

一層目はり中央がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンの オンライン実験法による地震応答解析

Earthquake response analysis of two-storey steel portal frames with shear collapse of beam on 1st storey by using pseudodynamic testing procedure

酒造敏廣*, 山田 宰**, 都築 禅***

Toshihiro Miki, Osamu Yamada, Zen Tsuzuki

* 工博, 大同工業大学教授, 工学部都市環境デザイン学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

** 工修, 大同工業大学在学中, 大学院工学研究科博士後期課程 (〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

*** 大同工業大学在学中, 大学院工学研究科修士課程 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

This paper performs the earthquake response analysis of two-storey steel portal frames. The shear buckling behaviour of web plates in the middle of the 1st storey beam is paid attention to by the substructure pseudodynamic testing method. The implicit time-stepping algorithm is based on the α -OS method to solve the equation of motion. The numerical results illustrate the non-linear response of frames including the remarkable change in shearing resistance force of web plates due to buckling and diagonal tension-field. The damage mechanism of frames is discussed by focusing on whether or not the shearing collapse of web plates in the 1st storey beam could save the damage of another structural parts.

Key Words: steel portal frame, two-storey frame, shear collapse of beam, earthquake response, pseudo-dynamic test

キーワード: 鋼二層ラーメン, はりのせん断崩壊, 地震応答, オンライン実験

1. まえがき

鋼門形ラーメン橋脚のはり部材は, 桁橋と同様な合理的設計法の考えのもとで, 部材軸方向に材料強度や板厚が急変する変断面構造として設計されてきた¹⁾. そのため, はり中間部で曲げモーメントが小さく, せん断力が支配的になるとき, 兵庫県南部地震の被害で見られたように, 地震時に腹板がせん断座屈崩壊する可能性がある^{2~4)}. これまでの研究によると, はり中間部のせん断崩壊は, はり部材の抵抗せん断力の上昇を頭打ちにして, 隅角部とその近傍のはり・柱断面の塑性変形を抑える効果が大きく^{4,5)}, 地震時のエネルギー吸収部材としての利用も考えられる^{6~12)}.

しかしながら, はり部材中央のせん断崩壊は, 地震エネルギー吸収の目的で設計段階から意図されたものでなかったことから, その塑性化や座屈崩壊は不静定ラーメンが呈する弾塑性応答や崩壊挙動の中でどのように位置づけられるか等, 究明しておくべきことが多々ある. とくに, はりの部材長/はり深さは約 5~15 に分布し¹⁾, はり中央腹板のせん断耐力が比較的小さく, 幅厚比が桁

橋腹板と同程度に大きく, せん断座屈とその後の斜め張力場が発生すると, 大きな耐力変動が避けられない. そのため, この損傷がラーメンの地震応答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.

本研究では, 二層の鋼門形ラーメンを対象にして, 実験と数値計算を組み合わせたサブストラクチャ・オンライン実験 (仮動的実験, ハイブリッド実験とも呼ばれる) の手法を用いて^{13~15)}, 地震応答解析を行うものである. まず, せん断座屈崩壊する一層目はり中間部を部分構造の実験モデル¹²⁾に置換し, 二層ラーメンの数値解析モデルを作成する. そして, α -OS 法^{14~16)}を用いて運動方程式を表し, オンライン実験法によるラーメンの地震応答解析法について述べる. つぎに, ラーメンの地震応答解析を行って, 一層目はり腹板のせん断崩壊挙動がラーメンの地震応答に及ぼす影響について分析する. さらに, 地震動の大きさと塑性変形パターンを変化させて応答解析を行い, 一層目はり腹板のせん断崩壊による柱基部・二層目隅角部の損傷と履歴エネルギー分担の変動性状を調べる. 最後に, 一層目はり腹板がせん断崩壊する二層ラーメンの地震応答と耐震設計について考察す

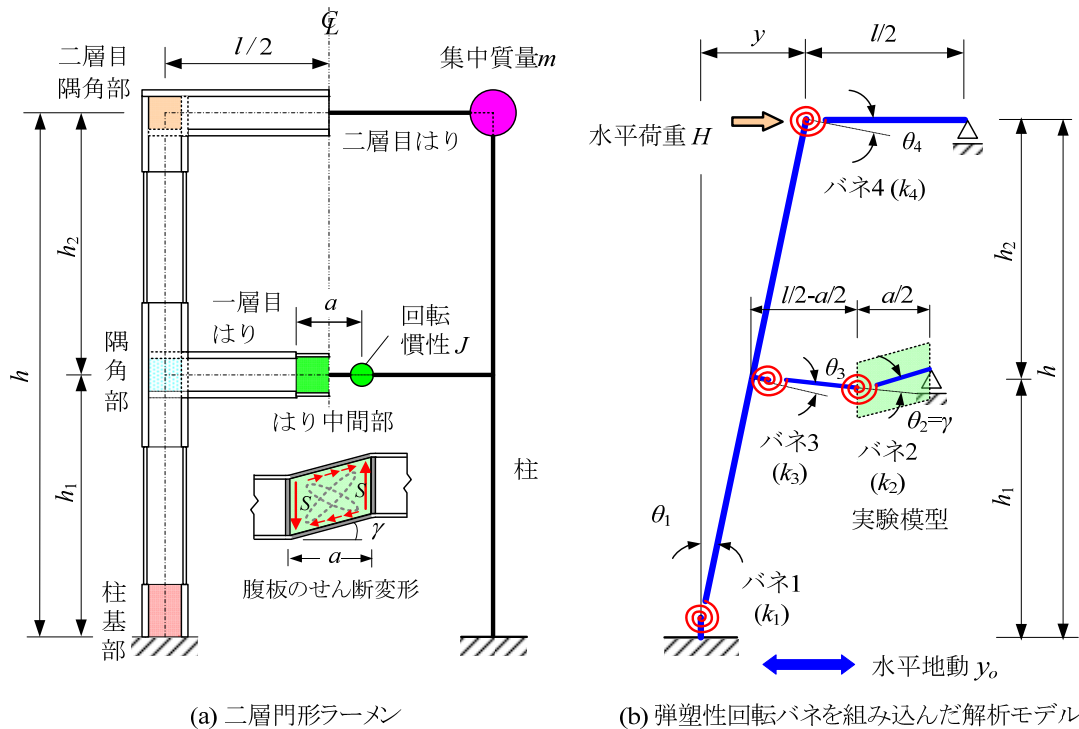


図-1 はりがせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンの解析モデル

る。

2. サブストラクチャ・オンライン実験法による二層門形ラーメンの地震応答解析法

2.1 解析上の仮定と解析モデル

本文では、図-1 に示すように、水平外力 H と水平地動 y_0 を受けて、一層目はり中央がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンを研究対象とする。

(1) 解析上の仮定

解析モデルを作成するにあたり、以下の仮定を設けた。

- i) ラーメンの弾塑性挙動は、曲げモーメントが卓越する柱基部、せん断力が卓越する一層目はり中間部、および、一、二層目隅角部近傍のはり部材に回転バネを組み込んで考慮し（同図(b)参照）、回転バネ以外の部分は剛体として取り扱う。
- ii) 曲げモーメントよりもせん断力が卓越して塑性化する一層目はり中間部の弾塑性挙動は、せん断力を受ける腹板によって評価できる。
- iii) せん断崩壊する腹板のせん断変形速度は大きい、ラーメンの地震応答に及ぼす影響は小さい^{7), 12)}。
- iv) 箱形断面のはり中間部のフランジ・プレートとダイヤフラムは、腹板が非弾性域でせん断座屈変形を呈しても、斜め張力場形成に必要なアンカーになる十分な剛度・強度を有している。
- v) 幅厚比パラメータ R_f (式(11)参照) の値が等しい鋼腹板は、降伏せん断応力と降伏せん断ひずみで無次元化した平均せん断応力-せん断変形角の関係がほ

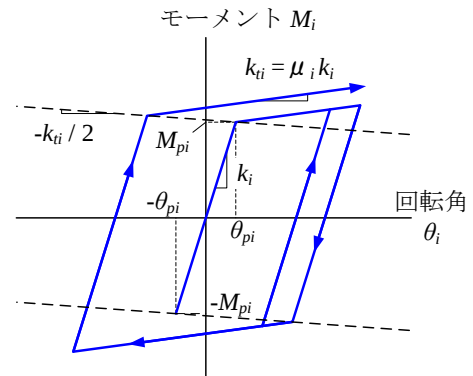


図-2 バネ k_i のモーメント M_i -回転角 θ_i 関係

ぼ同じになるものとする。

上記 i) の仮定は、はり中間部での腹板のせん断崩壊は隅角部とその近傍のはり・柱断面の塑性変形を抑える効果が大きいという結果^{2,4,5,7)}に基づいている。

