

(21) コンクリート部分充填鋼製橋脚の強度と変形能

STRENGTH AND DEFORMATION CAPACITY OF STEEL BRIDGE PIERS PARTIALLY FILLED WITH CONCRETE

葛 漢 彬* 宇佐美勉** 才塚邦宏*** 伊藤義人****

By Hanbin Ge, Tsutomu Usami, Kunihiro Saizuka and Yoshito Itoh

In this paper, the experimental behavior of concrete-filled steel box columns under quasi-static loading is first discussed. In this part of experimental work, the effects of main parameters, such as the width-thickness ratio parameter and length of filled-in concrete, on the column behavior were studied. In view of the situation that a diaphragm was not provided over the filled-in concrete in some existing bridge piers, the effect of the diaphragm on the structural performance was also examined. To investigate the seismic performance of concrete-filled steel box columns, two specimens were tested using the hybrid test method. For comparison, a hollow steel column specimen with the same dimension was also tested. Test results have shown that concrete-filled steel box columns can be effectively used as bridge substructures to withstand the severe earthquakes.

1. まえがき

鋼製橋脚は、鉄筋コンクリート橋脚に比べ軽量であること、複雑な形態に製作可能なこと、設置面積が少なく済むこと、施工期間が短いことなどの理由により、都市高速などで多用されている。多くの場合、橋脚が既存道路上に設置されるので、車が衝突しても柱が局部的な変形をしないように、柱基部にコンクリートが中詰めされている。しかしながら、1995年1月17日に起こった兵庫県南部大地震では、鋼製橋脚には座屈破壊、脆性破壊などの被害が多く見られた。局部座屈の発生は、上部工からの軸圧縮力と地震時に生じた大きな繰返し水平力によるものと考えられるが、これは、破壊した鋼製橋脚が、強大な地震に対し十分なエネルギー吸収能、即ち強度と変形能を有していなかったからである。このため、鋼製橋脚の耐震性能の向上策を早急に検討する必要がある。

著者らは、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の耐震性能いわゆる耐荷力、変形能およびエネルギー吸収量を調べてきた^{1)~3)}。それらの結果から、コンクリートを適切な高さだけ中詰めすることにより、柱の強度と変形性能を著しく高めることができることが明らかにされている。本論文は、これらの文献で報告された研究結果を再吟味し、繰返し載荷実験およびハイブリッド地震応答実験によって得られたコンクリート部分充填鋼柱の強度と変形能についてまとめたものである。

コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能を検討する場合主なパラメータとしては、断面形、鋼種、構造形態、板の溶接方法の他に、幅厚比、細長比、補剛材剛比、軸圧縮力の大きさおよびコンクリートの充填長さなどが考えられる。本研究では、これらの内の充填コンクリートの充填長さ、コンクリート最上部にダイアフラムの有無およびフランジの幅厚比の影響について述べる。

* 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** D.Sc., 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 名古屋大学大学院工学研究科博士課程(前期課程) 土木工学専攻在学中 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

**** 工博 名古屋大学教授 理工学総合研究センター (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

Table 1 Parameters of Quasi-Static Test Specimens

Specimen	R_f	$\bar{\lambda}$	l_c/h	N	P/P_y	γ/γ^*
UU0	0.70	0.40	—	3	0	—
UU1	0.70	0.40	—	3	0.2	—
UU2	0.70	0.40	0.3	3	0.2	—
UU3	0.70	0.40	0.5	3	0.2	—
UU4	0.70	0.40	0.5	5	0.2	—
UU5	0.70	0.60	0.3	3	0.2	—
UU6	0.90	0.40	—	3	0.2	—
UU7	0.90	0.40	0.3	3	0.2	—
UC70-40-3[0]	0.70	0.40	0.3	0	0.2	—
U70-25[3]	0.70	0.25	—	3	0.2	—
UC70-25-3[0]	0.70	0.25	0.3	0	0.2	—
UC70-25-3[3]	0.70	0.25	0.3	3	0.2	—
UC70-25-5[3]	0.70	0.25	0.5	3	0.2	—
UC70-25-3[3]D	0.70	0.25	0.3	3	0.2	—
UC70-25-5[3]D	0.70	0.25	0.5	3	0.2	—
UC90-40-5[3]	0.90	0.40	0.5	3	0.2	—
SS1	0.45	0.50	—	3	0.2	3.0
SS8	0.45	0.50	0.3	3	0.2	1.0
SS9	0.45	0.50	0.5	3	0.2	1.0
S45-25[3]	0.45	0.25	—	3	0.2	3.0
SC45-25-3[0]	0.45	0.25	0.3	0	0.2	1.0
SC45-25-3[3]	0.45	0.25	0.3	3	0.2	1.0
SC45-25-5[3]	0.45	0.25	0.5	3	0.2	1.0
SC60-35-3[3]	0.60	0.35	0.3	3	0.2	1.0
SC60-35-5[3]	0.60	0.35	0.5	3	0.2	1.0

