

繰り返し荷重を受ける箱形鋼柱の強度と変形能に及ぼすマンホールの影響

中村 雅樹*・藤井 堅**・上野谷 実***

*福山大学助手 工学部土木工学科 (〒729-02 福山市学園町1番地三蔵)

**工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒724 東広島市鏡山1丁目4-1)

***工博 福山大学教授 工学部土木工学科 (〒729-02 福山市学園町1番地三蔵)

鋼製橋脚をモデル化した箱形断面片持柱の有孔橋脚モデルと無孔橋脚モデルの2体を製作し、上部構造物の自重を想定した一定軸力のもとで水平繰り返し静的載荷実験を行った。これより、開口部が鋼製橋脚の耐荷力および変形能に与える影響および有孔橋脚モデルと無孔橋脚モデルの繰り返し挙動の相違を調べた。この結果、いずれの供試体も曲げモーメントが最も大きくなる最下端パネルの局部座屈変形の進展により崩壊した。水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線において、最大水平荷重前には開口による影響はあまり見られない。しかし、最大水平荷重以降は局部座屈の進展を受けて有孔橋脚モデルの低下が大きいことから、開口に伴う断面欠損による影響は最大耐荷力や剛性よりもむしろエネルギー吸収量に顕著に表れるといえる。

Key Words: Steel bridge pier, Man hole, Cyclic loading test, Ductility, Energy-absorption capacity

1. はじめに

鋼製橋脚では補剛板を用いた箱形構造が多用されるが、維持・管理のために開口部を設けることが多い。このような孔を有する薄肉構造部材に圧縮荷重が作用する場合、開口に伴う断面欠損や、孔周辺での応力集中の発生、また開口部で補剛材が切断されることなどに起因して、補剛板の耐荷力が低下する。

しかしながら、これらの開口部を設計する際、道路橋示方書¹⁾、各公団および公社の設計基準においては、明確な規定が設けられていないのが現状である。したがって過去の実績や設計者の経験に基づいて開口部の位置の選定、ならびに補強設計が行われてきた。

先の阪神・淡路大震災では阪神地域に甚大な被害を与えた。高速道路においては、高架橋を支える多くの鋼製橋脚の柱部材で座屈による損傷が発生したが、とりわけ柱部材基部付近の開口部(マンホール)を有する補剛板の座屈による被害が多かったのが注目されている。

兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査中間報告書²⁾によれば、鋼製橋脚のうち、損傷が著しく大きなものの割合は約1%であるが、小さな損傷まで含めると約半数が何らかの損傷を受けているという統計結果が得られている。

柱基部に開口部を設けない鋼製橋脚の耐震性能などについての研究は宇佐美ら³⁾の繰り返し弾塑性挙動に及ぼす荷重履歴の影響に関する研究、西川ら⁴⁾の既設鋼製橋

脚の耐震性能改善方法に関する研究、中井ら⁵⁾の繰り返し荷重を受ける鋼製・合成橋脚柱の耐荷性状に関する研究、渡邊ら⁶⁾のダクティリティに基づく鋼製橋脚の有効な断面形状に関する研究などがある。

一方、開口部を設けた板に対しては、小判型の開口部を設けダブル補強を施した圧縮補剛板の終局強度に関する藤井らの研究⁷⁾や、せん断力を受ける円形の開口部を設けた正方形板の強度と補強法に関する上野谷らの研究⁸⁾、さらに初期たわみがある開口板の引張座屈に関する清水らの研究⁹⁾がある。これらの研究は部分パネルあるいは単一パネルに関するものであり、鋼製橋脚をモデル化したものではない。しかしながら、9割以上の鋼製橋脚に開口部(マンホール)が設けられているにも関わらず、開口部を有する鋼製橋脚の変形性能に関する研究は未だ見受けられないようである。

そこで本研究ではこのような観点から、箱形断面片持柱を一定軸力のもとで水平繰り返し載荷実験を無孔橋脚モデルと有孔橋脚モデルについて行い、開口部が鋼製橋脚モデルの耐荷力や繰り返し力学的挙動および変形性能に与える影響を実験的に調べた。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験で用いた供試体は開口部を設けない供試体