(2) 二層門形ラーメンの解析モデル

上記の仮定を用いて、かつ、はり部材の変形の逆対称性を考えて、図-1 (b) に示すように、はり中央でローラー支持された骨組を二層門形ラーメンの解析モデルとした。

柱頭部にはラーメンの水平並進運動に対応する集中質量 m を仮定し、かつ、運動方程式において一層目はり腹板のせん断変形角 γ を陽的に表すために、バネ 2 を組み込んだ位置に回転慣性 J を仮定している。したがって、解析モデルは 2 自由度系の振動体になる。バネ 2 は、一層目はり中央における区間 a の腹板のせん断崩壊挙動を表し、後述する実験モデルに置換する¹³⁾。このバネのモ

ーメント M_2 と回転角 θ_2 は、腹板のせん断力 S 、および、せん断変形角 γ と次のように関係づけられる。

$$M_2 = S \frac{a}{2} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \gamma \quad (2)$$

ここで、柱基部、一層目はり中間部、および、一、二層目隅角部に配置したバネの回転角 $\theta_1 \sim \theta_4$ の間には、幾何学的条件から、次の関係が成り立つ。

$$\theta_1 = y/h, \quad \theta_3 = y/h + (a/l)\theta_2, \quad \theta_4 = \theta_1 \quad (3a-c)$$

柱基部と隅角部のバネ 1, 3, および, 4 には、図-2 に示すバイリニア型の弾塑性 $M-\theta$ 関係を用いる^{2), 4), 5), 7)}。

2.2 二層門形ラーメンの運動方程式と数値積分法

地震応答解析に用いるラーメンの運動方程式と数値積分法には、中島らが提案した α -OS 法^{14)~16), 17), 18)}を用いる。その概要を以下に説明する。

(1) α -OS 法の運動方程式

水平外力 H と水平地動加速度 $\ddot{y}_0$ が門形ラーメンに作用するとき、時刻 t_{n+1} における変位 $\mathbf{d}_{n+1}$ に関する運動方程式は、次式で与えられる¹⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{n+1} + (1+\alpha)\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_{n+1} - \alpha\mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_n \\ & + (1+\alpha)(\mathbf{K}^I\mathbf{d}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1}^E\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}) - \alpha(\mathbf{K}^I\mathbf{d}_n + \mathbf{K}_n^E\tilde{\mathbf{d}}_n) \\ & = (1+\alpha)\mathbf{P}_{n+1} - \alpha\mathbf{P}_n - (1+\alpha)\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{0,n+1} + \alpha\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_{0,n} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\ddot{\mathbf{d}}$, $\dot{\mathbf{d}}$, $\mathbf{d}$, $\mathbf{P}$, $\ddot{\mathbf{d}}_0$, $\tilde{\mathbf{d}}$ は、加速度、速度、修正子変位、外力、入力加速度、および、予測子変位の各ベクトルである。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{d}} &= \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{d}} = \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{Bmatrix} y \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \\ \mathbf{P} &= \begin{Bmatrix} H \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{d}}_0 = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{d}} = \begin{Bmatrix} \tilde{y} \\ \tilde{\theta}_2 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5a-f)$$

また、 $\mathbf{K}^I$ は、図-1(b) に示す解析モデルの柱頭部の変位 y とはり中央の回転角 θ_2 に関する弾性剛性マトリックスであり、次式で表される¹³⁾。

$$\mathbf{K}^I = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_3 + k_4}{h^2} & \frac{a}{lh}k_3 \\ \frac{a}{lh}k_3 & k_2 + \frac{a^2}{l^2}k_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\mathbf{K}^E$ はラーメンの弾塑性挙動の履歴に依存する剛性マトリックス (式(9) 参照) である。 α は数値減衰に関するパラメータであり、 $\alpha = -1/3$ に設定している¹⁷⁾。 $\mathbf{M}$ は質量マトリックスである。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{C}$ は減衰マトリックスで、レーリー型を仮定し、1, 2 次の振動モードに対する減衰定数を 5% に設定している。

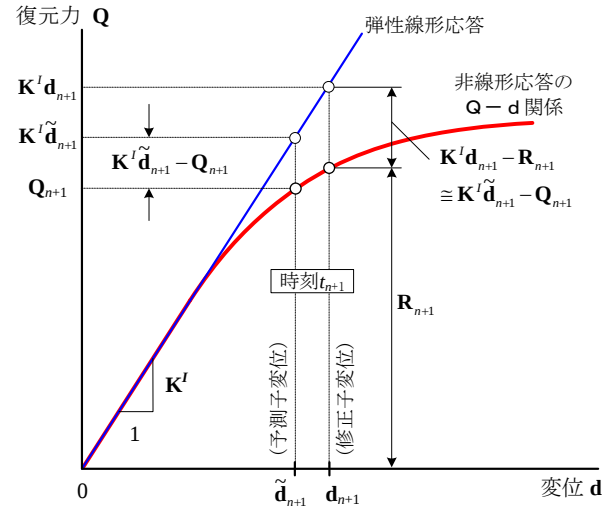


図-3 OS法の予測子・修正子変位に対応する復元力と不釣り合い力^{14), 18)}

(2) 予測子変位ベクトルとそれによる復元力の算定

まず、時刻 t_{n+1} のときの予測子変位 $\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ を次式で近似する^{14), 16)}。

$$\tilde{\mathbf{d}}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \dot{\mathbf{d}}_n \Delta t + (1/2 - \beta)\ddot{\mathbf{d}}_n \Delta t^2 \quad (8)$$

ここに、 $\beta = (1-\alpha)^2/4$ である。

つぎに、予測子変位に対してラーメンの非線形剛性が分担する見かけ上の復元力 (= 不釣り合い力) $\mathbf{K}^E\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ は、真の復元力 $\mathbf{Q}_{n+1}$ と弾性剛性による復元力 $\mathbf{K}^I\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$ との差として得られる (図-3 参照)。

$$\mathbf{K}^E\tilde{\mathbf{d}}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} - \mathbf{K}^I\tilde{\mathbf{d}}_{n+1} \quad (9)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{n+1} &= \begin{Bmatrix} (M_{1,n} + M_{3,n} + M_{4,n})/h \\ (a/l)M_{3,n} + M_{2,n} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} k_{1n}\Delta\tilde{\theta}_{1,n+1}/h + k_{3n}\Delta\tilde{\theta}_{3,n+1}/h + k_{4n}\Delta\tilde{\theta}_{4,n+1}/h \\ \Delta M_{2,n+1} + (a/l)k_{3n}\Delta\tilde{\theta}_{3,n+1} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $M_{i,j}$: 時刻 t_j におけるバネ i の復元モーメント、 $\Delta\tilde{\theta}_{i,j}$: 時刻 $t_{j-1} \sim t_j$ におけるバネ i の増分予測子回転角である。 k_{1n} , k_{3n} および k_{4n} は、図-2 の $M-\theta$ 関係をもとに求めるバネ 1, 3, および, 4 の $t_n \sim t_{n+1}$ 間の割線剛性である。 $M_{2,n+1} (= M_{2,n} + \Delta M_{2,n+1})$ は、一層目はり中央のバネ 2 の予測子回転角 $\tilde{\theta}_{2,n+1}$ (= せん断変形角 $\tilde{\gamma}_{n+1}$) を後述する実験模型に与え、実験から求めるバネ 2 の復元モーメント (式(1), (16) 参照) である。

(3) 修正子変位ベクトルの算定

図-3 に示すように、ラーメンが非線形挙動を呈するとき、修正子変位に対して発生する不釣り合い力を予測子変位に対するそれと近似し¹⁸⁾、式(4)の運動方程式が成り立つように変位を修正する。すなわち、式(9)を(4)に代入すると、修正子変位 $\mathbf{d}_{n+1}$ に関する運動方程式が得られる。それに Newmark β 法を適用すると、時刻 t_{n+1} の加速