2. 繰り返し載荷実験

実験供試体は SS400 構造用鋼材より製作され、構造形態は片持柱である。断面形は無補剛箱形、補剛箱形とした。Table 1 に、供試体の各パラメータの設計値を示す。その内、幅厚比と細長比は実績調査の結果¹⁾を参照して決定した。フランジの幅厚比パラメータは式 (1)、細長比パラメータは式 (2) で定義される。

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{K h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで、 b はフランジ幅、 t は板厚、 σ_y は降伏応力、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 k はフランジ板の座屈係数、 K は有効座屈長係数 (片持柱では $K=2$)、 h は供試体の柱としての長さ、および r は鋼断面の断面 2 次半径である。補剛柱の場合、縦方向補剛材はフランジ板に 2 本、ウェブ板に 1 本入れた。補剛材の剛比 γ は、線形座屈理論から得られる縦方向補剛材の必要剛比 γ^* の 1 倍とした。軸圧縮力の大きさは鋼断面の全断面降伏軸力 P_y の 0.2 倍とした。また、表中の N は、同一変位での繰り返し数を示す。

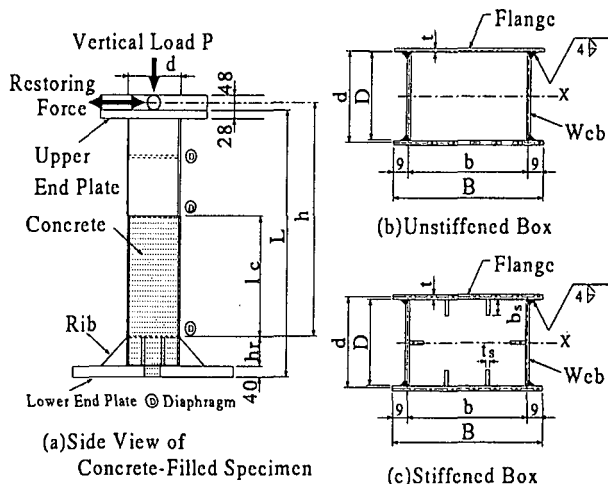


Fig.1 Test Specimens

供試体概要図を Fig.1 に示す。U と S で始まる供試体はそれぞれ無補剛箱形断面と補剛箱形断面であり、供試体名の最後に D がつくものは充填コンクリート最上部にダイアフラムのない供試体である。コンクリートは、供試体の下のエンドプレートの中央に開けられた穴から、所定の長さまで中詰めした。所定の長さのとき