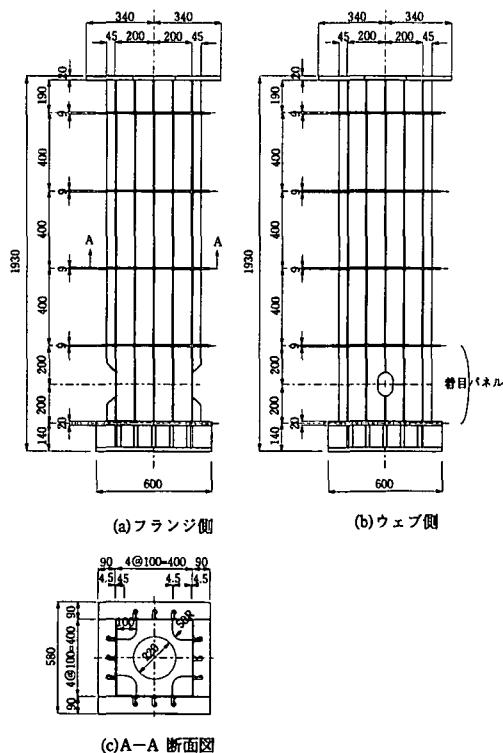


図-1 供試体(mm)

(Type-P)と開口部を設けた供試体(Type-H)の2種類である。

供試体は図-1に示すように正方形の箱形断面であり、補剛板厚4.5mm、縦方向補剛材板厚4.5mmで、材質はともにSS400である。供試体の全長は1930mmで、柱基部から400mmピッチに板厚9mmで板幅90mmの外ダイヤフラムを設置した。

変形性能を調べるための着目パネルは供試体最下部の補剛板パネルである。中央の縦方向補剛材は開口部で切断されている。開口部の形状は建設省および首都道路公団で標準的に用いられている形状(400×600mmの小判型)をもとに、供試体モデルの縮尺を考慮して80×120mmの小判型とした。開口による開口部有効断面積の欠損率は11.8%である。供試体の縦方向補剛材は箱形断面内の溶接施工上の理由および挙動の経過観察が容易になることより、箱形断面の外面に設けた。

また、図-2に示すように、供試体の4面はウェブパ

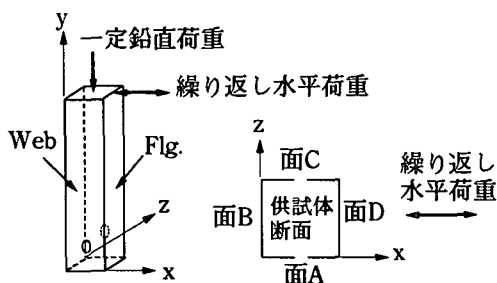


図-2 供試体の面

ネル2面をA,C面と呼び、フランジパネル2面をB,D面と呼ぶことにする。A,C面は小判型孔を有する開口面であり、供試体の偏心を避けるために開口部はA,C両面に設けることにした。

供試体の補剛板パネルの板厚($t=4.5\text{mm}$)は道路橋示方書¹⁾の基準を満足している。縦方向補剛材は文献¹⁰⁾で縦補剛材を必要剛比の3倍程度にすることにより20~40%程度塑性率の上昇が図れると報告されていることから、縦補剛材の剛比 γ_1 を縦方向補剛材の必要剛比 $\gamma_{1,req}$ の3倍となるように設計した。

鋼製橋脚モデル製作に使用した鋼材の材料特性を表-1に示す。

表-1 材料特性試験結果

試験片番号	降伏応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
NO.1	3894	4771
No.2	3809	4757
No.3	3895	4740
No.4	3863	4669

供試体の初期たわみは、図-3に示すように、橋脚モデルの下部2段の補剛板パネルを4面(A,B,C,D)について測定した。道路橋示方書¹⁾では許容初期たわみとして、補剛板全体の初期たわみ δ_1 を $a/1000$ 以下、補剛材間パネルの初期たわみ δ_2 を $b/150$ 以下と規定している。ここに、 a は圧縮軸方向の補剛板長さで、 b は補剛材間パネル幅である。その比をとった最大初期たわみを、表-2に示す。ただし、補剛板全体の初期たわみの最大値を $\delta_{1,max}$ 、補剛材間パネルの初期たわみの最大値を $\delta_{2,max}$ とする。これより、 $\delta_{1,max}$ 、および $\delta_{2,max}$ は、それぞれ道路橋示方書¹⁾の規定値をかなり上回っており、最大で規定値の約3.8倍の初期たわみが測定された。しかしType-PとType-Hの最大初期たわみはほぼ同一であった。