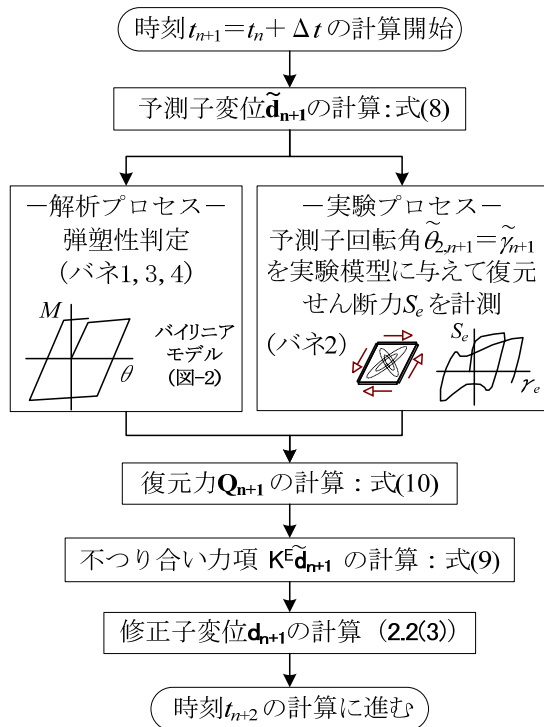


図-4 サブストラクチャ・オンライン実験法による二層門形ラーメンの時刻歴応答解析の流れ

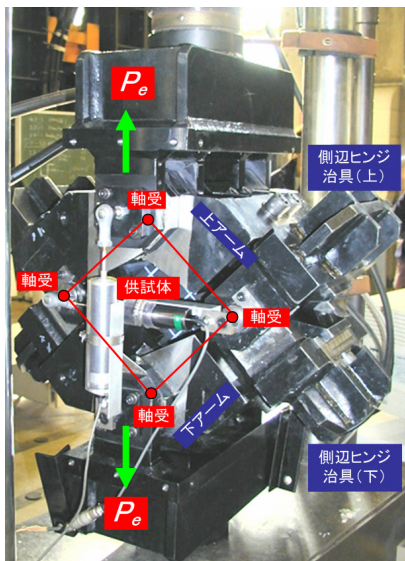


写真-1 実験プロセスで用いるせん断力载荷治具¹²⁾

度 $\ddot{\mathbf{d}}_{n+1}$, 速度 $\dot{\mathbf{d}}_{n+1}$, および, 修正子変位 $\mathbf{d}_{n+1}$ の各ベクトルが求められる。

以上に説明したオンライン実験法による応答解析の流れを図-4に示す。

2.3 一層目はり腹板のサブストラクチャ模型を用いた実験プロセス

(1) 鋼腹板の実験モデル

ラーメンの一層目はり中間部は, 2.1(1)の仮定をもとに, せん断力を受ける単一腹板にモデル化し, 図-5に

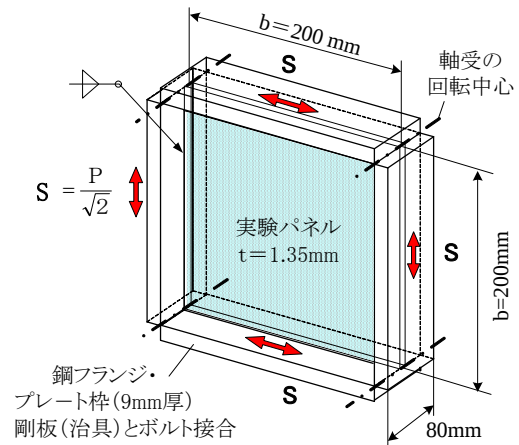


図-5 一層目はり中間部腹板の実験供試体

表-1 腹板製作に用いた鋼板の機械的性質 (SS400)

降伏点 σ_y (MPa)	降伏せん断応力 τ_y (MPa)	引張強度 σ_B (MPa)	ε_H (%)	伸び (%)
293	169	436	1.32	35.3

注 1) ε_H : ひずみ硬化開始点のひずみ, 2) ヤング係数 $E = 206 \times 10^5$

MPa, ポアソン比 $\nu = 0.30$, せん断弾性係数 $G = 7.92 \times 10^4$ MPa,

示す実験模型¹²⁾に置き換える。腹板は, 6mm厚のSS400鋼板(表-1 参照)から切削し, 一辺 200mm, 1.350mm厚の正方形板としている。周辺に 9mm厚のフランジ・プレートをすみ肉溶接している。切削による鋼板の降伏点の変動は小さいものとし, 腹板の降伏点には, 表-1の値をそのまま用いることとした。腹板の幅厚比は $b/t = 148$ であり, せん断力を受ける鋼板の無次元幅厚比パラメータ R_t に換算すると, $R_t = 1.17$ となる。すなわち,

$$R_t = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\tau_y}{k_s \pi^2 E}} \quad (11)$$

ここに, b : 腹板高さ, t : 腹板厚, ν : ポアソン比, τ_y : 降伏せん断応力, k_s : 辺長比 1.0の周辺固定板に対するせん断座屈係数(=14.58)。

(2) 実験方法

図-6に示すように, 上下のアーム③④と側辺ヒンジ治具⑤からなる実験治具¹²⁾に上記の実験模型を組み込んで高力ボルトで取り付ける(写真-1参照)。この実験治具の特徴は, 実腹板のように, せん断力 S が腹板とフランジ・プレートの溶接線に沿って作用するように, 腹板の4隅が図中に示した4つの軸受②の回転中心と一致する構造になっていることである。

実験では, 2.2(2)で求めた予測子のせん断変形角 $\tilde{\gamma}_{n+1}$ を腹板の対角線方向の軸受間変位 δ に換算し, 変位制御でせん断力を载荷する。ここで, 変位 δ , それに対応するアクチュエータの力 P_e , 腹板のせん断力 S_e , せん断応力 τ_e , および, せん断変形角 γ_e の間には, 以下の関係がある。

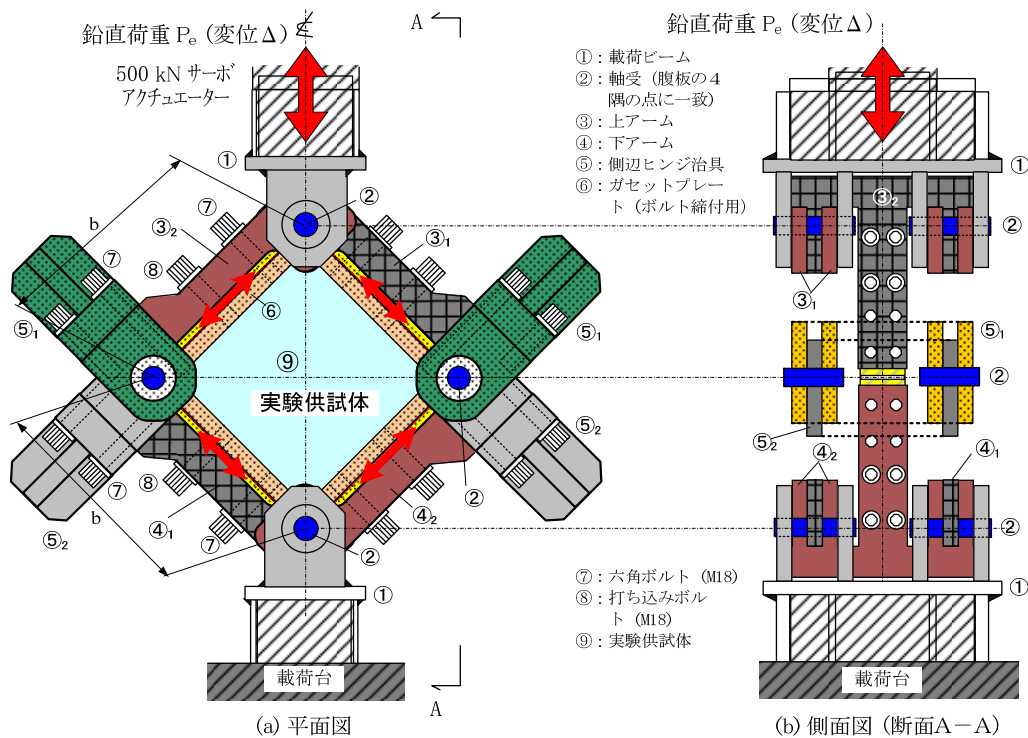


図-6 せん断力荷重の実験治具の構造¹²⁾

$$S_e = \frac{P_e}{\sqrt{2}}, \quad \tau_e = \frac{S_e}{bt}, \quad \delta = \frac{b\gamma_e}{\sqrt{2}} \quad (12) \sim (14)$$