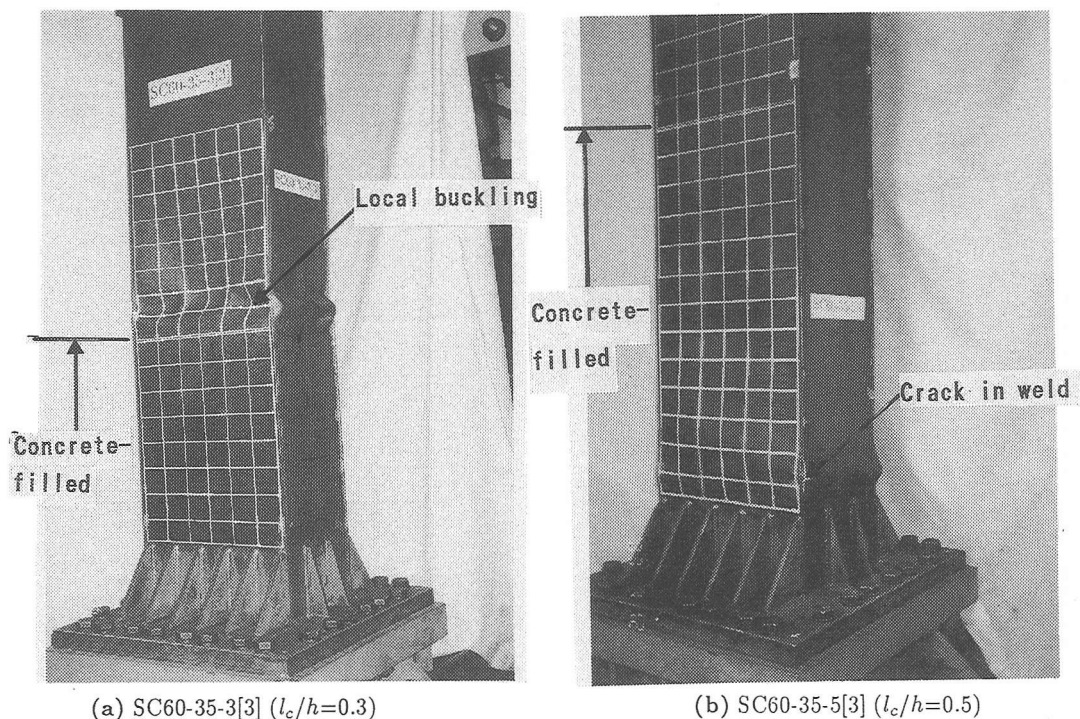


Fig.2 Typical Failure Appearances of Test Specimens

ろには穴のないダイアフラムが設置されており、コンクリートはこのダイアフラムと下のエンドプレート（供試体を実験床に固定する鋼板）の中で閉じこめられている状態で実験している。ただし、本実験では所定の長さのところにダイアフラムのない供試体があり、その供試体については上のエンドプレートの中央に開けられた穴から、所定の長さまで中詰めした。一方、充填コンクリートは普通コンクリートを用い、設計基準強度 f_{ck} を 23.5MPa (240kg/cm²) とした。

実験は柱頂部の水平荷重・載荷点の水平変位制御で、一定の軸圧縮力と単調水平荷重または変動繰り返し水平荷重を載荷して行った。無次元化のため用いられた記号 δ_{yo} は、次式で示される。

$$\delta_{yo} = \frac{H_{yo} h^3}{3EI}, \quad H_{yo} = \frac{M_y}{h} \quad (3, 4)$$

ここで、 M_y = 鋼断面の降伏モーメント ($=W\sigma_y$)、 h = 部材長および EI = 鋼断面の曲げ剛度である。

Fig.2 には、実験終了後の供試体の様子を示してある。図中の二重線で描いたところには、ダイアフラムが設けられており、その上部は中空鋼断面で、下部はコンクリート充填部分である。

充填コンクリート最上部にダイアフラムがある場合で $l_c/h=0.3$ の供試体 (Fig.2(a)) について破壊の様子を述べる。この場合には微小な座屈変形が柱基部のフランジパネルに生じ、ついでコンクリート充填部のすぐ上の中空断面のフランジパネルに局部座屈が生じた。その後、載荷が進むにつれて中空断面部の局部座屈は進展したが、柱基部の局部座屈はほとんど進展していかなかった。補剛断面の場合、座屈してからの最初の変形はリブを節点とする 1 半波長座屈モードとなったが、局部座屈が進展するにつれて両フランジには凹状の、両ウェブには凸状の局部座屈変形が生じた。これは、補剛材に局部座屈が生じ、その機能を果たさなくなったからだと考えられる。一方、 $l_c/h=0.5$ (Fig.2(b)) の場合には、局部座屈は柱基部にのみ発生し、鋼板の柱内部方向への変形はコンクリートで拘束されているためフランジ、ウェブともに外側方向に変形が生じ、しかも小さいものであった。また載荷を繰り返すにしたがってコンクリート充填部にのみ発生した局部座屈の大きな所に溶接割れやクラックを生じ、しだいに耐力を失っていった。