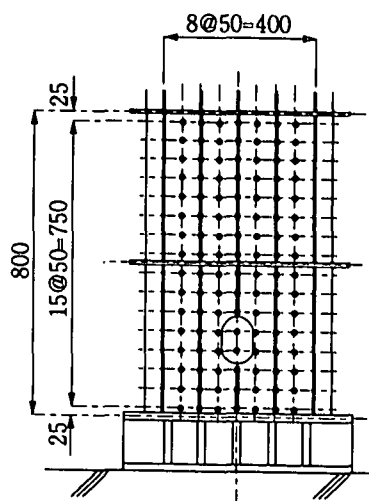


図-3 初期たわみ測定点(mm)

表-2 初期たわみの最大値

供試体	面	δ_{1max}	δ_{2max}
		a/1000	b/150
Type-P	A	2.156	3.113
	B	2.357	2.150
	C	2.501	3.200
	D	2.420	2.811
Type-H	A	2.978	2.048
	B	2.560	2.536
	C	3.786	1.608
	D	2.236	2.624

2. 2 載荷装置および方法

本実験で用いた載荷装置を写真-1に示す。実験は、まず供試体に所定の軸力を載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で柱上端部の載荷点に正負の繰り返し水平荷重を静的に載荷した。所定軸力については全断面降伏荷重の10%となるように設定した。この値は、文献¹⁰⁾によると既設鋼製橋脚(矩形断面)における軸力成分の平均的な値と考えることができる。

載荷方法は西川⁴⁾らにしたがった。供試体のフランジパネル最下端が降伏するときの載荷点の水平変位を δ_y とすると、 δ_y を片振幅とした両振り載荷を行い、以降変位 δ_y の整数倍の変位を片振幅とした両振り載荷を、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ 、…というように漸次振幅を増加させながら、十分に大きな水平変位および変形が生じ、かつ水平反力が降伏時の値よりも十分に下がるまで載荷を行った。本実験では繰り返し荷重の載荷条件として、各 δ_y における繰り返し回数を1回ずつとした。

繰り返し載荷の基本変位となる δ_y は以下により算出した。

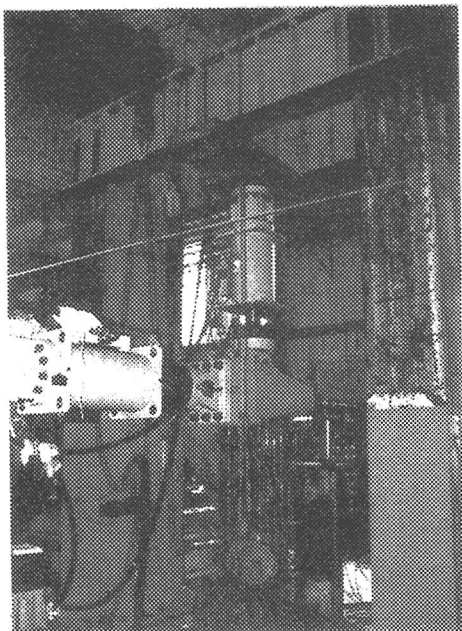


写真-1 載荷装置全体

$$\delta_y = \frac{P_h h^3}{3EI} \dots\dots (1)$$

$$P_h = \left(\sigma_y - \frac{P_v}{A} \right) \cdot \frac{Z}{h} \dots\dots (2)$$

ここで、 σ_y は鋼材の降伏応力であり、計算に際してはSS400の公称降伏応力である2400kgf/cm²を用いた。なお、Zは断面係数である。

本載荷に当たって、供試体の剛体回転を削除するためにベースプレートの変位測定も併せて行った。

また、荷重チェックの意味を含め、弾性域における予備載荷を行った。予備載荷では、軸力と水平荷重を別々に載荷し、フランジパネルの軸ひずみとウェブパネルのせん断ひずみを理論値と比較して大きな差は見られないことを確認した。

本実験では、着目する補剛板パネルの応力状態を明らかにするために、Type-Pで37点、Type-Hで81点についての軸ひずみ、およびせん断ひずみを測定した。水平変位および局部座屈については、フランジパネル(面B)において供試体の水平変位を、また、面A,B,C,Dの4面すべての補剛板パネルにおいて面外変位を測定した。