地震応答解析では、一層目はり腹板の辺長比 1.0 とし、幅厚比パラメータ $R_f=1.17$ となるように、腹板高さ D_b 、板厚 t_b 、および、降伏せん断応力 τ_y を想定して、バネ 2 の塑性モーメント M_{p2} を算出する。

$$M_{p2} = 2D_b t_b \tau_y \frac{a}{2} = D_b t_b \tau_y a \quad (15)$$

実験プロセスから求めた供試体のせん断力 S_e を式(13)に代入し、無次元平均せん断応力 τ_e/τ_y を求めると、一層目はり腹板の復元せん断力 S は、以下のように得られる。

$$S = \frac{M_{p2} \tau_e}{a/2 \tau_y} \quad (16)$$

すると、はり中間部に組み込んだバネ 2 の復元モーメント M_2 は、式(1)で計算できる。

3. オンライン実験法による二層門形ラーメンの地震応答解析

ここでは、一層目はり腹板がせん断座屈を引き起こし、せん断耐力の大きな変動を伴って挙動するとき、それがラーメンの地震応答にどのような影響を及ぼすかを調べる。以下においては、解析結果を次のように表記して、比較・考察することとする。

①オンライン実験法：実験と数値解析プロセスを含んだ応答解析（図-4 参照）

②純数値解析：実験プロセスのバネ 2 に完全弾塑性の $M_2-\theta_2$ 関係 ($\mu_2=0$) を仮定し、数値解析プロセスだけで応答解析を行ったもの。

3.1 解析モデルの各種諸元と解析条件

(1) 解析モデルと解析ケース

数値解析に用いた門形ラーメンの寸法諸元等を表-2 に示す。ラーメンの固有周期は 1 次 $T_1=1s$ 、2 次 $T_2=0.001s$ としている。地震応答解析では、文献 13) の数値解析結果を参考にして、 α 法¹⁷⁾ の特徴を利用し、 T_2 よりも大きな積分時間刻み $\Delta t=T_1/500$ を採用することにより、2 次モードの影響を減衰させている¹³⁾。

解析の Case 1~4 は、図-7 に示すように、柱基部とはり中間部の塑性化順序で場合分けしたものである。さらに、表-3 に示すように、各 Case ごとに、一層目はり中央のせん断変形区間 a 、および、以下に説明する降伏変位比と地震動による弾性最大応答変位をパラメータにして、解析を行うように区別している。骨組高さ h とスパン l は鋼製ラーメン橋脚の実績調査⁹⁾ を参考にして設定している。一層目はり中央腹板のせん断崩壊長さ a は $0.1l$ と $0.2l$ の 2 種類を仮定している。Case 1~3 では、柱基部の塑性モーメント M_{p1} のみが相違する。

(2) 各部の降伏変位、ラーメンの崩壊荷重、および、曲げモーメント図

柱基部、一層目はり中間部、および、二層目隅角部が降伏するときの変位 y_{p1} 、 y_{p2} 、および、 y_{p4} は、次のように求められる。

表-2 ラーメンの解析ケース（第3章）と各種諸元

バネ i	弾性係数		塑性モーメント M_{pi} (kN・m)	備 考
	解析 Case	k_i (kN/m)		
1	1	1.37×10^6	1.20×10^4	
	2		6.01×10^3	
	3		4.01×10^3	
	4	1.54×10^6	6.01×10^3	
2	1	3.31×10^5	1.54×10^3	左記の塑性モーメント値は純数値解析で用いる。オンライン実験法では実験で評価する。
	2			
	3			
	4	1.65×10^5	7.72×10^2	
3	1-4	2.24×10^6	1.54×10^4	弾性状態を保つ
4	1-3	1.18×10^6	1.54×10^4	
	4	1.32×10^6	1.54×10^4	

注 1) Case 1, 2, 3 : $h=20\text{m}$, $l=10\text{m}$, $a=2\text{m}$, $R=1.17$, 質量 $m=2.73 \times 10^5 \text{ kg}$, $J=10.7 \text{ Nm}^2$, Case 4 : $h=20\text{m}$, $l=10\text{m}$, $a=1\text{m}$, $R=1.17$, $m=3.06 \times 10^5 \text{ kg}$, $J=4.76 \text{ Nm}^2$ 2) 固有周期 $T_1=1\text{s}$, $T_2=0.001\text{s}$ 3) $M-\theta$ 曲線の塑性域の勾配を表す係数 $\mu_1=\mu_4=0.01$ 4) ラーメンの降伏水平変位 Case 1: 柱頭部の降伏変位 $y_{p1}=175\text{mm}$, 一層目はり中間部の降伏変位 $y_{p2}=0.5y_{p1}$, 二層目隅角部の降伏変位 $y_{p4}=1.5y_{p1}$, Case 2: $y_{p1}=y_{p2}=87.5\text{mm}$, $y_{p4}=3y_{p1}$, Case 3: $y_{p1}=58.3\text{mm}$, $y_{p2}=1.5y_{p1}$, $y_{p4}=4.5y_{p1}$, Case 4: $y_{p1}=y_{p2}=78.2\text{mm}$, $y_{p4}=3y_{p1}$ 5) 塑性崩壊荷重 Case 1: $H_p=1.76\text{MN}$, Case 2, 4: $H_p=1.46\text{MN}$, Case 3: $H_p=1.36\text{MN}$.

$$y_{p1} = \frac{M_{p1}}{k_1} h, \quad y_{p2} = \frac{k_2 + (a^2/l^2)k_3}{k_3} \frac{M_{p2}}{k_2} \frac{l}{a} h$$

$$y_{p4} = \frac{M_{p4}}{k_4} h \quad (17a \sim c)$$

図-7 中の H_p は、ラーメンの塑性崩壊荷重であり、柱基部、一層目はり腹板、および、二層目隅角部が分担する荷重をそれぞれ H_{p1} , H_{p2} , H_{p4} とおくと、次のように表される。

$$H_p = H_{p1} + H_{p2} + H_{p4} = \frac{M_{p1}}{h} + \frac{l}{a} \frac{M_{p2}}{h} + \frac{M_{p4}}{h} \quad (18)$$

また、弾性時と崩壊時において、はり・柱の曲げモーメント分布は図-8 のようになる。同図(b)を参考にとすると、一層目はり腹板が早期に先行降伏するとき、その降伏せん断力を関数とするバネ 2 の塑性モーメント M_{p2} によって、はり内の曲げモーメント分布の大きさが決まってしまう、一層目隅角部近傍のはり・柱断面の塑性化が抑えられることになる^{24, 45, 7)}。このとき、はり腹板のせん断座屈崩壊に起因して、柱基部と二層目隅角部の塑性変形状がどのように変動するかが本論文で着目する点である。なお、各回転バネの弾性係数 k_i は、弾性時の柱基部と一層目はり端の曲げモーメント比 $M_3/M_1=1.29$, 柱上下の曲げモーメント比 $M_4/M_1=0.86$ になるように決めている。

(3) 解析で仮定した水平地動加速度とその増幅方法

地震応答解析で仮定する水平地動には、1995 年の兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測波 (Kobe-

表-3 ラーメンのオンライン実験パラメータ

解析 Case	はり中央 のせん断 崩壊区間 a	降伏 変位 比 y_{p2}/y_{p1}	増幅した地震動による弾性の最大変位応答 y_{maxE}/y_{p1}	
			第3章	第4章
1	$0.2l$	0.5	3	4
2		1.0	12	18
3		1.5	12	12
4	$0.1l$	1.0	12	—

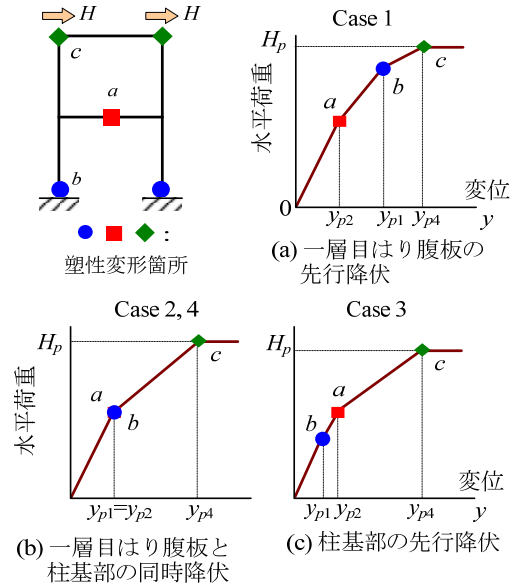


図-7 ラーメン各部の塑性化順序と解析ケース

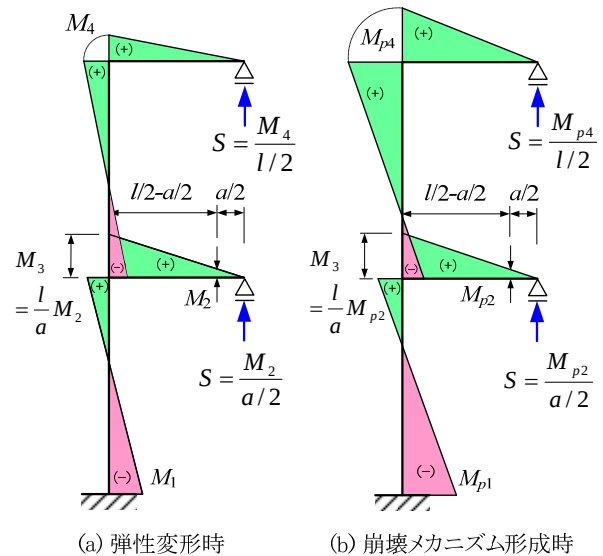


図-8 はり・柱部材の曲げモーメント分布

JMA) の NS 成分の最初の 30 秒間を用いた。

その際、固有周期 $T_1=1\text{s}$ のラーメンを用いて変位応答や塑性変形・損傷の大きさを再現するために、入力加速度を増幅して応答解析を行った。具体的には、弾性応答の最大変位 y_{maxE} が、柱基部が降伏するときの変位 y_{p1} の

