サブストラクチュア・オンライン実験法による鋼二層ラーメンの動的応答解析

大同工業大学大学院　学生会員　○都築　禅，山田　宰
大同工業大学　正会員　酒造　敏廣

１．まえがき

はり部材がせん断崩壊する鋼製橋脚の地震応答性状を論じるためには，著しいせん断座屈を起こす腹板の耐力変動が隅角部や柱基部の損傷にどのような影響を及ぼすかを明らかにする必要がある．

本研究では，鋼薄板に繰り返しせん断力を載荷できる実験装置[1)]を利用して，腹板のサブストラクチュア・モデルを作成し，実験と計算を組み合わせたオンライン実験手法を用いて，二層門形ラーメンの弾塑性動的応答解析を行ったものである．

２．オンライン実験法による門形ラーメンの動的弾塑性応答解析

本文では，**図１**に示すせん断崩壊するはり部材を有する二層門形ラーメンを研究対象とした．柱頭部に集中質量 m，はり中間部に回転慣性 J を仮定し，柱基部，はり中間部，および，隅角部に弾塑性回転バネ 1～4（バネ係数 k_1～k_4）を組み込んでいる．柱基部と隅角部にはバイリニア型のモーメント M－回転角 θ 関係を仮定し，はり中間部では，せん断力を受ける腹板の実験[1)]を行って $M-\theta$ 関係を直接求めている．オンライン実験法による動的応答解析の流れは**図２**に示すとおりである．

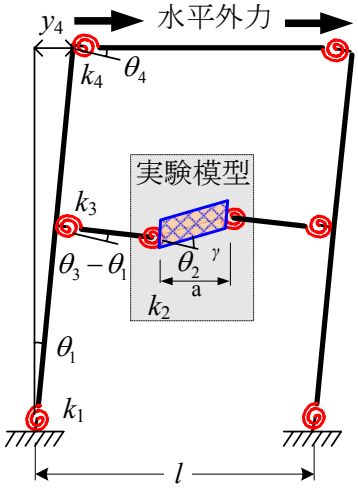


図１　二層門形ラーメン

運動方程式の数値積分には，非線形の繰り返し計算を必要とせず，数値減衰を考慮できる α－OS 法を用いた[2)]．時刻 t_{n+1} における修正子変位ベクトル $\boldsymbol{d}_{n+1}=\{y_4,\ \theta_2\}^T$ に関する運動方程式は，次式で与えられる．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{d}}_{n+1}+(1+\alpha)\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{d}}_{n+1}-\alpha\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{d}}_{n}+(1+\alpha)(\boldsymbol{K}^I\boldsymbol{d}_{n+1}+\boldsymbol{K}^E{}_{n+1}\tilde{\boldsymbol{d}}_{n+1})$$
$$-\alpha(\boldsymbol{K}^I\boldsymbol{d}_{n}+\boldsymbol{K}^E{}_{n}\tilde{\boldsymbol{d}}_{n})=(1+\alpha)\boldsymbol{H}_{n+1}-\alpha\boldsymbol{H}_{n} \quad \cdots(1)$$

ここに，$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$：質量と減衰マトリクス，$\boldsymbol{K}^I$，$\boldsymbol{K}^E$：線形・非線形部分の剛性マトリクス，$\ddot{\boldsymbol{d}}$，$\dot{\boldsymbol{d}}$：加速度と速度ベクトル，$\tilde{\boldsymbol{d}}$：予測子変位ベクトル，$\boldsymbol{H}$：外力ベクトル，α：数値減衰パラメータ（$=-1/3$）である[3)]．また，ラーメンの剛性マトリックスは，変位 y_4 と θ_2 に関して次のようにまとめられる．

表１　弾塑性回転バネ

バネ	弾性係数 k_i (kN·m)	モーメント耐力 M_{ip} (kN·m)
1	1.33×10^8	5.25×10^4
2	3.16×10^7	実験で評価 (純数値解析：6.76×10^3)
3	2.18×10^8	6.76×10^4
4	1.14×10^8	6.76×10^4

