それぞれ M_a 、 C_a 、および K_a と置く。すると、一自由度系振動体モデルの運動方程式は、次のように表すことができる。

$$\text{対象橋脚柱: } M_a\ddot{\delta}_a + C_a\dot{\delta}_a + K_a\delta_a = -M_a\ddot{z}_a \quad (3)$$

$$\text{実験供試体: } M_m\ddot{\delta}_m + C_m\dot{\delta}_m + K_m\delta_m = -M_m\ddot{z}_m \quad (4)$$

ここに、 δ 、 $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ 、および z は、それぞれ水平変位、速度、加速度、および地震加速度である。

まず、 $t_a = S_1 t_m$ 、および $\delta_a = S_2 \delta_m$ (S_1 、および S_2 :それぞれ時刻に関する拡大率、および寸法に関する縮小率)のとき、次式が、与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_a &= \frac{S_2}{S_1} \delta_m, \quad \ddot{\delta}_a = \frac{S_2}{S_1^2} \ddot{\delta}_m, \quad K_a = S_2 K_m \\ R_a &= S_2^2 R_m, \quad M_a = S_1^2 S_2 M_m, \quad \text{および } C_a = S_1 S_2 C_m \end{aligned} \right\} \quad (5)_{1-6}$$

つぎに、式(5)₁₋₆を式(3)に上記の関係式を代入すると、実験供試体の運動方程式は、

$$M_m \ddot{\delta}_m + C_m \dot{\delta}_m + K_m \delta_m = -\frac{S_1^2}{S_2} M_m \ddot{z}_a = -M_m \ddot{z}_m \quad (6)$$

で表される。

したがって、ハイブリッド実験を行う際、実験供試体に作用させる入力地震加速度には、実際の地震加速度を実験供試体用に縮尺したもの（実地震加速度の S_1^2/S_2 倍）を、また質量にも実験供試体用に縮尺したもの（実質量の $1/S_1^2 S_2$ 倍）を用いなければならない。

4. 鋼製柱、および合成柱に対する実験の一例

(1) 実験供試体

図5には、ある実橋脚をモデルとし、それを上述の相似則で縮尺した実験供試体の概要を示す。

まず、実験供試体は、箱形断面とし、表1に示すように、鋼製柱、および合成柱それぞれ2体ずつの合計4体が製作された。各実験供試体の側面図、断面図、および断面寸法を、図6に示す。各実験供試

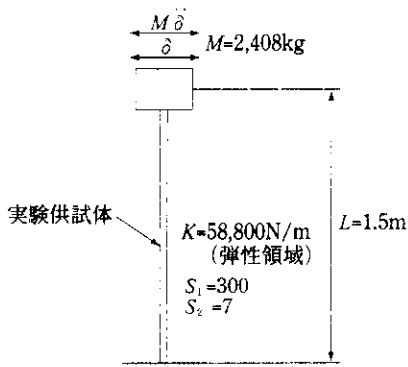


図5 実験供試体の概要

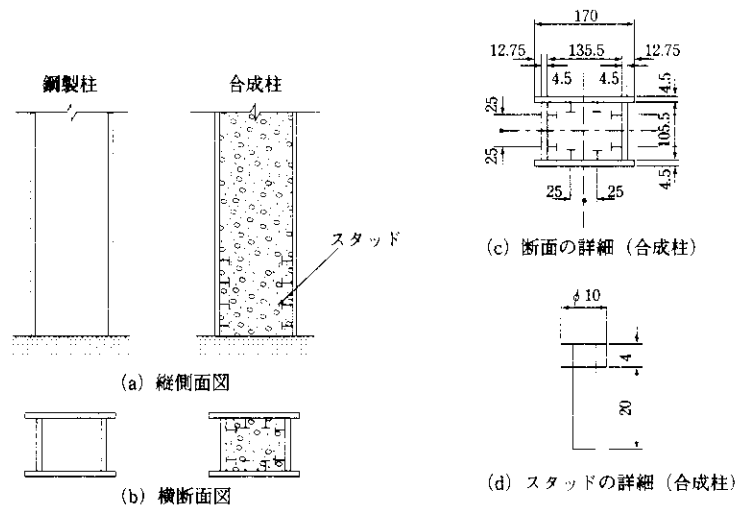


図6 実験供試体の縦断面図、および横断面図（寸法単位：mm）

表1 実験供試体の内訳

No.	実験供試体名	断面形状	地震荷重載荷の有無
1	S-O-G00	鋼柱	無
2	S-O-G17		有
3	C-O-G00	合成柱	無
4	C-O-G17		有