3. 実験結果と考察

3. 1 水平荷重-水平変位関係

供試体の水平荷重-水平変位曲線(ヒステリシスループ)を図-4(Type-P)および図-5(Type-H)に示す。座標軸は水平荷重Pと水平変位 δ を P_y と δ_y で無次元化している。図中の矢印は経過観察における観察時点を示している。また、その観察内容を表-3(Type-P)および表-4(Type-H)に示す。これらの図に示したヒステリシスループは、供試体を固定しているアンカーボルトの伸びなど柱基部の剛体回転による変位を、ベースプレート上の4点の変位計で測定した鉛直変位を用いて回転角を算出し、水平変位の補正を行ったものである。

Type-PとType-Hのヒステリシスループを比較すると、 $2\delta_y$ までは水平荷重、水平変位は2体ともほとんど同じようなループを描くが、 $3\delta_y$ 付近でType-Pは最高荷重に達するのに対して、Type-Hでは $3\delta_y$ に達する前に最高荷重を記録しており、 $3\delta_y$ の時点ではType-Pの場合の水平荷重よりも低くなっていることが分かる。また、水平荷重がピークを越えてから、つまり $3\delta_y$ 付近以降Type-Pの1ループごとの耐力低下に比べてType-Hの1ループごとの耐力低下が比較的大きくなっていることが分かる。

2体の供試体の挙動を比較すると、Type-PもType-Hもフランジパネルの縦補剛材はほぼ $2\delta_y$ 付近から変形がみられ、ウェブパネルの縦補剛材はほぼ $3\delta_y$ 付近から変形がみられる。このときウェブパネルにおいて、Type

-Pでは縦補剛材の変形方向がランダムなのに対して、Type-Hでは開口部を挟む縦補剛材の自由辺が開口部側に変形するのが特徴的である。Type-Pでは、水平変位 4δ の時点(点c)でのウェブパネルの圧縮側は、 -4δ の時点(点e)で引張を受けてほぼ元の形状に戻り角部も直線を保っているのに対し、Type-Hでは、水平変位 3δ の時点(点f)のウェブパネルの圧縮側は、 -3δ の時点(点h)でほぼ元の形状に戻り、角部も直線を保ってはいるものの、開口部付近のウェブパネルの変形が元の形状に戻らなくなっている。水平変位 4δ 、

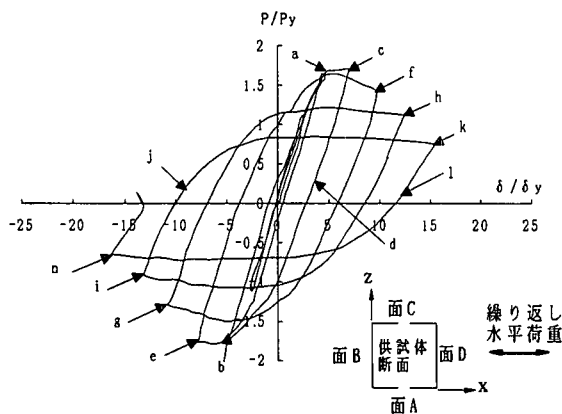


図-4 水平荷重-水平変位曲線 (Type-P)

表-3 鋼製橋脚の経過観察(Type-P)

点	観 察 内 容
a	面B(フランジパネル)の中央付近において面C側(ウェブパネル)の縦補剛材が変形し始める。
b	面D(フランジパネル)の中央付近において縦補剛材の変形が始まる。
c	面Bの全ての縦補剛材が座屈する。
d	面A,C(ウェブパネル)の面B側の縦補剛材が座屈する。面Bの補剛板に若干の変形が始まる。
e	面Dにおいても補剛板の変形が始まる。点bよりも変形が増大。点eの面Bの変形はほぼ元に戻る。
f	面A,CのB面側の縦補剛材が大きく座屈し、補剛板の変形も見られる。面Bの補剛板は点dの時より変形が大きくなり2モードの座屈が見られる。B面側の角部に変形が見られるが、D面側の角部は直線を保っている。
g	面D側の角部に変形が見られる。面A,Cの面D側の縦補剛材が大きく座屈し、補剛板にも変形が見られる。点fの角部の変形は多少あるが元に戻る。
h	面A,Cの座屈モードの並びがV字状になる。
i	面Bの変形が引張を受けても元に戻らない。
j	面Dの角部において溶接線直角方向に亀裂が入る。
k	点jでの亀裂が大きく口を開く。
l	面Bにも亀裂が入る。
m	点kと同様亀裂が大きく口を開く。面Dの亀裂は口を閉じる。