注）h=20m, l=10m, a=2m, 質量 $m=1.02\times10^7$ kg, $J=2.65\times10^{10}$kN·m·s^2, 固有周期 T_1=1s, T_2=0.001s

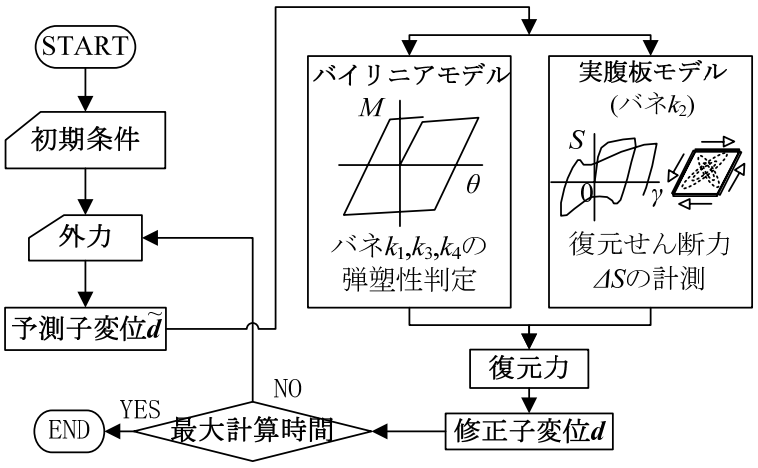


図２　オンライン実験法による応答解析の流れ図

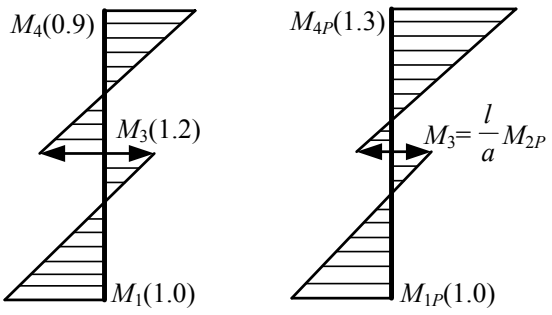


図３　柱部材の曲げモーメント分布

キーワード　オンライン実験，はりのせん断崩壊，門形ラーメン，α-OS 法
連絡先　〒457-8532　名古屋市南区白水町 40　TEL052-612-5571　FAX052-612-5953

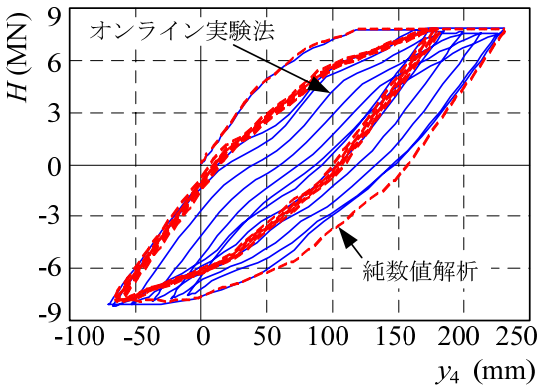


図 4　水平復元力 H－変位 y 関係

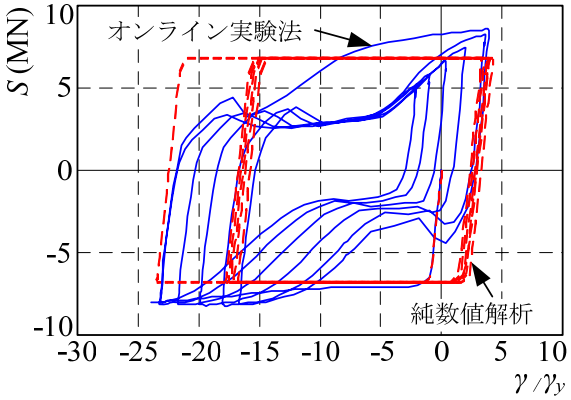
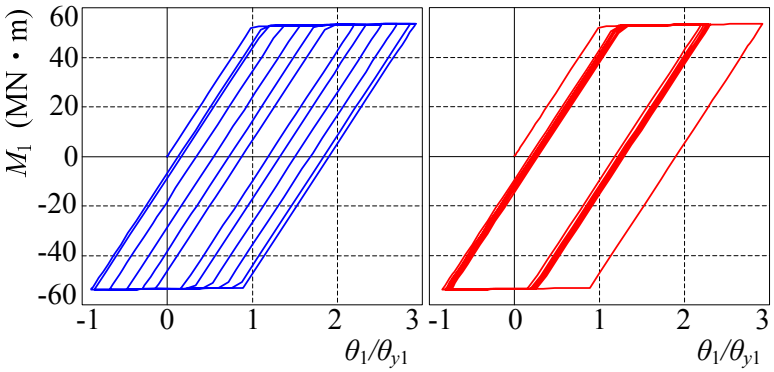


