

(138) 地震動を受ける鋼変断面ラーメン柱の動的弾塑性応答に関する研究

大同工業大学工学部 酒造敏廣
建設省中部地方建設局 井上英俊

【1】まえがき

弾性限度をもとにした従来の強度設計法¹⁾において、変断面構造の鋼製ラーメン柱（以下、変断面ラーメン柱、あるいは、変断面柱という）の断面構成には、激震時の繰り返し力下での弾塑性挙動はとくに考慮されていない²⁾。そのため、部材格点部や断面変化点の付近で構成断面ごとに進展する塑性変形がこの種の柱の動的応答性状にどのような影響を及ぼすかを明らかにしておく必要がある。

筆者らは、これまでに、定鉛直荷重下で繰り返し水平力を受ける変断面片持ち柱の弾塑性挙動を理論的・実験的に調べ^{3), 4)}、この種の柱は2つの相異なる崩壊モードが半サイクルごとに交番すると一種の不安定現象を呈することを示した。そして、この現象は、塑性変形箇所の残留曲げ変形によって増減するPΔモーメントが構成断面間の抵抗荷重差を相殺し、構成断面ごとの塑性曲げ変形が反対方向に進行するときに現れることを明らかにしてきた。

本研究では、主として構成断面ごとの塑性域進展による塑性ひずみの累積量に着目し、水平地震動を受ける変断面片持ち柱の動的弾塑性性状を数値解析によって調べたものである^{5), 6)}。すなわち、正弦加速度波あるいは実地震波を作用させて、柱の動的弾塑性解析を行い、①柱の倒壊パターンによる復元力特性の差異、②同じ周期特性で加速度倍率を変化させたときの柱の弾塑性性状の差異、および、③累積塑性ひずみの集中・分散からみた柱の弾塑性性状について考察する。

【2】変断面柱の動的弾塑性解析法

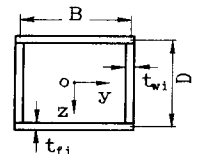
(1)解析モデル

鋼製ラーメン構造物の骨組面外の地震時変形挙動を片持ち柱にモデル化できるものとし、Fig.1に示すように、2種類の箱形断面 Sec.1(下部)および Sec.2(上部)からなり、柱基部から $kh(k=0.4)$ の位置に断面変化点がある変断面の片持ち柱を解析対象とした。ここに、 h : 柱高さ。

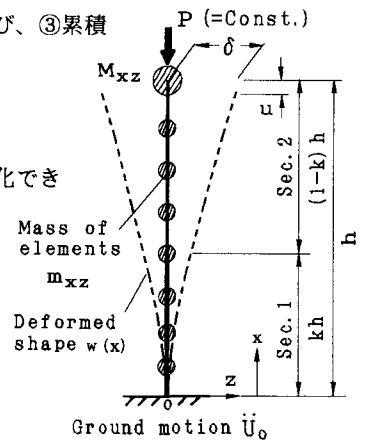
本文では柱を多自由度系にモデル化し、分割した部材要素にはLumped mass形式の質量を仮定し、かつ、柱の弾性1次固有周期 T が所定の値になるように柱頭部に付加集中質量 M_{xz} を設定した^{5), 6)}。

本文の解析で用いた柱の寸法諸元および各種パラメーターを Table 1 に示す。上・下部断面の降伏点 σ_{vi} の組み合わせを変化させて、柱を同表に示すように3つのタイプに分類した。すなわち、①Type EP: 上部断

面の降伏が先行する柱、② Type PPO、PP: 上・下部断面でほぼ同時に初期降伏に達する柱、③Type PE: 下部断面の降伏が先行する柱。これらの条件がわかるように、定鉛直荷重下で柱頭部に単調増加の水平荷重を想定して、上・下部断面で初



(a) Cross-section of Sec.i (i=1, 2)



(b) Column with variable cross-section

Fig.1 Column subjected to ground acceleration

Table 1 Dimension and properties of columns with variable cross-section

Items Type	λ_{v2}	Sec.1		Sec.2		P N _{v2}	$\frac{H_{v2}}{H_{v1}}$	M _{xz} (kg)	T (sec)
		σ_{v1} (MPa)	H _{v1} (kN)	σ_{v2} (MPa)	H _{v2} (mm)				
1) PPO	0.496	314	851	314	852	0.300	1.002	58,419	0.50
2) EP	0.438	353	960	314	812	0.333	0.845	230,955	1.00
3) PP	0.496	314	827	314	812	0.333	0.981	230,955	1.00
4) PE	0.593	314	827	353	964	0.296	1.165	230,955	1.00