の時点(点j)では既に補剛板の変形が大きくなっており、引張を受けても元の形状には戻らず角部で大きな変形がみられた。角溶接部の亀裂もType-Pでは -5δ 、過ぎた時点(点j)で発生したのに対し、Type-Hでは -4δ を過ぎた時点(点l)で発生した。さらに水平変位が大きくなると開口部は、くの字形に変形していき、 6δ の時点で両供試体を比較すると全てのパネルにおいてType-Hのほうが大きく変形していた。また、Type

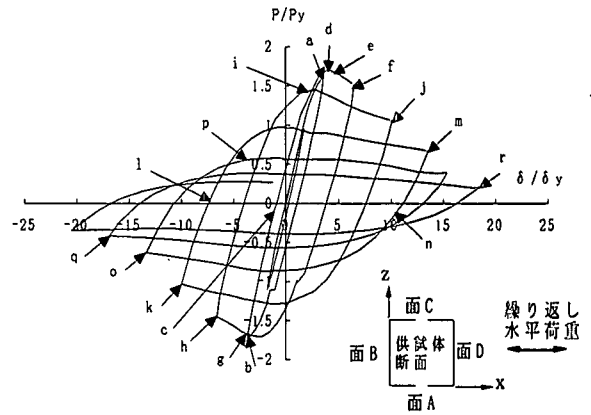


図-5 水平荷重-水平変位曲線 (Type-H)

表-4 鋼製橋脚の経過観察(Type-H)

点	観 察 内 容
a	面B(フランジパネル)の縦補剛材が変形し始める。
b	面D(フランジパネル)の中央付近において縦補剛材の変形が始まる。
c	面A,C(ウェブパネル)の縦補剛材が少し変形する。
d	面Bで縦補剛材が少し座屈する。
e	面Bで縦補剛材の中央が座屈する。
f	面A,Cにおいて1.5波の座屈モードを生じる。開口部の面B側で凹状に変形する。
g	面Dの縦補剛材の変形が増し、補剛板も変形する。
h	面Bが元の状態に戻る。面Dが凹状に変形し開口部の面B側はほぼ元に戻る。
i	面A,C側の変形は元に戻らず、凹状に変形する。
j	面A,C側の変形は元に戻らず、面Bの角部が大きく変形する。
k	面Bの角部の変形が完全に元に戻らない。面Dの角部が大きく変形する。開口部の変形がさらに増す。
l	面Dと面Cとの角部が溶接線直角方向に亀裂が音を発して入る。
m	面Dと面Cとの角部大きく口を開く。
n	面Bと面Aとの角部に亀裂が入る。
o	面Bと面Aとの角部の亀裂が大きく口を開く。面Dと面Cとの角部の亀裂の口が閉じる。
p	面Dと面Aとの角部に亀裂が入る。開口部は完全にくの字形に変形し、面Dの中央部が大きく凹む。
q	面Bの補剛材の溶接線に沿って亀裂が入る。
r	面Bの両角部がN字型に変形する。

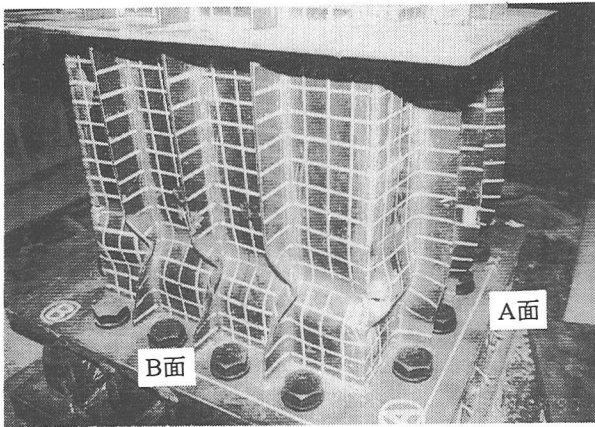


写真-2 供試体基部の局部座屈および亀裂 (Type-P, 6δ)

