

定軸力と2方向繰り返し水平力をうけるH形鋼柱の弾塑性挙動

Elasto-plastic Behavior of Steel H-Columns under Bi-directional Horizontal Force and Constant Axial Force

田中 尚*・高梨 晃一*・谷口 英武*・岩田 延功*

Hisashi TANAKA, Koichi TAKANASHI, Hidetake TANIGUCHI and Nobukatsu IWATA

1. 序

現在の設計法では、通常、骨組を平面骨組に分解し、その構面内の外力に対して設計を行う。しかし、一般に地震力等は、建物平面の任意方向に作用し、柱も現実には、2方向曲げ、せん断力、ねじりを受ける。鉄骨造の建物の柱としてH形鋼が多く用いられるが、この種の断面では曲げ耐力や剛性が、強軸まわりと弱軸まわりではかなりの差があり、方向性が強い。そのため、2方向外力を受けるH形鋼柱の弾塑性性状を把握しておく必要がある。本報告では、定軸力下で2方向繰り返し水平力を受けるH形鋼柱の実験結果を報告し、このような柱の弾塑性挙動をある程度予測できる簡単な数値解析法の検討を行う。

2. 実験方法

実験の対象としたのは、両端で剛な床に固定され、柱頭で水平2方向に変位をうける柱である。図1に実験装置の一部と試験体の写真を示す。試験体は6mm厚の鋼板(SS41)を隅内溶接で組み立てたH-70×70×6×6で両端部にはベースプレートが溶接されている。試験体の断面形状、断面諸量を表1に示す。実験では、水平力加力点の上下2体を1組として使用し、中央の加力治具とともに一体となるように高力ボルトで緊結されている。試験体上端は加力用鉄骨フレームに高力ボルトにより固定されており、下端は材軸方向変位のみ追従可能(両主軸まわりの回転、両主軸方向変位、ねじれ変形は拘束)

な治具に固定されている。軸力はこの治具を介してアクチュエータにより加えられる。軸力の大きさは、試験体の降伏軸力の30%とし、実験中は一定となるように荷重制御されている。2方向水平変位は、水平面内で直交(試験体の強軸方向、および、弱軸方向)して配置された2台の電気油圧式アクチュエータにより試験体中央の加力治具に加えられ、表2に示す5種類の変位を変位制御により加える。実験は、段階的に振幅を大きくし、各振幅で5回ずつ繰り返し載荷を行う。繰り返すごとに耐力が低下して履歴ループが乱れるまで行った。

3. 実験結果

BBC-3~5についての結果を図2~4に示す。各(a)図は水平荷重の強軸方向成分 Q_y と変位の強軸方向成分 v の関係を、(b)図は水平荷重の弱軸方向成分 Q_x と変位の弱軸方向成分 u の関係を、(c)図は復元力動態曲線(縦軸 Q_y 、横軸 Q_x)をそれぞれ示している。BBC-3, 4の結果についてみると、 Q_y-v 関係は紡錘形を示しており、ループの安定が失われるまでは振幅の増加に伴い Q_y も大きくなる。特に強軸曲げ成分が大きいBBC-3では、強軸曲げのみを受ける柱の復元力特性に近い形をしており、繰り返すごとに Q_y が上昇する現象がみられる。一方、 Q_x-u 関係では、負勾配が顕著にあらわれ、振幅の増加に伴う耐力の上昇はほとんどなく、BBC-3では逆に減少している。復元力動態曲線は、弾性

表1 試験体形状と断面諸量

Specimen	h (cm)	B/t_f	H/t_w	A (cm ²)	λ_x	λ_y	M_{rx} (t·cm)	M_{ry} (t·cm)	M_{px} (t·cm)	M_{py} (t·cm)
BBC-1	89.0	11.9	11.5	11.7	31.9	53.1	88.6	32.4	103.2	50.2
BBC-2	89.0	12.0	11.5	11.6	31.8	53.3	88.8	32.4	103.4	50.1
BBC-3	88.9	12.0	11.5	11.7	31.8	53.1	88.9	32.3	103.4	50.0
BBC-4	89.0	12.0	11.5	11.7	31.9	53.2	88.7	32.3	103.2	50.0
BBC-5	89.1	12.0	11.5	11.6	31.9	53.2	88.4	32.2	102.9	50.0