何倍になるかを指定し、地震動の増幅率 y_{max}/y_1 を決めた。ここに、 y_1 は、オリジナルの地震波形を用いて計算した弾性応答の最大変位である。以上の方法により、周期特性が異なるラーメンに対して、非弾性域に入ったときの塑性変形・損傷の性状は十分説明できると考えるものである。

3.2 復元力－変位関係に関する解析結果と考察

ラーメンの水平復元力 H －変位 y 曲線、柱基部の復元モーメント M_1 －回転角 θ_1 曲線、一層目はり腹板のせん断力 S －せん断変形角 γ 曲線、および、二層目隅角部の M_4 － θ_4 曲線を図-9 にまとめる。また、せん断耐力の変動が顕著な時刻の S － γ 曲線と対応する H － y 曲線の一部

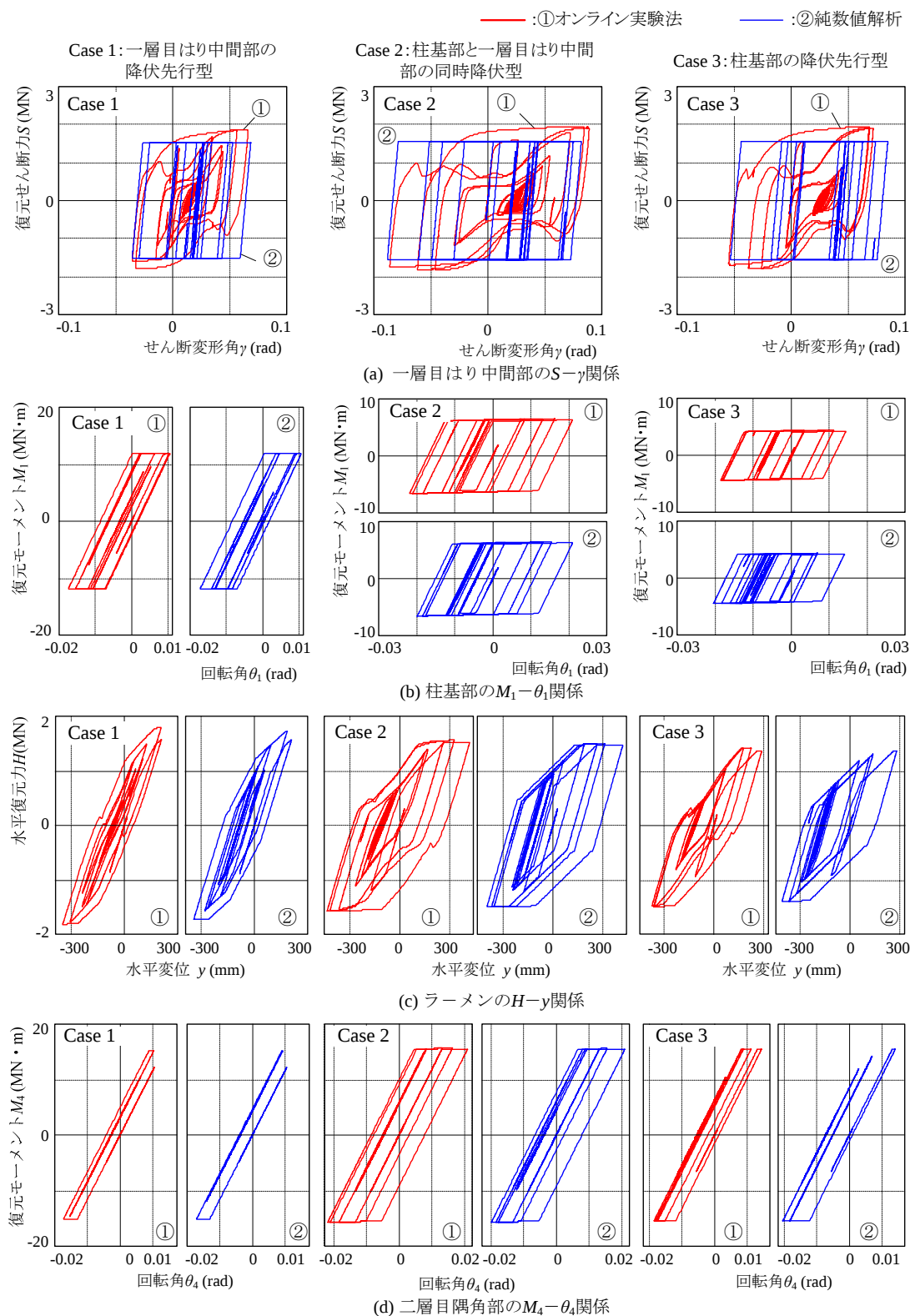
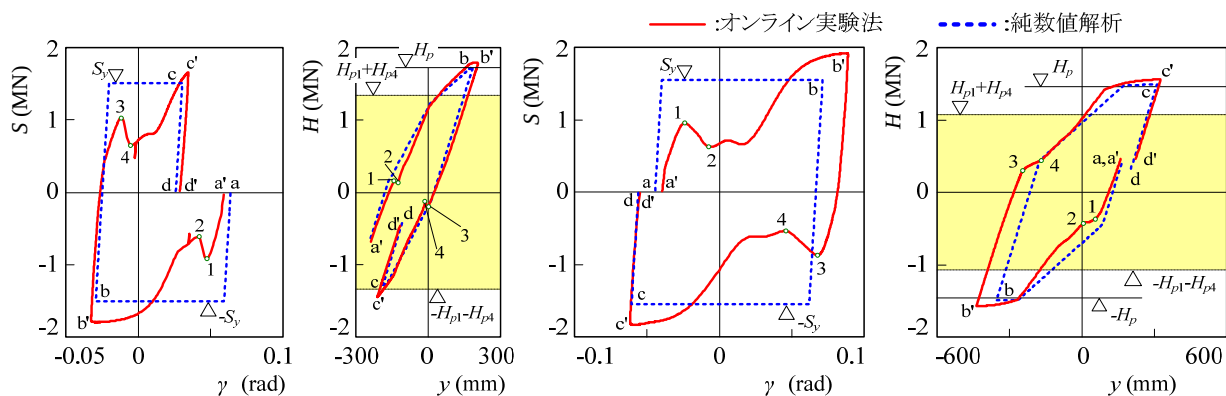