Notes; 1) Dimension: $h=9,000\text{mm}$, $B=1,000\text{mm}$ and $D=750\text{mm}$, $t_{r1}=35.8\text{mm}$, $t_{w1}=26.85\text{mm}$, $t_{r2}=24.49\text{mm}$ and $t_{w2}=18.37\text{mm}$. 2) λ_{v2} : Column slenderness³⁾. 3) σ_{vi} : Yield point of Sec.i. 4) P: Constant vertical load. 5) H_{vi} : Horizontal load corresponding to initial yield of sec.i. 6) M_{xz} : See Fig.1. 7) T: Elastic natural period. 8) Type PPO: $E_t/E=1/500$. 9) Type EP, PP and PE: $E_t/E=1/100$.

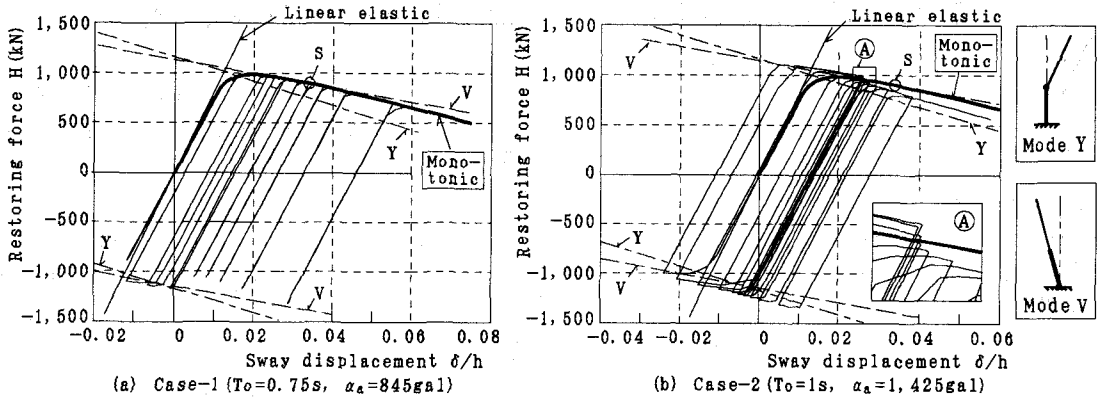


Fig. 2 Relationships between restoring force and sway displacement at the top of columns with variable cross-section (Type PPO)

期降伏に達するときの水平荷重 H_{v1} と H_{v2} （以下、単に抵抗荷重という）を求めて同表に示している。なお、Type EP、PP、および PE の柱では、軸力比 P/N_{v2} 値に差異があるが、定鉛直荷重 P の大きさは等しい。

(2) 運動方程式の数値積分と応力-ひずみ曲線

解析では減衰の影響を無視し、運動方程式の数値積分には線形加速度法を用いた（時間刻み $\Delta t \leq T/100$ ）^{7),8)}。復元力の計算に際しては、材料学的・幾何学的非線形性を考慮し、塑性領域の広がりも把握できるようにした。材料の応力 σ -ひずみ ε 関係には Bi-linear型を用い、断面の降伏は部材軸方向の応力とひずみにより評価した。ここで、 σ - ε 曲線の弾性・塑性域の勾配には、それぞれ $E=2.06 \times 10^5$ MPa および E_t (Table 1 参照) を仮定した。

【3】変断面片持ち柱の動的解析の結果とその考察

(1) 正弦加速度波を受ける変断面柱 (Type PPO)

まず、分割した部材要素の質量を無視して柱を 1 自由度系にモデル化し、水平地動加速度に正弦波 $\alpha_a \cdot \sin(2\pi t/T_0)$ を 10 秒間仮定して、Type PPO の柱の動的解析を行った。正弦波周期 T_0 と加速度振幅 α_a の組み合わせは、Case-1: $T_0=0.75s$ 、 $\alpha_a=845gal$ 、Case-2: $T_0=1s$ 、 $\alpha_a=1,425gal$ とし、柱の倒壊パターンによって、崩壊モードと復元力特性がどのように変化するかを調べた。なお、柱基部と断面変化点における局所的な塑性変形による柱の弾塑性性状を確かめるため、 $E_t=E/500$ を仮定している。

a. 柱頭部の水平復元力 H と変位 δ の関係 (復元力特性)