値は、上下2体の平均値、 h : 部材長、 B : フランジ幅、 H : 部材せい、 t_f : フランジ厚、 t_w : ウェブ厚、 A : 断面積、 $\lambda_x(\lambda_y)$: 強軸(弱軸)まわり細長化、 $M_{rx}(M_{ry})$: 強軸(弱軸)まわり降伏モーメント、 $M_{px}(M_{py})$: 強軸(弱軸)まわり全塑性モーメント

* 東京大学生産技術研究所 第5部

表2 載荷方法

TEST	BBC-1	BBC-2	BBC-3	BBC-4	BBC-5				
$u : v$									
			$u_y : 2 \cdot v_y$	$u_y : v_y$	$u_y : v_y$				
RUN		u (cm)	Number of cycles	u (cm)	Number of cycles	u (cm)	Number of cycles	u (cm)	Number of cycles
1	Monotonic loading	.95	5	.20	5	.25	5	.50	5
2		1.95	5	.45	5	.50	5	1.00	5
3		2.65	5	.65	5	.75	5	1.50	5
4		3.60	5	.90	5	1.00	5	2.00	5
5		4.50	5	1.10	5	1.30	5	2.50	5
6		5.40	5	1.25	5	1.55	5		5
7						1.80	5		
8						2.10	5		
9						2.35	5		
10						2.60	5		
11						2.90	5		
12						3.15	5		
13						3.45	5		

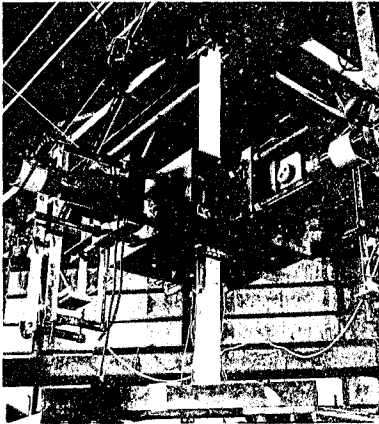


図1 試験体と加力点

時には直線である。しかし、振幅が大きくなると、除荷時には、弾性時とほぼ平行な直線を示すが、断面の塑性化につれ、 Q_y の増加に対し、 Q_x はあまり増加しない、もしくは減少するため、図中の矢印の方向に曲がり、ふくらみを持ったループとなる。振幅の増加に伴い、除荷点は Q_y 軸に近づき、除荷点がほぼ Q_y 軸上になった時すなわち、復元力の弱軸成分 Q_x がほぼ0となった時、ループの安定が失われた。BBC-5では、 u と v の動きにつれ、 Q_y-v 関係、 Q_x-u 関係は複雑に変化する。(a), (b), (c) の各グラフの対応を明らかにするため、最後のループについて、対応する点の番号を付しておく。復元力動態曲線を見ると、振幅が小さい時には、変位履歴に対応した楕円を示すが、振幅が大きくなるにつれ、強軸方向変位 v が最大となる側 (グラフ上①, ⑤) では

復元力が上昇するのに対し、弱軸方向変位 u が最大となる側 (グラフ上③, ⑦) ではあまり復元力の上昇がないため、しだいにループが歪むことがわかる。

各(c) 図中に塑性設計指針に示されている耐力式¹⁾

$$\frac{N}{N_{crm}} + \frac{C_x M_{1x}}{(1-N/N_{Ex})M_{cr}} + \frac{C_y \cdot M_{1y}}{(1-N/N_{Ey})M_{py}} = 1.0 \quad (1)$$