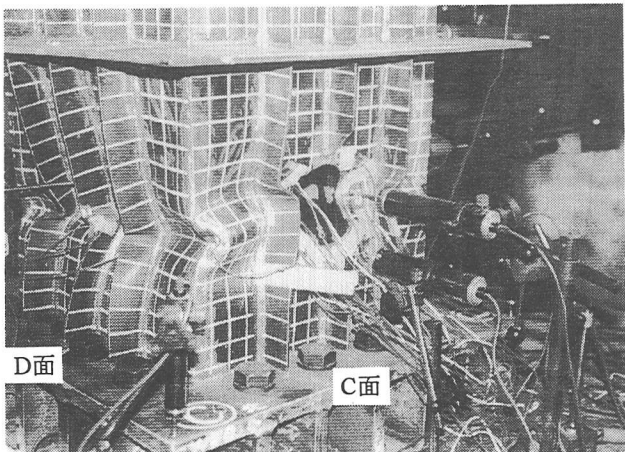


写真-3 供試体基部の局部座屈 (Type-H, 5δ)

—Pのウェブ面では幅方向に2波の座屈モードが見られるが、Type-Hのウェブ面では幅方向に1.5波の座屈モードが見られる。この座屈モードの違いは、Type-Pでは中央の縦補剛材が有効に働いているが、Type-Hでは開口により中央の縦補剛材が切断されているためと考えられる。

実験供試体は、供試体下部の両フランジパネル(面B,D)に凹状の局部座屈、両ウェブ面(面A,C)に凹凸状の局部座屈波形が最高荷重付近で見られ、逆方向に水平荷重が加わっても座屈波形は完全に戻らず、その振幅が荷重の繰り返しごとに大きくなって耐力を失っていった。Type

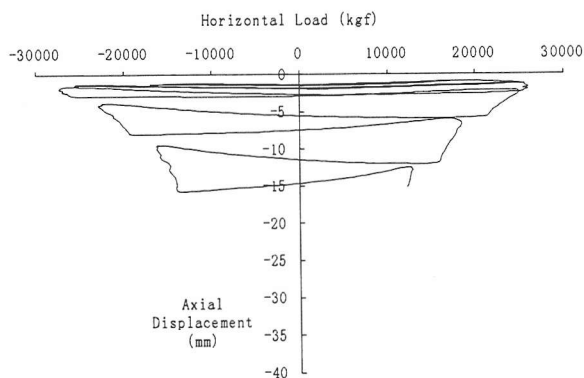


図-6 水平荷重-鉛直変位履歴曲線 (Type-P)

—P, Type-Hともに水平耐力がかなり低下した状態で、橋脚角部の完全溶け込み溶接線に直角方向の亀裂が観察された。

鋼製橋脚基部の局部座屈状況などについて写真-2および写真-3に示す。写真-2はType-P(6δ)のA面(ウェブ)およびB面(フランジ)の局部座屈とB面の両隅角部に溶接線直角方向に生じた亀裂である。また、写真-3はType-H(5δ)のC面(ウェブ)およびD面(フランジ)の局部座屈である。

3.2 水平荷重-鉛直変位履歴曲線

図-6 (Type-P)および図-7 (Type-H)は水平荷重と供試体頂部で測定した供試体の軸方向変位量の履歴曲線である。これより、初期の状態では供試体の軸方向変位は鉛直荷重により生じるが、その後は水平荷重による柱の局部座屈によって生じる。最大水平荷重後の軸方向変位は、主として局部座屈や補剛パネルの損傷(亀裂)によるものと考えられる。Type-PとType-Hの鉛直変位量を比較すると、2δの時点ではほぼ同じであるが、4δになるとType-Hの鉛直変位量はType-Pより約1.5倍になっている。従って、軸方向変位量の大きさは、部材の損傷度を表す指標の一つとなると考えられる。

また、Type-Hでは、ウェブパネル開口部圧縮側の変形ははっきりと確認(表-4参照)された最高水平荷重点3δ(点f)付近以降、軸方向縮み量は急激に増加している。Type-Pでも最高荷重点以降、Type-Hほどではないが増加している。このことは最高荷重近辺で局部座屈が発生したことを意味し、水平荷重-水平変位曲線のところで述べたことと一致する。すなわち、開口部のないType-Pの鉛直変位増加量が開口部を有するType-Hの増加量に比べて小さいのは、局部座屈変形がType-Hよりも小さいためである。