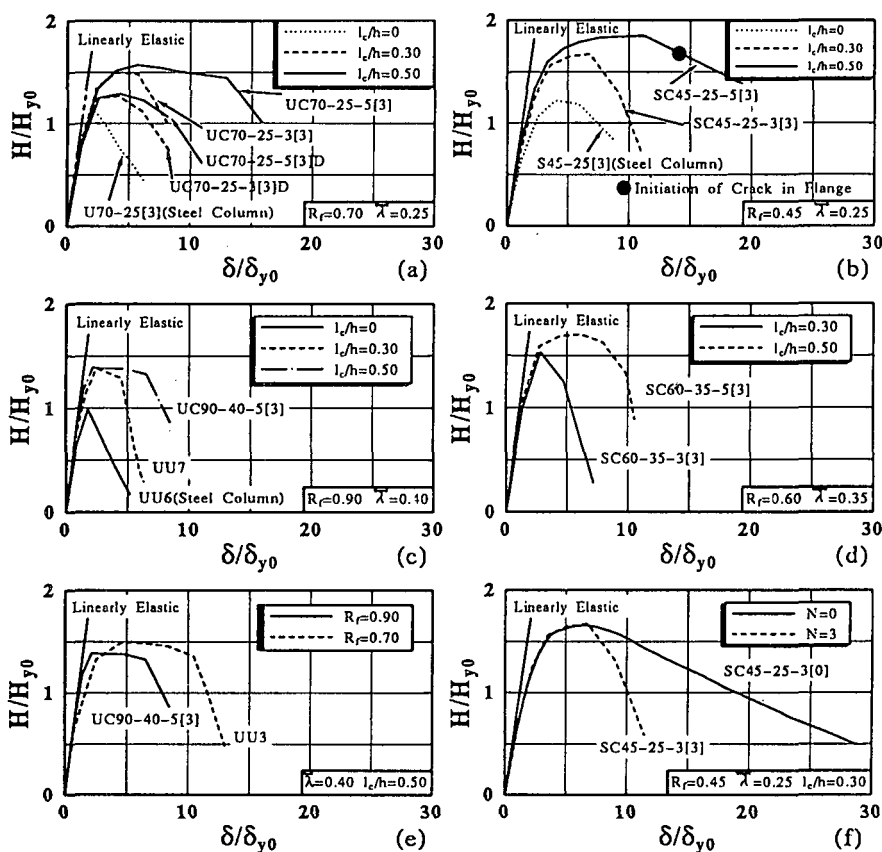


Fig.3 Envelopes of Horizontal Load — Horizontal Displacement Hysteretic Curves

充填コンクリート最上部にダイアフラムのない供試体については、 $l_c/h=0.3$ 、 0.5 ともに柱基部にのみ局部座屈変形を生じた。これは、中詰めコンクリートが柱基部近くで上下に2分割されてしまったため拘束効果がなくなり、充填コンクリートの真上の中空鋼断面に局部座屈が発生するまで荷重が上がらず柱基部の局部座屈のみが繰り返しごとに進展したものであると考えられる。

Fig.3 に水平荷重—水平変位履歴曲線の包絡線を示す。これらの図より次のことがわかる。

a) 充填コンクリート高さの影響

無補剛断面の場合、 $R_f=0.70$ 、 $\bar{\lambda}=0.25$ のとき、鋼柱と比較すると最大荷重は $l_c/h=0.3$ については 37 %、 $l_c/h=0.5$ については 40 % 増加し、最大荷重に対応する変位はそれぞれ 1.76 倍、2.54 倍となっている (Fig.3(a))。 $R_f=0.90$ 、 $\bar{\lambda}=0.40$ のとき、鋼柱と比較すると最大荷重は $l_c/h=0.3$ 、 0.5 ともに約 40 % 増加し、最大荷重に対応する変位は鋼柱のそれより 1.2 倍となっている (Fig.3(c))。

補剛断面の場合、 $R_f=0.45$ 、 $\bar{\lambda}=0.25$ のとき、鋼柱と比較すると最大荷重は $l_c/h=0.3$ については 38 %、 $l_c/h=0.5$ については 52 % 増加し、最大荷重に対応する変位はそれぞれ 1.67 倍、2.77 倍となっている (Fig.3(b))。 $R_f=0.60$ 、 $\bar{\lambda}=0.35$ のとき、鋼柱の実験データがないため $l_c/h=0.3$ と $l_c/h=0.5$ を比較すると最大荷重は $l_c/h=0.5$ にすることにより 8 % 増加し、最大荷重に対応する変位は 2.19 倍となっている (Fig.3(d))。