まず、水平復元力 H と変位 δ との関係を示す Fig. 2 に示す。同図中、太い実線は水平荷重を単調载荷したときの H - δ 曲線を示し、塑性変形の集中箇所が柱基部から断面変化点に移行した状態を点 S としている³⁾。さらに、柱基部および断面変化点に塑性ヒンジを仮定して、塑性崩壊メカニズムから求めた H - δ 曲線を、それぞれ V および Y として示す³⁾。

同図(a)は、塑性変形が 1 方向に卓越して倒壊する柱に相当する。この柱では、履歴ループに現れる δ の負方向への塑性変形量が小さいため、 H が正の範囲で各ループの最大耐力点~変位反転点の間では、ほぼ単調解析の曲線に沿って倒壊していることがわかる。

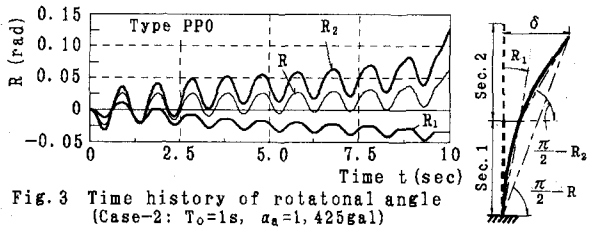


Fig. 3 Time history of rotational angle (Case-2: $T_0=1s$, $\alpha_a=1,425gal$)

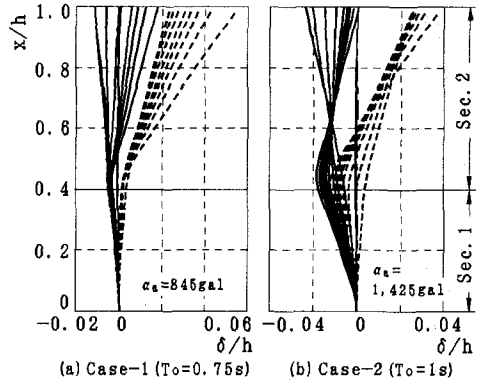


Fig. 4 Change of sway displacement modes (Type PPO)

これに対して、同図(b)は、塑性変形が正・負両方向に繰り返し現れ、上記に比べて大きな履歴ループを描きながら倒壊する柱である。Hの正側では、 $\delta/h=0.025$ の付近で、最大耐力点～除荷開始点間の勾配がモードYのそれにほぼ等しくなっており、崩壊モードがVからYに変化していると推測できる。そのため、履歴ループがHの負側に移動するという変断面柱特有の現象³⁾が見られる。

b. 部材回転角Rの時刻歴応答とたわみモード

Case-2の柱の構成断面ごとの部材回転角Rの時刻歴応答をFig. 3に示す。Rの定義は同図に示すとおりである。また、柱頭部の変位 δ が反転した時のCase-1,2のたわみモードをFig. 4にまとめる。

これらの図から、Case-2の柱では上・下部断面の部材回転角 R_1 と R_2 が残留変形の影響で正負逆方向に現れ、塑性変形箇所の交番に特有なS字形たわみモードが顕著に現れていることがわかる。

以上から、柱の塑性変形が正負両方向に大きくなる履歴ループが動的応答時に繰り返して現れると、構成断面間の抵抗荷重差が小さい柱はS字形倒壊モードを呈すると予想できる。

(2) 実地震波を受ける変断面柱 (Type EP, PP, PE)

地動加速度 $\ddot{u}_0(t)$ として、Fig. 5 に示す日本海中部地震²⁾ (修正開北橋記録) の実地震波を α_a ($=1.5 \sim 2.25$) 倍に増幅し、3つのType EP, PEおよびPPの柱の動的解析を行った ($E_t = E/100$)。ちなみに、フーリエ解析によると、この地震波の卓越周期は約0.5sである。

a. 上・下部断面の軸ひずみ・曲率の時刻歴応答

柱基部と断面変化点の上・下部断面の軸ひずみ ε 。および曲率 ϕ の時刻歴応答を Fig. 6~Fig. 7 に例示する。 ε 。および ϕ は、構成断面の降伏ひずみ ε_{yi} 。および降伏曲率 ϕ_{yi} で無次元化している。