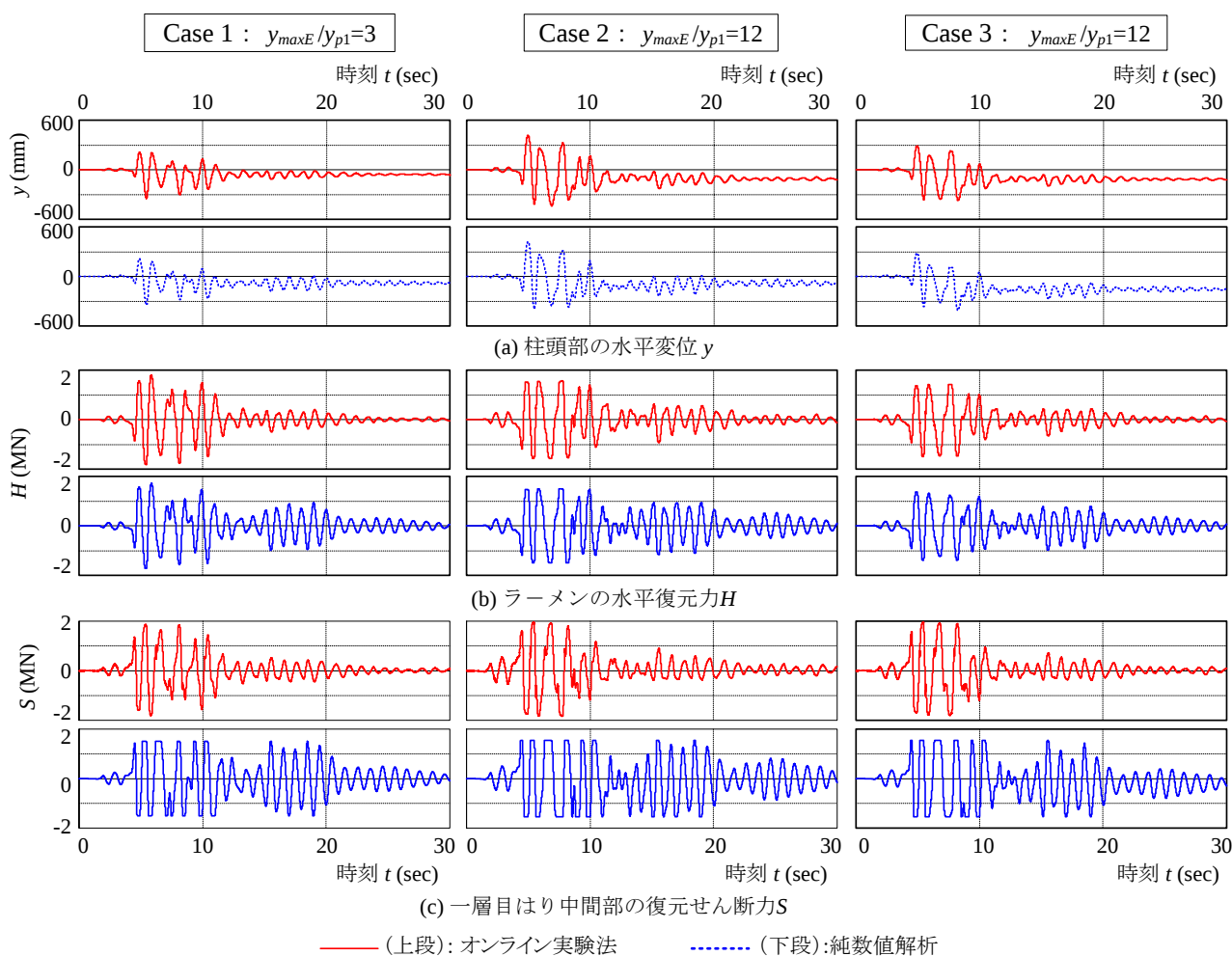
図-9 一層目はり中間部腹板がせん断崩壊する二層門形ラーメンの地震応答解析の結果（その1）



(a) Case 1 : 時刻 $t=5.56\text{s}\sim 6.84\text{s}$ の $S-\gamma$ 曲線
と $H-y$ 曲線 ($y_{\max E}/y_{p1}=3$)

(b) Case 2 : 時刻 $t=6.23\text{s}\sim 7.91\text{s}$ の $S-\gamma$ 曲線
と $H-y$ 曲線 ($y_{\max E}/y_{p1}=12$)

図-10 一層目はり中間部腹板がせん断崩壊する二層門形ラーメンの地震応答解析の結果 (その2)



(c) 一層目はり中間部の復元せん断力 S

— (上段): オンライン実験法 - - - (下段): 純数値解析

図-11 一層目はり中間部腹板がせん断崩壊する二層門形ラーメンの地震応答解析の結果 (その3)

を取り出して、図-10に例示する。

まず、図-9(a)、図-10の $S-\gamma$ 曲線からわかるように、Case 1~3のいずれの場合も、一層目はり腹板にせん断座屈が発生して、せん断耐力が降伏せん断力 S_y よりも30~60%も低いレベルまで落ち込んでいる箇所がある。そして、その後の斜め張力場の形成により、抵抗せん

断力が大きく変動し、いわゆるスリップ型の履歴ループが顕著に現れている。また、せん断変形角の最大応答値については、オンライン実験と純数値解析の間の差異は比較的小さい。

つぎに、図-9(c)、図-10に示した Case 1, 2の $H-y$ 曲線から、腹板のせん断座屈の影響で、変位反転点の中

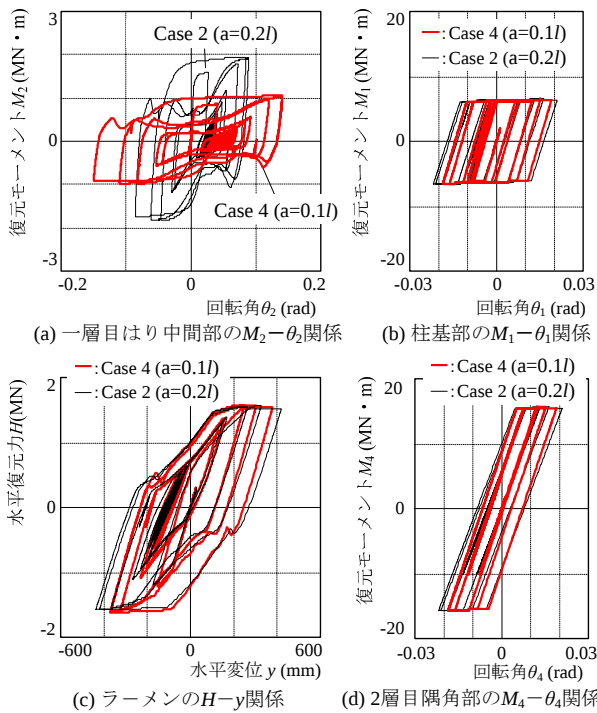


図-12 一層目はり中央のせん断崩壊区間長による復元力-変位とモーメント-回転角曲線の変動

ほどに段差・凹みが現れていることがわかる。しかし、斜め張力場ができて抵抗せん断力が S_y を超えて増加するため、復元力は崩壊荷重 H_p にまで達している。Case 3 についても同様なことが言える。

さらに、図-9(b), (d) から、柱基部の $M_1-\theta_1$ と二層目隅角部の $M_4-\theta_4$ の履歴ループについては、オンライン実験法と純数値解析の間の差異は小さいように見える。この点は、4 章で詳細に検討する。

3.3 変位と復元力の時刻歴応答

水平変位 y 、水平復元力 H 、および、せん断力 S の時刻歴応答を図-11 に示す。

同図(a)からわかるように、腹板にせん断座屈が生じたことにより、オンライン実験による変位応答は、純数値解析のそれよりもやや正側に移動している。

同図(b)の水平復元力 H を見ると、 $t < \text{約 } 10\text{s}$ の範囲では、腹板のせん断座屈後の斜め張力場の影響でオンライン実験法の最大応答値が純数値解析のそれに比べてわずかに大きくなっていることがわかる。 $t > \text{約 } 10\text{s}$ の範囲では、オンライン実験法の水平復元力の振幅が小さい。これは、腹板が著しく損傷を受けたことに起因していると考えられる。