体の箱形断面の鋼板部分は4体とも同形で、その鋼板の板厚は4.5mm、またフランジ・プレートの幅厚比パラメーター R ($=\sqrt{\sigma_{ys}/\sigma_{cr}}$, σ_{cr} :弾性座屈応力度)は道路橋示方書・同解説II、鋼橋編で定められている限界値に準じて約0.7に設定された。なお、これは、昭和55年度以前の道路橋示方書で設計された補鋼板の終局強度が、 $R \leq 0.7$ で鋼板の降伏点 σ_{ys} とされていた点も考慮して定めた値である。そして、箱形断面の断面寸法比 b/d は、実績調査結果にもとづき1.25に設定された。なお、実験供試体の製作に当たっては、ウェブ・プレートとフランジ・プレートとの溶接部分が弱点部とならないように、レ形開先のグループ溶接が採用された。ちなみに、フランジ・プレートの細長比パラメーター $\bar{\lambda}$ ($=\sqrt{\sigma_{ys}/\sigma_{cr}}$)は、約0.27に設定された。さらに、実験供試体No. 3～No. 4の内部には、圧縮強度 σ_{ck} を120kgf/cm²程度に制限したコンクリートが充填された。

(2) 実験方法

実験の手順を、以下に示す。

まず、実験供試体の地震時の挙動、および耐荷性状を調べるために、表1に示した実験供試体のうち、実験供試体No. 2、およびNo. 4を用いて、上部構造の死荷重を想定した一定軸方向圧縮力が載荷された。その状態で、図7に示す1995年1月17日に神戸海洋気象台で得られた兵庫県南部地震の南北方向の地震加速度(最大加速度 818.02gal)を与えるハイブリッド実験が行われた。

つぎに、健全な実験供試体の剛度、耐荷力、および変形性能、ならびに地震荷重を与えた後の実験供試体の剛度、残存耐荷力、および残存変形性能を把握するため、ハイブリッド実験と同様な一定軸方向圧縮力が載荷された。その状態で、全ての実験供試体に対し、図8に示す $\pm \delta_{max}$ の最大水平変位を10回繰返し与える一定繰返し変位載荷実験が行われた。ここに、最大繰返し水平変位 δ_{max} は、全実験供試体の最高荷重を把握することができるように、鋼製柱の実験供試体の弾性実験の結果をもとに算出した降伏変位 δ_{ys} の6.0倍に設定され、 $\delta_{max} = 38.5\text{cm}$ にとられた。

最後に、各実験供試体の実験結果を比較することにより、コンクリート充填の有無が、橋脚柱のバージンの耐荷力、および変形性能に及ぼす影響、ならびに巨大地震荷重載荷後の橋脚柱の鋼性、残存耐荷力、および残存変形性能に及ぼす影響について検討された。

なお、軸方向圧縮力としては、一定繰返し変位載荷実験、およびハイブリッド実験ともに、充填コンクリートの強度を無視した実験供試体の鋼断面の全塑性軸方向力 N_{ps} の15%が載荷された。