まず、Fig. 6 ($\alpha_a = 1.75$) からわかるように、上・下部断面の抵抗荷重差が大きい Type EP の柱では、断面変化点付近の上部断面 Sec. 2 の ε 。値が、Type PP の柱に比べて約1.5倍大きく現れている。ここで、塑性軸ひずみの増大は局部座屈発生につながるため、断面変化点付近で塑性変形が集中するような変断面柱よりも、構成断面ごとに塑性変形を分散できる Type PP の柱の方が有利になると言える。なお、軸ひずみは、地震波に含まれる加速度波成分の大小に起因して、漸増するというよりも階段状にステップしながら累積していく傾向にある。

つぎに、Fig. 7 から、構成断面間の抵抗荷重がほぼ等しい Type PP の柱の弾塑性性状について、以下のことを考察できる。まず、

増幅倍率 α_a が大きくなると、 $t = 20 \sim 30$ s の区間のように、柱基部と断面変化点で累積する残留曲率の方向が異なるようになり、上述したS字形モードを呈する傾向にある。その後、2つの箇所での曲率は同一方向に激増し始めて、柱は倒壊している ($t \geq 40$ s)。このような塑性曲げ変形性状は、柱と地震波の周期特

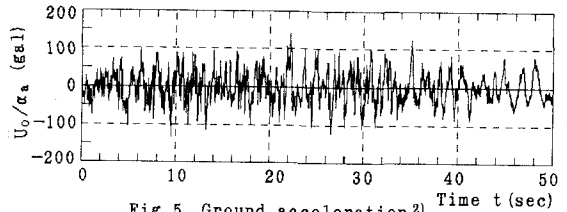


Fig. 5 Ground acceleration 2) Time t (sec)

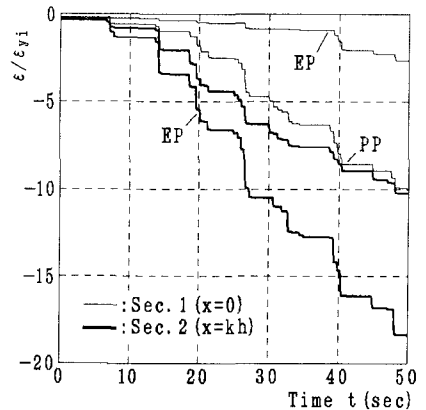


Fig. 6 Time history of uniaxial strain of sec. 1 ($x=0$) and sec. 2 ($x=kh$) ($\alpha_a=1.75$)

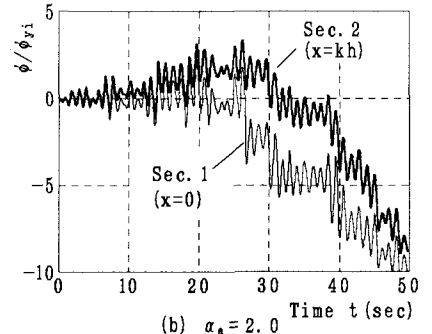
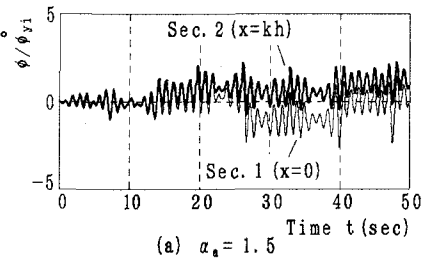


Fig. 7 Time history of curvature of cross-section (Type PP)

性に関係するため、履歴ループに現れる塑性変形のパターン等を今後調べていく必要がある。

b. 柱のたわみモードと曲率分布の変動

$\alpha_s=1.75$ のときの3種類の柱のたわみモードと曲率分布の変動をFig.8~Fig.9にまとめる。

これらの図からわかるように、上部断面で降伏が先行する Type EPの場合、断面変化点付近に塑性曲げ変形が集中し、最終的に上部断面で崩壊している。また、Type PE では、塑性化した柱基部の曲率は EP に比べて小さい。一方、上・下部断面の抵抗荷重がほぼ等しいType PP では、EP, PE に比べて残留曲率の累積量が小さく、構成断面ごとに塑性曲げ変形が分散しているといえる。