を破線で、Chen らが提唱している耐力式²⁾

$$(M_x/M_{ucx})^\beta + (M_y/M_{ucy})^\beta = 1.0 \quad (2)$$

ここで $\beta = 1.40 + p$

を一点鎖線で示す。相関関係が直線となる塑性設計指針の耐力式は安全側であり、Chen らが提案している曲線式は、より現実に近い相関関係を示していると言える。

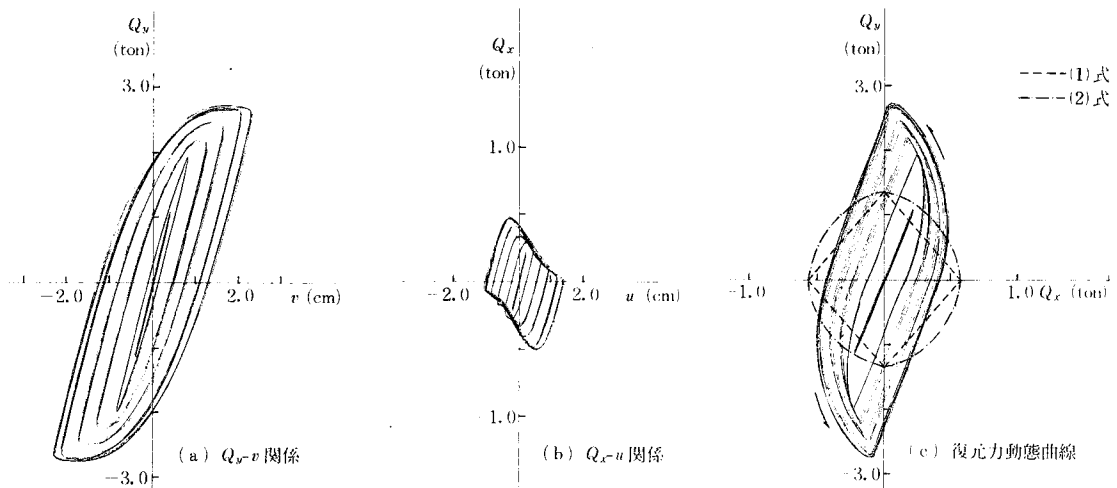


図2 BBC-3 実験結果

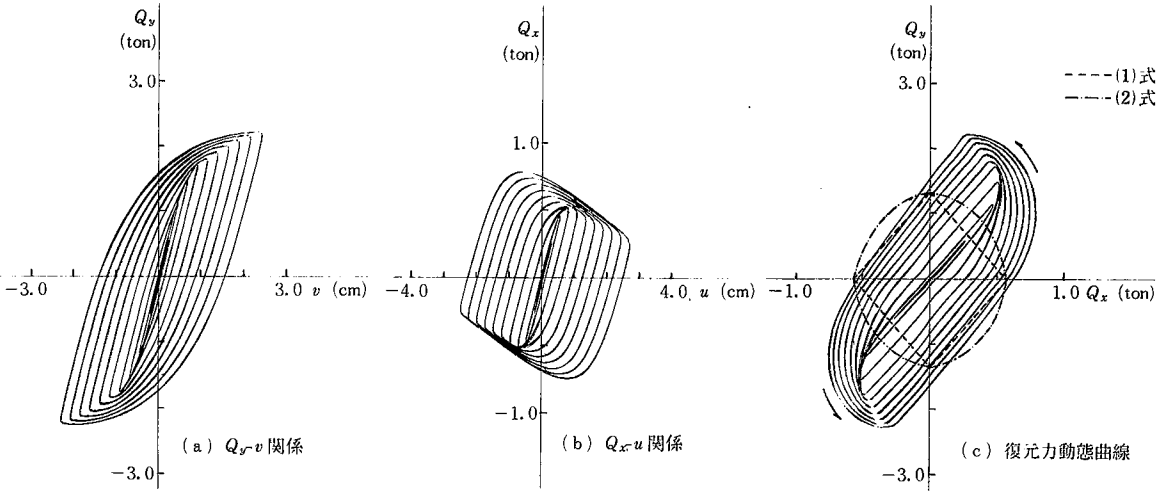


図3 BBC-4 実験結果

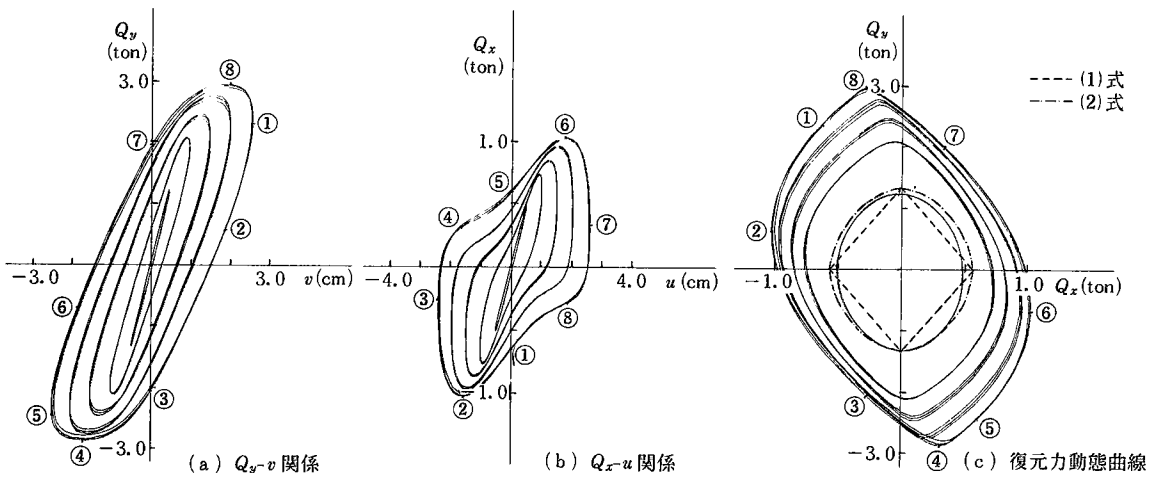


図4 BBC-5 実験結果

4. 数値解析

数値解析により2方向水平力を受ける柱の弾塑性挙動をどの程度シミュレートできるかを検討した。解析上の仮定は次のとおりである。

- (1) 応力、歪の成分は、断面垂直成分のみを考える。
- (2) 断面の平面は保持される。
- (3) 軸力は柱軸に沿って一定である。
- (4) 振れ変形、捩りモーメントは考えない。
- (5) 局部座屈、曲げ振れ座屈はおきないものとする。
- (6) 微小変形

試験体は逆対称変形するので、試験体1体の半分の片持梁について解析を行う。解析は増分計算により弾塑

性挙動を追跡する。増分量を・をつけて表すとする。軸力と両主軸まわりの曲げモーメントについての釣合式は、増分により表すと、次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{M}_x - \dot{Q}_y \cdot Z - P \cdot \dot{v} - \dot{P} \cdot v &= 0 \\ -\dot{M}_y - \dot{Q}_x \cdot Z - P \cdot \dot{u} - \dot{P} \cdot u &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、軸力が一定の時は、 $\dot{P}=0$ であるから、合応力増分は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{M}_x &= K_{xx} \dot{\kappa}_x + K_{xy} \dot{\kappa}_y \\ -\dot{M}_y &= K_{yx} \dot{\kappa}_x + K_{yy} \dot{\kappa}_y \end{aligned} \quad (4)$$

ただし, $K_{xx} = \int \bar{E}Y^2 dA - (\int \bar{E}Y dA)^2 / (\int \bar{E} dA)$

$$K_{xy} = K_{yz} = \int \bar{E}XY dA - (\int \bar{E}X dA)(\int \bar{E}Y dA) / (\int \bar{E} dA) \quad (5)$$

$$K_{yy} = \int \bar{E}X^2 dA - (\int \bar{E}X dA)^2 / (\int \bar{E} dA)$$

$$\kappa_x = -d^2 v / dZ^2$$

$$\kappa_y = -d^2 u / dZ^2$$

\bar{E} は接線剛性

図5に示すように部材を材軸方向に6分割し、釣合式(3)式を差分法により解く。その際、各分割点における剛性(5)式は、各分割点で断面を図6に示すように微小要素に分割して、数値積分により計算される。応力-歪関係は、図7に示す Tri-linear model を仮定した。