同図(c)からわかるように、一層目はり腹板のせん断力の応答には、斜め張力場の形成によって、耐力上昇が顕著に現れている。

3.4 一層目はり中央のせん断崩壊区間 a の影響

一層目はり中央のせん断崩壊区間 a が異なる Case 2 と

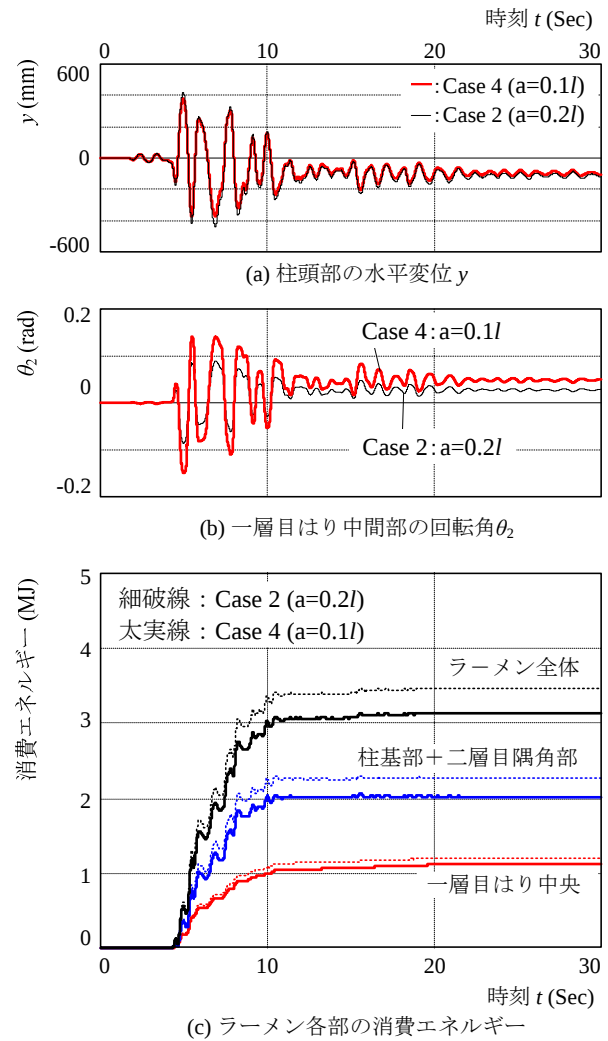


図-13 一層目はり中央のせん断崩壊区間長による変位と消費エネルギーの時刻歴応答

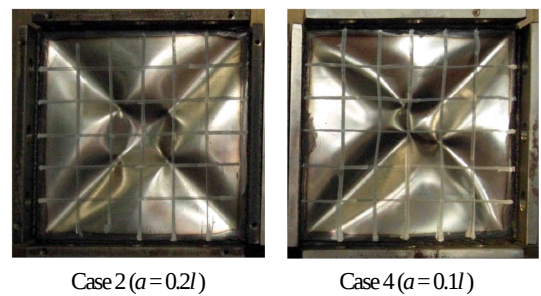


写真-2 オンライン実験終了後のはり腹板供試体

4 の結果を図-12~13 に比較する。また、実験終了後の供試体のせん断座屈の状況を写真-2 に示す。

まず、区間長 $a=0.1l$ の Case 4 において、一層目はり中間部の復元モーメント M_2 は、式(1)によると、 $a=0.2l$ の Case 2 の約 1/2 になる。すなわち、同じ地震動に対して同程度のエネルギーを消費するためには、2 倍の変形が要求されることになる。

オンライン実験の結果を見ると、Case 4 の回転角 θ_2 の応答は Case 2 のそれの約 2 倍になり、せん断座屈による

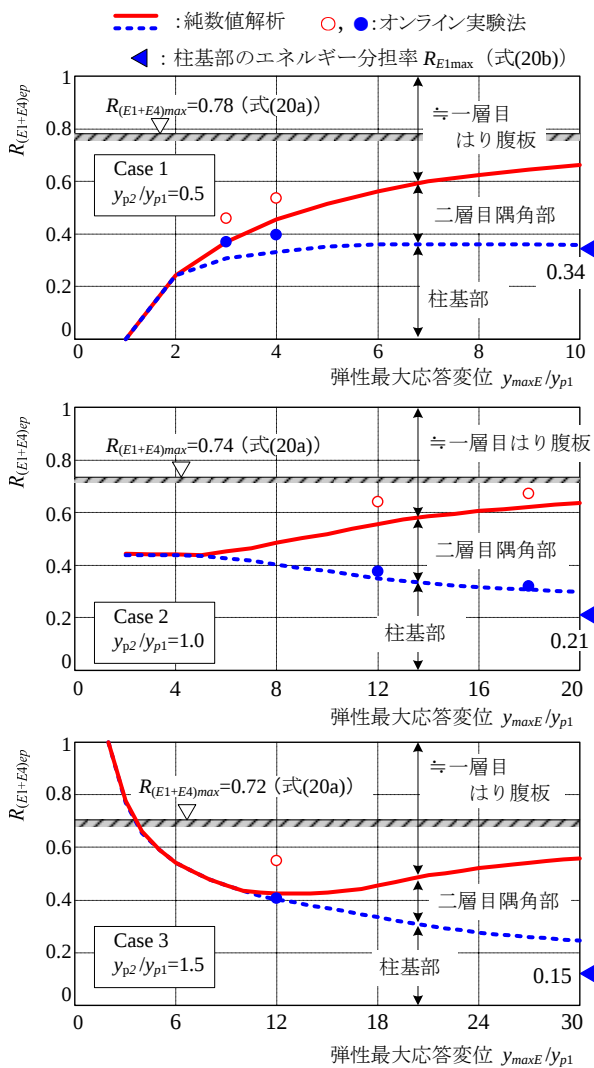


図-14 ラーメン各部の履歴エネルギー分担率

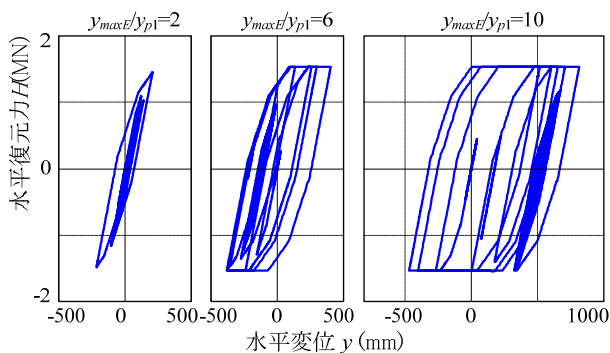


図-15 ラーメンの水平復元力-変位関係 (Case 1)

損傷が著しくなっていることがわかる (図-12(a), 図-13(b), 写真-2 参照)。また、水平復元力 H - 水平変位 y , および、柱基部と二層目隅角部のモーメント-回転角 ($M_1-\theta_1$, $M_4-\theta_4$) の関係において、Case 2 のときの履歴ループは、Case 4 のときよりも若干大きくなる傾向がある。この傾向は図-13(c) に示したラーメン各部の消費エネルギーの応答でも同様である。ここで、Case 2 と 4 では、せん断崩壊区間長を変化させたことにより柱基

部の降伏変位 y_{p1} が相違し、弾性最大変位応答 $y_{maxE} = 12y_{p1}$ に対応する地震加速度倍率に差異があり、Case 2 の地震動は 4 より約 10% 大きくなっている。この点を踏まえると、せん断崩壊区間長によるラーメンの変位応答やエネルギー応答の変動は小さいと言える。

4. 一層目はり中央腹板がせん断崩壊する二層門形ラーメンの地震応答性状について

一層目はり中間部腹板がせん断崩壊するとき、二層門形ラーメンの各部損傷は、どのような影響を受けるかという点に着目して、地震応答解析を行う。

まず、柱基部、一層目はり中間部、および、二層目隅角部が塑性化するとき、弾性域を無視して、それぞれの塑性ひずみによる内部仕事 E_{p1} , E_{p2} , および、 E_{p4} を水平変位 y の関数として表すと、次のようになる。

$$E_{p1} = \frac{M_{p1}}{h} y, \quad E_{p2} = \frac{M_{p2}l}{ah} y, \quad E_{p4} = \frac{M_{p4}}{h} y \quad (19a \sim c)$$

上式を用いると、ラーメン全体の履歴エネルギーに対する柱基部+二層目隅角部、および、柱基部のエネルギー分担率、それぞれ $R_{(E1+E4)max}$ および R_{E1max} は、次のように計算できる。

$$R_{(E1+E4)max} = \frac{E_{p1} + E_{p4}}{E_{p1} + E_{p2} + E_{p4}} \quad (20a)$$

$$R_{E1max} = \frac{E_{p1}}{E_{p1} + E_{p2} + E_{p4}} \quad (20b)$$

上式を参考にして、地震動による各部の履歴エネルギー分担が地震動のもとで、どのように変動するかを調べ、各バネの損傷について考察する。ここでは、柱基部と一層目はり腹板の塑性化順序が異なる Case 1~3 のラーメンに対して、弾性最大変位応答 y_{maxE} が $y_{maxE}/y_{p1} = 2 \sim 30$ となるように、地震動を増幅して純数値解析を行った。このうち、表-3 に示した計 3 ケースについては、オンライン実験法による応答解析も実施し、3 章の結果と合わせて、比較・考察に用いることとした。

4.1 ラーメン各部の履歴エネルギーの分担率の変動

y_{maxE}/y_{p1} をパラメータにして、ラーメン全体の履歴エネルギーに対する柱基部+二層目隅角部のエネルギー分担率 $R_{(E1+E4)ep}$ の変動を図-14 に示す。図中には、上式の $R_{(E1+E4)max}$ と R_{E1ep} の値も比較している。また、ラーメンが呈する復元力 H - 変位 y の履歴ループの変動がわかるように、Case 1 に代表させて、 $y_{maxE}/y_{p1} = 2, 6, 10$ のときの H - y 曲線を図-15 にまとめる。なお、Case 1, 2 および 3 に対して、それぞれ $y_{maxE}/y_{p1} = 10, 20$ および 30 のとき (図-14 の横軸の最大値)、地震動の増幅率 y_{maxE}/y_{p1} はすべて同じ値をとり、約 4 倍である。