【4】まとめ

本研究では、変断面片持ち柱の動的弾塑性性状を数値解析によって調べた。主な結論は以下のとおりである。

- 1) 一方方向の塑性変形が卓越して倒壊するような柱の復元力特性は、単調増加荷重を受ける柱の荷重-変位曲線と比較的よく一致した。
- 2) 塑性変形が正負両方向に進む履歴ループが繰り返り現れて倒壊する柱では、たわみモードをS字形にするような変断面柱特有の弾塑性性状が現れる可能性がある。
- 3) 構成断面ごとの抵抗荷重間の差異が大きく断面変化点付近で塑性変形が先行する柱では、その箇所での塑性ひずみの累積が非常に大きくなる。
- 4) 本文で解析した範囲内では、柱の構成断面間の抵抗荷重差が小さいとき、累積塑性ひずみが構成断面ごとに分散する傾向にあった。
- 5) 以上から、地震波の周期特性を考慮の上、変断面柱の動的応答特性を今後さらに検討する必要がある。

【謝辞】本研究を実施するにあたり、平成4年度の文部省科学研究費・一般研究(c)、および、平成5年度の大同工業大学・研究援助金の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

【参考文献】1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II鋼橋編、1991年2月。 2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1991年2月。 3)酒造敏廣：繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の弾塑性挙動に関する研究、土木学会論文集、No.446/I-19、pp.127~136、1992年4月。 4)酒造敏廣、事口寿男、西幸二：鋼変断面片持ち柱の弾塑性履歴性状に関する基礎的実験、構造工学論文集、Vol.39A、pp.271~284、1993年3月。 5)酒造敏廣、横山知正：変断面ラーメン柱の動的弾塑性挙動に関する基礎的研究、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、I-43、1992年9月。 6)酒造敏廣、井上英俊：鋼変断面ラーメン柱の動的弾塑性挙動に関する研究、土木学会中部支部、平成4年度研究発表会講演概要集、I-1、1993年3月。 7)柴田明德：最新耐震構造解析、(株)森北出版、1985年5月。 8)Clough, R.W. and Penzien, J.: Dynamic Structures, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1974。

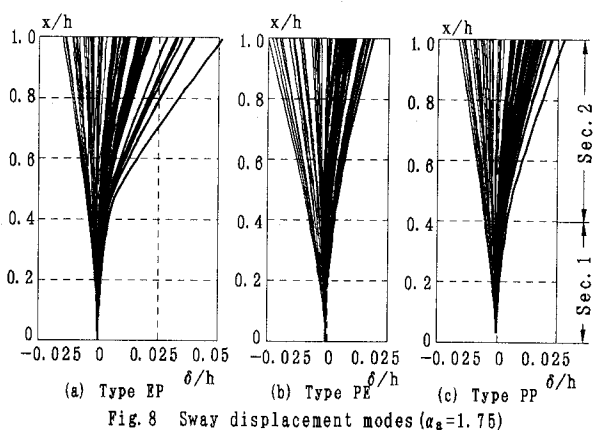


Fig. 8 Sway displacement modes ($\alpha_s=1.75$)

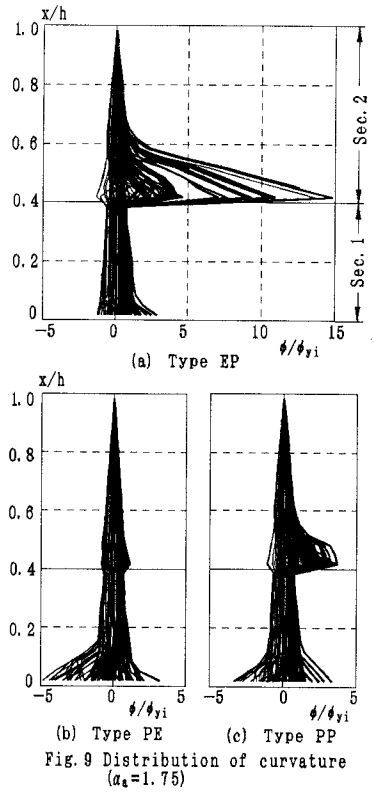


Fig. 9 Distribution of curvature ($\alpha_s=1.75$)