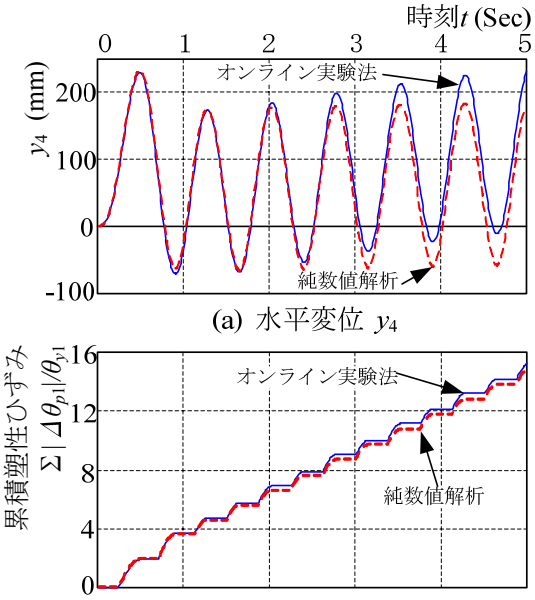
図 5　はり腹板のせん断力 S とせん断変形角 γ の関係



(a) オンライン実験法　　(b) 純数値解析

図 6　柱基部の復元モーメント M－回転角 θ の関係

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}(k_1+k_3+k_4)/h^2 & ak_3/h/l\\ ak_3/h/l & a^2k_3/l^2+k_2\end{bmatrix} \quad \cdots(2)$$



(a) 水平変位 y_4

(b) 柱基部損傷度

図 7　変位とひずみの時刻歴応答

3．オンライン実験法による応答解析の結果と考察

表 1 の諸元を用いて，ラーメンの動的弾塑性解析を行った．柱部材の曲げモーメント図は**図 3** のように想定している．実験に用いたはり腹板は一辺が 200mm の正方形で，板厚 t=1.35mm，幅厚比 148，降伏せん断応力 τ_y=293MPa である．解析では周期 0.75 秒の正弦波外力を 5 秒間作用させた．

解析結果を**図 4**～**図 7** に示す．また，応答解析終了後のはり中間部腹板を**写真 1** に示す．はり中央のバネ 2 もバイリニアに仮定した純数値解析の結果を比較している．これらの結果から，以下のことがわかる．

まず，はり中央では，せん断変形角の最大応答は同程度であるが，腹板のせん断座屈による耐力の変動が純数値解析に比べて非常に大きく現れている．その影響は，H－y 曲線にも見られる．はり中央のせん断座屈の影響により，純数値解析のときよりも柱基部の損傷が若干大きくなっている．

写真 1　応答解析終了後のはり中間部腹版

4．まとめ

1)サブストラクチュア・オンライン実験法により，一層目はり中央腹板のせん断崩壊挙動を忠実に考慮して，鋼二層ラーメンの動的弾塑性応答解析を実施できた．2)本文で示した二層ラーメンの解析モデルに対して，α－OS 法の数値積分法は，時刻歴応答の安定した解を求める上で大変有効であった．

参考文献 1) 酒造，山田，樋口：構造工学論文集，Vol.53A，土木学会，pp.117～124．2) 中島，赤澤，阪口：日本建築学会構造系論文集，第454号，pp. 61～71，1993年12月．3)Hilber，H.M.，Hughes，T.J.R.，Taylor，R.L.： Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics，Earthquake Eng. Struct. Dyn. Vol.5, pp.283~292, 1977.