(3) 実験結果

実験供試体No. 2、およびNo. 4の水平変位の時刻歴応答、および水平荷重-水平変位曲線を、それぞ

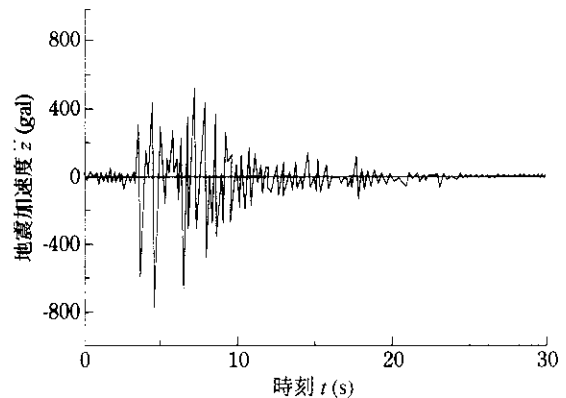


図7 神戸海洋気象台で記録された兵庫県南部地震(1995年)における南北方向の水平加速度の時刻歴

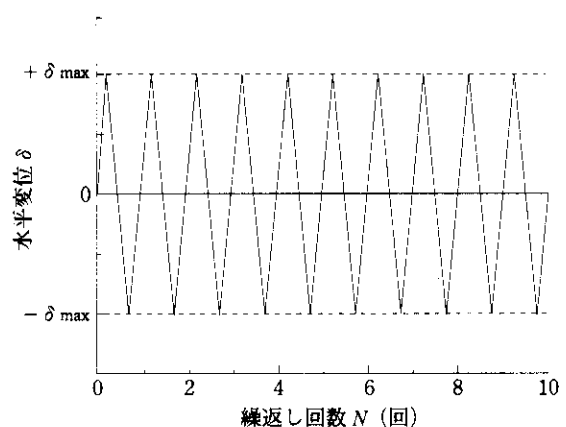


図8 一定繰返し変位の載荷方法

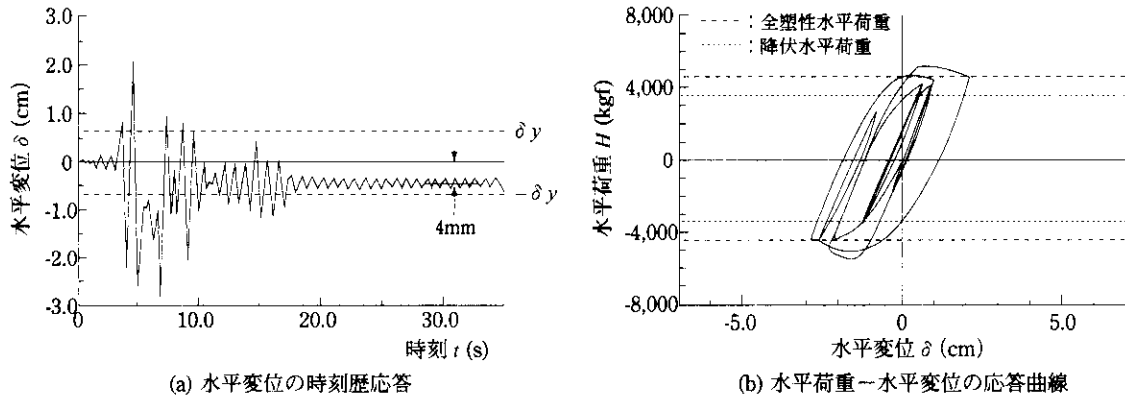


図9 実験供試体No. 2 (S-O-G17) のハイブリッド実験結果 ($S_1=300$, および $S_2=7$)

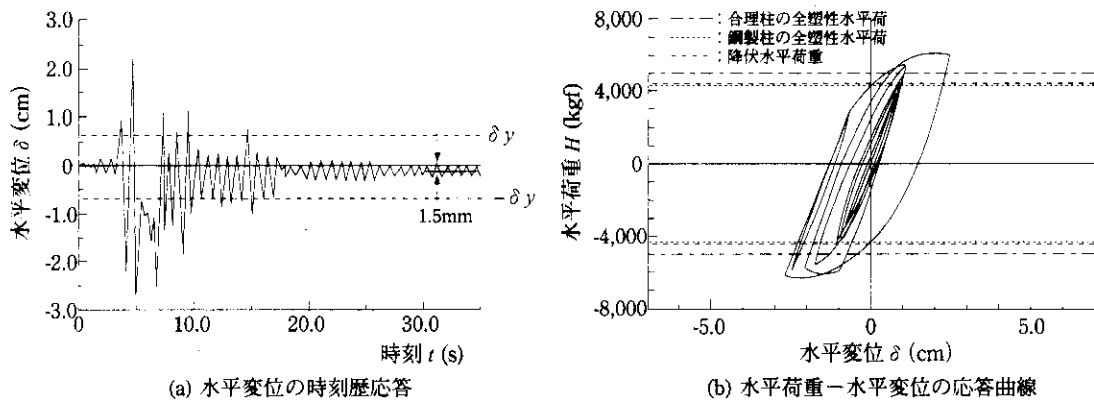


図10 実験供試体No. 4 (C-O-G17) のハイブリッド実験結果 ($S_1=300$, および $S_2=7$)

れ図9, および図10に示す。ここで、図中の δ_y は、各実験供試体の鋼板が降伏する変位である。

ちなみに、実験終了後、実験供試体No. 2の頂部には、約4mm(=0.6 δ_y)の残留変位が生じていた。これは、対象橋脚柱(脚長5.25m)に換算すると、28mmに相当し、道路橋示方書・同解説V、耐震設計編の残留変位の許容値5,250/100=52.5mm内に収まっていることがわかる。