図8に実験結果と解析結果の比較の一例を示すが、数値解析結果は、実験結果をよく再現できている。

5. 結 論

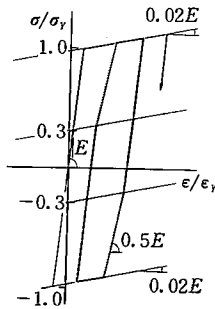
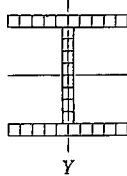
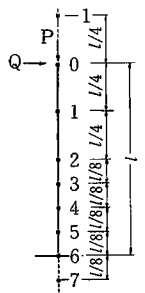


図5 部材の分割

図6 断面の分割

図7 応力-歪関係

ここで得られた結果は次のようにまとめられる。

(1) 繰り返し载荷により、復元力の強軸方向成分は、上昇を期待できるが、弱軸方向成分はあまり上昇せず、負勾配が強くなる。そして、復元力の弱軸方向成分が0に近くなると、履歴ループの安定が失われる。

(2) 本報で示したような振れを無視した簡単な数値解析法でも、2方向水平力を受けるH形鋼柱の弾塑性挙動をある程度予測できる。

本研究をさらに発展させ、H形鋼柱の構造物に2方向地震入力があった場合、どのような応答を示すかを検討するため、電算機-試験機オンラインシステムを利用し、記録された地震波のNS,EW成分が柱の2主軸方向に同時に作用した時の崩壊過程のシミュレーションを行った。それについては別に報告する。

謝 辞

本研究は、昭和53年ならびに54年度の文部省科学研究費補助金「2方向繰り返し曲げをうける鋼柱の弾塑性挙動と耐力」(代表者田中尚) No-355239によるものである。実験遂行に当たっては、嶋脇与助、山口一夫、近藤日出夫各技官の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

(1980年1月31日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会「鋼構造塑性設計指針」
- 2) Tebedge, N. and Chen, W.F., "Design Criteria for Steel H-Columns Under Biaxial Loading" Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, No ST 3. 1974

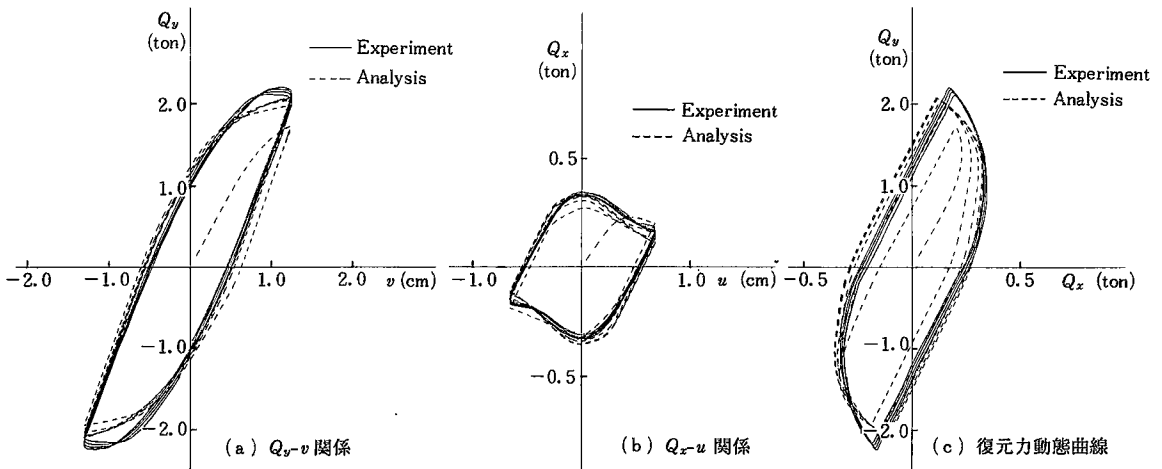


図8 実験結果と数値解析結果の比較(BBC-3, RUN 3)