以上のことより、充填コンクリート最上部にダイアフラムがある場合、無補剛断面、補剛断面ともに、コンクリートを充填することにより最大荷重および変形能はかなり増加することがわかった。特に、充填率を 50 % にすることによりその傾向は顕著にみられる。また、幅厚比パラメータ、細長比パラメータが小さい方が変形能の増大率がより大きい。

b) 幅厚比パラメータの影響

無補剛箱形断面 $\bar{\lambda}=0.40$ 、 $l_c/h=0.5$ の場合、幅厚比を0.90から0.70にすると最高荷重は10%増加し、それに対応する変位は2.48倍となり、ダクティリティは改善される(Fig.3(e))。したがって、幅厚比が大きくなると、たとえコンクリートを充填しても、無次元した強度や変形性能は小さくなる。

c) 繰り返し数の影響

単調載荷($N=0$)と繰り返し載荷実験結果を比較すると、最高荷重、それに対応する変位はほぼ同じだが、繰り返し載荷の方が強度劣化が著しい(Fig.3(f))。

d) 中詰めコンクリートの拘束状態による影響

充填コンクリート最上部のダイアフラムがない場合とある場合を比較するとダイアフラムがある場合の方が最高荷重は $l_c/h=0.3$ については20%、 $l_c/h=0.5$ については22%増加する(Fig.3(a))。ところが、最高荷重に対応する変位はそれぞれ1倍、1.3倍となっている。Fig.3(a)からわかるように、ダクティリティは $l_c/h=0.3$ の場合にはあまり改善されないが、 $l_c/h=0.5$ の場合にはダイアフラムがあるとかなり改善される。これはダイアフラムがあるとコンクリートが拘束されコンクリートが担う荷重が増加する。しかし、ダイアフラムがない場合コンクリートが拘束されずコンクリートが担う荷重が少なく鋼板が受け持つ荷重が多くなるためと考えられる。

充填コンクリート最上部のダイアフラムがない場合、充填率の影響は最高荷重に達するまではほとんど影響がなく、その後 $l_c/h=0.3$ の方が $l_c/h=0.5$ の場合と比べ強度劣化が著しい。一方、鋼柱と比較すると、最高荷重は15%増加しそれに対応する変位は1.9倍となっている。これはコンクリートにより内側への変形が拘束されているため局部座屈変形が小さくなるためである。したがって、ダイアフラムがない場合でも、コンクリートの充填によるダクティリティの向上がある程度期待できる。

3. ハイブリッド地震応答実験

前節では、準静的実験手法により得られたコンクリート部分充填鋼柱の強度特性と変形性能を述べた。しかし、このような実験からは、実際の地震動を受けた場合の、コンクリート部分充填鋼製橋脚の動的挙動に関する情報が得られない。そこで、ハイブリッド地震応答実験³⁾を行い、実地震動が入力した場合の柱の動的挙動を求めた。入力地震波は建設省土木研究所によって提案されているLevel 2(地震時保有水平耐力照査用)地震波を用いた。

Fig.4にコンクリートを充填していない鋼柱、 $l_c/h=0.3$ 、0.5のコンクリート充填鋼柱についてI種地盤用地震波を入力した実験結果から得られた、時刻歴応答変位波形および復元力履歴曲線を示す。また、Table 2には、この3体の供試体のパラメータと実験から得られた残留変位 δ_R 、最大応答変位 δ_{max} を示してある。Fig.4とTable 2から、コンクリートを充填していない鋼柱 U70-40H[A]を、供試体長の30%および50%までコンクリートを充填した鋼柱 UC70-40-3H、UC70-40-5Hと比較すると、コンクリートの充填によって残留変位と最大応答変位が小さくなっていることがわかる。 δ_R/h について、鋼柱 U70-40H[A]の場合は1.1%であるのに対して、 $l_c/h=0.3$ の UC70-40-3H と $l_c/h=0.5$ の UC70-40-5H の場合はそれぞれ0.4%と0.3%となっている。また、最大応答変位を見てみると、 δ_{max}/δ_{yo} は、U70-40H[A]で4.15となるが、UC70-40-3H と UC70-40H[A]でそれぞれ3.27、2.63に減少している。このことから、コンクリートを充填することにより、鋼製橋脚の残留変位はかなり抑えられ、最大応答変位もある程度減少できるといえる。

4. あとがき

本研究によって得られた主な結論をまとめると以下ようになる。

(1) 充填コンクリート最上部にダイアフラムがある場合、無補剛断面、補剛断面ともに、コンクリートを充填することにより最大荷重はかなり増加(約30%)し、変形性能についてもかなり改善される。