(4) 鋼製柱と合成柱との履歴曲線の比較

図11(a)~(b), および図12(a)~(b)には、各実験供試体の一定繰返し変位載荷実験における水平荷重-水平変位曲線を示す。

まず、鋼製柱である実験供試体No. 1と、これに地震荷重を与えたものに相当する実験供試体No. 2とについて考察すれば、図11(a)~(b)によると、地震荷重を与える前の最大水平荷重は、解析から求められた全塑性水平荷重とほぼ一致している。しかし、地震荷重を与えた後は、若干、それよりも下回っていることがわかる。

つぎに、合成柱である実験供試体No. 3と、これに地震荷重を与えたものに相当する実験供試体No. 4とについて考察すれば、図12(a)~(b)によると、地震荷重を与える前は、6 δ_y の繰返し変位量を10回与えても、充填コンクリートを無視した全塑性水平荷重の解析値を上回っている。これに対し、地震荷重を与えた後は、7回目でこれを下回り、その後、繰返し回数の増加に伴い、耐荷力の低下の様相がわかる。

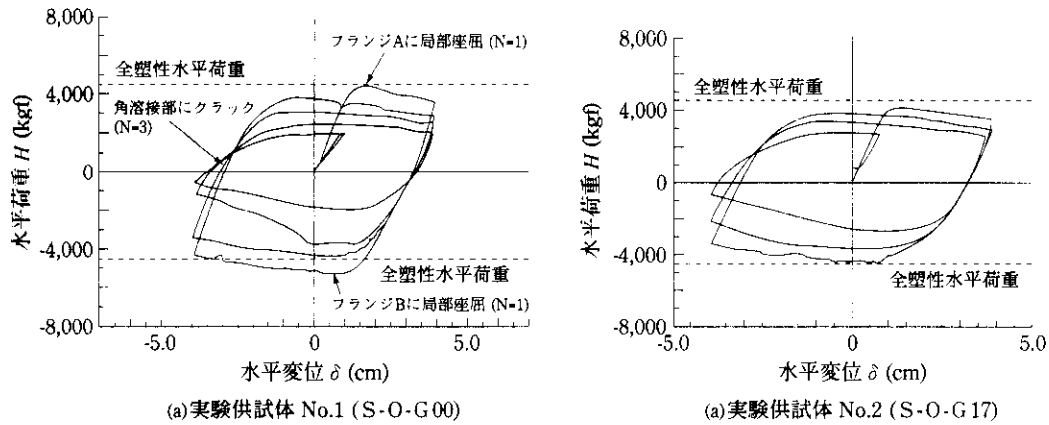


図11 鋼製柱の実験供試体の水平荷重-水平変位曲線

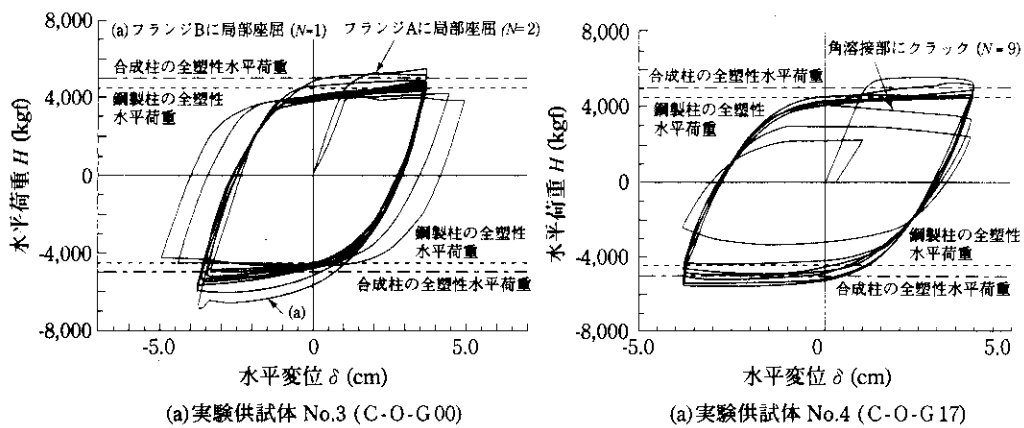


図12 合成柱の実験供試体の水平荷重 水平変位曲線

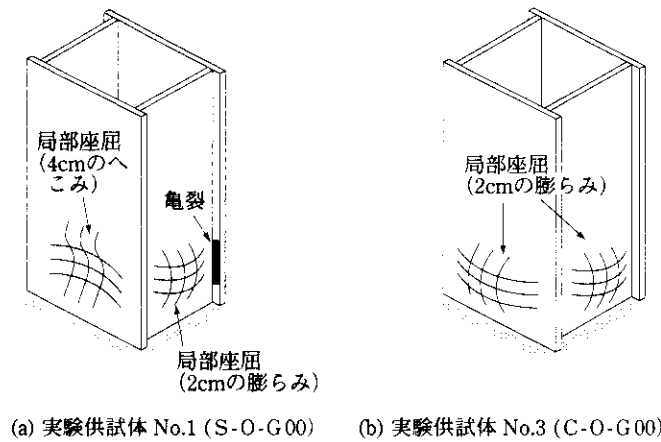


図13 実験供試体の残留変位状況

(5) 実験供試体の残留変位

図13(a), および(b)には, それぞれ実験供試体No. 1, およびNo. 3 の実験終了後の残留変形状況を示す。同図によると, 実験供試体No. 1 のフランジ・プレート, およびウェブ・プレートは, それぞれ断面の内側, および外側方向に局部座屈している。これに対し, 実験供試体No. 3 のフランジ・プレート, およびウェブ・プレートは, 両方とも断面の外側方向に局部座屈していることがわかる。これは, 合成柱における充填コンクリートが, 外側鋼板の内側方向への局部座屈を抑止しているためである。

5. まとめ

筆者らは、本文で示したハイブリッド実験システムを用いて、鋼製橋脚についての耐震性の向上に関する研究も行っている⁹⁾。そして、現在も、既設の鋼製橋脚を耐震補強する手法の妥当性の検討¹⁰⁾、また断面コーナ部に曲率を付けた部分合成橋脚柱の耐荷性と変形性能とに関する検討¹¹⁾を、ハイブリッド実験システムによって行っている。後者の2つについては、研究成果がまとまり次第、別の機会に詳しく報告する予定である。

参考文献

- 1) H.Nakai, T.Kitada and T.Miki : Interaction Curve of Thin-Walled Box Stub-Column Subjected to Compression and Bending for Applying to Overall Buckling Analysis of Columns, Proc. of JSCE, No.362/I-4, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.2, pp.311s~319s, Oct. 1985.