4. 結論

本研究では、2体の鋼製橋脚モデル(有孔供試体1体、無孔供試体1体)を用いて、上部構造物の自重を考慮した一定軸圧縮荷重のもとで地震力を想定した、繰り返した

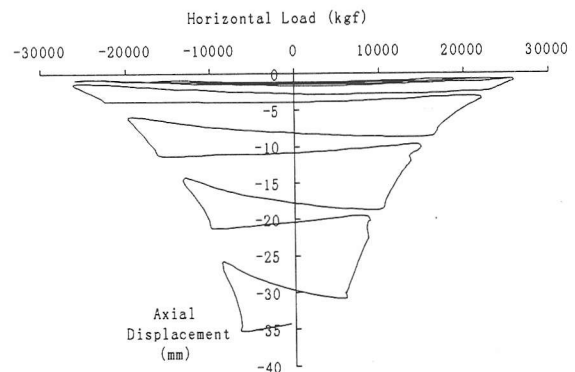


図-7 水平荷重-鉛直変位履歴曲線 (Type-H)

水平荷重を静的に載荷する実験を行い、開口部が鋼製橋脚の変形性能に与える影響や有孔補剛板における耐荷力および繰り返し力学的挙動の相違を実験的に調べた。実験結果から次のことが明らかになった。

- 1) いずれの供試体も、最下端ベースプレート直上部のパネルの局部座屈変形の進行により崩壊に至った。
- 2) 開口により耐荷力、剛性が低下する。
- 3) 水平荷重-水平変位履歴曲線から見た包絡線は、最大水平荷重前には開口による影響はあまり見られないが、最大水平荷重以降は局部座屈の進展を受けて有孔供試体の方が低下が大きい。
- 4) 開口による断面欠損の影響は最大耐荷力や剛性よりもむしろエネルギー吸収量つまり変形能に顕著に表れるといえる。

なお、今回は塑性率およびエネルギー吸収能の定量的な定義式などを記述していないが、これらについては機会を改めて報告するつもりである。

最後に、本実験に際しまして(社)鋼材倶楽部並びにウエスコ土木技術振興基金より資金協力を得た。また、川田工業(株)より供試体の製作において援助を頂いた。この場をかりてお礼申し上げます。

参考文献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編およびⅡ鋼橋編），丸善，1994
- 2)兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査中間報告書，

1995.3

- 3)宇佐見勉，坂野茂，是津文章，青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動に及ぼす荷重履歴の影響，構造工学論文集 Vol.39A, pp.235-247, 1993.3
- 4)西川和廣，山本悟司，名取暢，寺尾圭史，安波博道，寺田昌弘：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究，構造工学論文集Vol.42A, 1996.3, pp.975-986
- 5)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, 1995.4
- 6)渡邊英一，杉浦邦征，播本章一，長谷川敏之：ダクティリティに基づく鋼製橋脚の有効な断面形状に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.38A, pp.133-142, 1992.3
- 7)藤井堅，藤枝洋二，佐藤誠：圧縮を受ける有孔補剛板の補強と終局挙動，構造工学論文集 Vol.39A, pp.133-142, 1993.3
- 8)上野谷実，大村裕：円孔を有する固定支持正方形板の弾塑性座屈に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.39A, pp.145-154, 1993.3
- 9)清水茂，吉田俊弥：面外初期たわみのある有孔板の大変形解析，構造工学論文集Vol.38A, pp.357-368, 1992.3
- 10)中井博，堀江佳平，北田俊行，祝賢治，鈴木巖：開口部を有する圧縮補剛板の実績調査，橋梁と基礎，pp.31-38, 1996.9
- 11)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，丸善，1994

(1997年3月31日受付)

INFLUENCE OF OPENING ON STRENGTH AND DUCTILITY OF STEEL BOX COLUMNS UNDER CYCLIC LOADING

Masaki NAKAMURA , Katashi FUJII and Minoru UENOYA

Cyclic loading tests were carried out to clarify the influence of an opening on the cyclic behavior of cantilever steel columns modeling bridge pier where an opening would be usually made for maintenance or construction work. Under the constant axial force which was kept about 10% of the compressive strength of the specimen without the opening, lateral cyclic displacement was applied increasingly. The square box specimens were two of with and without the openings which were perforated on the webs of the bottom panel. Whole same conditions were adopted between two specimens, such as dimensions, used materials and loading conditions except the perforation. Though the maximum ultimate strength is almost the same, from the results, the residual strength and the energy absorption remarkably decrease with every cycle due to the opening after the maximum lateral load.