(2) 充填コンクリート最上部にダイアフラムがない場合、充填コンクリート最上部にダイアフラムがある場合に比べエネルギー吸収量は少なく、強度や変形性能も劣る。したがって、コンクリート充填柱を設計する場合には、充填コンクリート最上部にダイアフラムを設ける方がよい。

Table 2 Parameters and Displacement Responses of Hybrid Test Specimens

Specimen	R_f	$\bar{\lambda}$	l_c/h	P/P_y	δ_R/h	δ_R/δ_{y0}	δ_{max}/δ_{y0}
U70-40H[A]	0.70	0.40	—	0.166	0.011	1.94	4.15
UC70-40-3H	0.70	0.40	0.3	0.166	0.004	0.69	3.27
UC70-40-5H	0.70	0.40	0.5	0.166	0.003	0.57	2.63

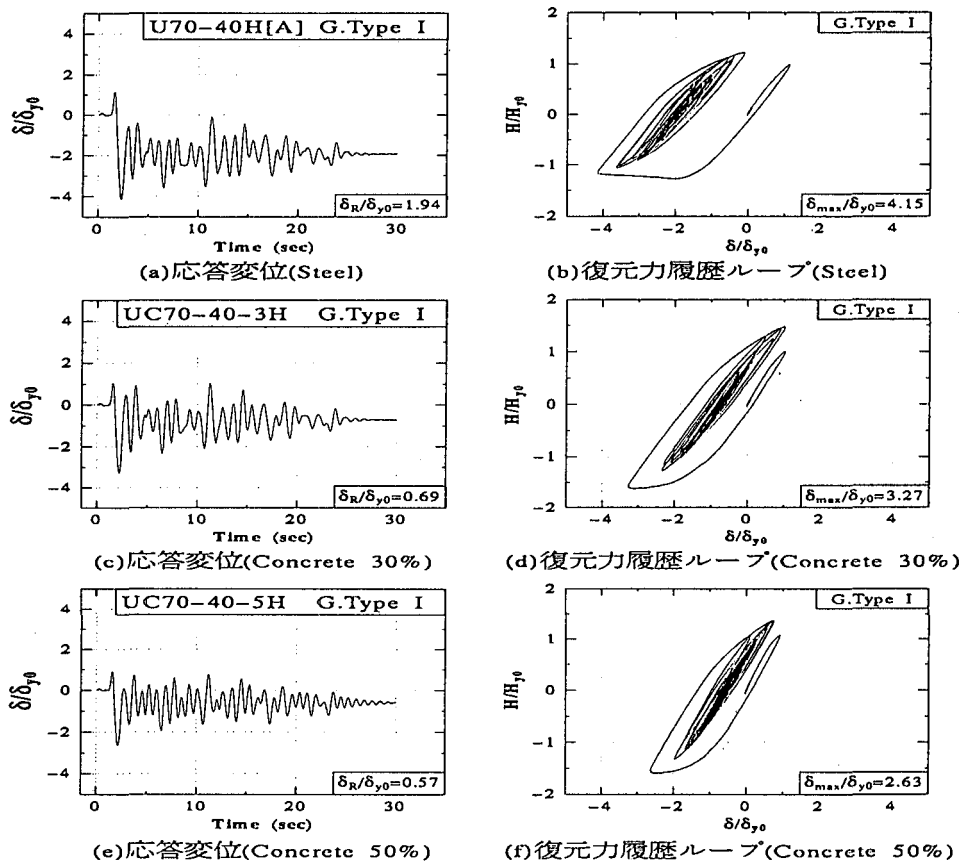


Fig.4 Comparison of Displacement Response and Restoring Force

(3) ハイブリッド地震応答実験では、鋼製橋脚にコンクリートを充填することにより、地震後の残留変位はかなり小さく抑えられ、地震時の最大応答変位もある程度減少できることがわかった。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 葛漢彬, 水谷慎吾: コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993, pp.249-262.
- 2) 葛漢彬, 宇佐美勉, 戸谷和彦: 繰返し荷重を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形能に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994, pp.163-176.
- 3) 才塚邦宏, 宇佐美勉, 木曾英滋, 伊藤義人: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 構造工学論文集, Vol.41A, 1995, pp.277-288.
- 4) 中井博, 河井章好, 吉川紀, 北田俊行, 酒造敏広: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査, 橋梁と基礎, 1982年, 6, 7月.