- 2) H.Nakai, T.Miki and Y.Hashimoto : On Limit State Design Method Considering Shear Lag Phenomenon of Corner Parts of Steel Rigid Frames, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.13, No.2, pp.163s~173s, Oct 1996.
- 3) M.Hakuno, M.Shidawara and T.Hara : Dynamic Destructive Test of a Cantilever Beam Controlled by Analog-Computer, Proc. of JSCE, No.171, pp.1~9, Nov. 1969.
- 4) K. Takahashi, K.Udagawa, M.Seki, Y.Okada and H. Tanaka : Non-Linear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer-Actuator Online System, Trans. of Architectural Institute of Japan, No.229, pp.77-83, March 1975.
- 5) Y.Yamada and H.Iemura : Hybrid Analysis on Earthquake Response of Deteriorating Hysteretic Structures, Proc. of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Eng., Part 1, pp.4.13.1~14, Sept.1982
- 6) 中井 博, 北田俊行, 中西克佳 : 漸増繰返し荷重を受ける鋼製・合成橋脚柱の耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.89~100, 1995年4月.
- 7) H.Nakai, T.Kitada and N.Nakanishi : Hybrid Test for Simulating Seismic Behavior of Steel and Compositated Bridge Piers, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol.37, pp.49~60, Dec.1996.
- 8) 中西克佳 : 鋼製・合成橋脚柱の耐震性に関する実験的研究, 大阪市立大学, 学位請求論文, 平成10年4月.
- 9) 北田俊行, 中井 博, 中西克佳 : 鋼製箱形断面を有する橋脚柱の耐震性向上法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.219~232, 1998年4月.
- 10) 北田俊行, 中井 博, 加賀山泰一, 松村政秀 : ハイブリッド実験による既設鋼製橋脚の耐震補強法の確認, 土木学会関西支部年次学術講演会, I-145, 平成11年5月.
- 11) 中井 博, 北田俊行, 坂口三代治, 徳林宗孝, 川副孝行 : 断面コーナ一部に曲率を有する部分合成橋脚柱の耐荷力と変形性能とに関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, I-135, 平成11年5月.