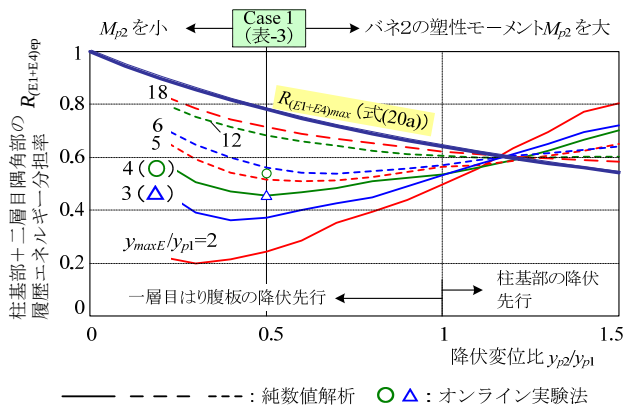


図-16 降伏変位比による柱基部＋二層目隅角部の履歴エネルギー分担率の変動例

(1) 一層目はり腹板の降伏が先行する Case 1

地震動が小さい (y_{maxE}/y_{p1} が小さい) とき、主たる塑性変形が一層目はり腹板で生じるため、そのエネルギー分担が主になり、柱基部＋二層目隅角部のエネルギー分担率は式(20a)の値を下回る。すなわち、一層目はりのせん断崩壊がそれ以外のラーメン各部の塑性変形を抑えていることになる¹³⁾。変位応答 y_{maxE}/y_{p1} の増大とともにラーメン各部の降伏開始変位差が見かけ上小さくなるため、 $R_{(E1+E4)pp}$ が式(20a)のラインに漸近している。

オンライン実験法の結果を見ると、一層目はり腹板にせん断座屈が生じたことによって、柱基部と二層目隅角部のエネルギー分担率が純数値解析の結果よりも約15～20%大きくなっている。せん断座屈を伴って腹板が崩壊したことにより、損傷が少し大きくなったことになる。

(2) 一層目はり腹板と柱基部が同時降伏する Case 2 および、柱基部の降伏が先行する Case 3

Case 2, 3 とともに、応答変位が大きくなると、柱基部と二層目隅角部による履歴エネルギーは式(20a)に漸近する傾向がある。この点は Case 1 と同様である。

オンライン実験による柱基部のエネルギー分担率 (● 印) は純数値解析の結果とよく一致している。二層目隅角部の履歴エネルギー (○ 印) が純数値解析の結果よりも約 25～30%大きくなっている (Case 2)。このことから、一層目はり腹板のせん断座屈による耐力変動は、柱基部よりも、二層目隅角部の塑性変形に及ぼす影響が大きいと言える。この点は、今後検討の余地がある。

4.2 ラーメン各部の履歴エネルギーの変動

一層目はり腹板が先行降伏する Case 1 において、はり中間部のバネ 2 の塑性モーメント M_{p2} を増減させた。そして、降伏変位比 $y_{p2}/y_{p1}=0.2\sim1.5$ の解析モデルを作り、弾性の最大変位応答 $y_{maxE}/y_{p1}=2\sim18$ の範囲で地震動を増幅して応答解析を行った。 y_{p2}/y_{p1} を横軸にとり、柱基部

＋二層目隅角部の履歴エネルギー分担率 $R_{(E1+E4)pp}$ の変動を図-16にプロットする。

同図の純数値解析の結果から、一層目はり腹板の塑性化が先行する範囲では、その塑性変形が有効に働いて、柱基部と二層目隅角部の塑性変形が抑えられ、一層目はり腹板による履歴エネルギー分担が大きくなることがわかる。地震動が大きくなると (y_{maxE}/y_{p1} が大)、その効果が小さくなり、柱基部と二層目隅角部の分担率は式(20a)に漸近するようになる。また、柱基部の降伏が先行する $y_{p2}/y_{p1}>1$ の範囲では、主たる塑性変形が柱基部と二層目隅角部になり、一層目はり腹板のせん断崩壊が柱基部等に及ぼす影響は小さくなっている。

オンライン実験法の $y_{p2}/y_{p1}=0.5$ の結果を見ると、一層目はり腹板の履歴エネルギーは純数値解析の値より低下し、そのせん断座屈によって他の塑性変形箇所の損傷が増大していることがわかる (4.1 参照)。

4.3 一層目はり腹板がせん断崩壊する二層ラーメンの地震応答と耐震設計について

以上、はり腹板のせん断座屈挙動をオンライン実験法で再現できたことにより、一層目はり中央腹板がせん断崩壊するときの二層ラーメンの基本的な地震応答性状が明らかにできたと考える。

すなわち、一層目はり腹板の先行降伏後、ラーメンの復元力ー変位関係がその他部材が降伏するまでの間で履歴ループを描くとき、主たる塑性変形は一層目はり腹板で起こり、そのせん断崩壊が柱基部と二層目隅角部の損傷を抑える効果が期待できる。ラーメンの崩壊メカニズムが形成されるような大きな履歴ループに対しては、この効果は小さくなる¹³⁾。

なお、一層目はり腹板による履歴エネルギー吸収を期待するには、腹板のせん断座屈による耐力低下後、斜め張力場の形成による耐力上昇が必要である^{9), 10), 12)}。繰り返しせん断力の作用下で、フランジ・プレートとダイヤフラムが腹板の斜め張力場波形のアンカーになり得ることが要求される。この点は、実橋脚の状況を確認しておく必要がある。

5. まとめ

本論文は、実験と数値計算を組み合わせたオンライン実験の手法を用いて、一層目はり中央腹板がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンの地震応答解析を行ったものである。本文で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 一層目はり中央を実験模型に置換した二層門形ラーメンの数値解析モデルを提示し、オンライン実験法により、はり腹板のせん断座屈崩壊を考慮して、地震応答解析を行う手順を示した。
- 2) ラーメンの水平復元力ー変位曲線は、一層目はり中

央腹板のせん断崩壊挙動によって影響を受ける。しかし、腹板に斜め張力場が発生してせん断耐力が上昇すると、一層目より腹板のせん断崩壊がラーメンの水平復元耐力に及ぼす影響は小さくなる。

- 3) はり腹板にせん断座屈が起こると、ラーメンの柱基部と二層目隅角部において、塑性変形が若干大きくなり、履歴エネルギーもそれに対応して増加する。
- 4) 一層目より中間部の腹板のせん断崩壊区間が短くなると、腹板の損傷が激しくなる。しかし、せん断崩壊区間長の変化が柱基部やラーメン全体の塑性変形性状、ならびに、ラーメン全体の消費エネルギーの応答性状に及ぼす影響は小さい。
- 5) ラーメンの復元力-変位関係が、一層目より腹板の先行降伏後、その他部材が降伏するまでの間で履歴ループを描くとき、せん断崩壊する一層目より腹板は柱基部+二層目隅角部の塑性変形を抑える効果を持ったエネルギー吸収部材として機能する。

謝辞

本研究を実施するにあたり、平成 14～15 年度、16～17 年度、および、平成 20 年度の科学研究費補助金・基盤研究 C（課題番号：14550488、16560422、および、20560452）、ならびに、平成 18 年度の大同工業大学・研究援助金の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中井 博, 河井章好, 吉川 紀, 北田俊行, 酒造敏廣: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査 (上), (下), 橋梁と基礎, Vol.16, No.6, pp.35～40, 1982 年 6 月, および, Vol.16, No.7, pp.43～49, 1982 年 6 月。
- 2) 酒造敏廣, 事口壽男, 長田好夫: 鋼変断面ラーメンの非弾性地震応答性状と崩壊モードに関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, 土木学会, pp.205～216, 1997 年 3 月。
- 3) 中井 博, 北田俊行, 西岡敬治, 狩野正人, 追田治行, 森 昭紀: 巨大地震による鋼製ラーメン橋脚横梁腹板のせん断座屈損傷のシミュレーション, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, 土木学会, pp.223～230, 1997 年 5 月。
- 4) 酒造敏廣: せん断崩壊型はり部材を有する鋼門形ラーメンの非弾性地震応答性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.44A, 土木学会, pp.169～178, 1998 年 3 月。
- 5) 酒造敏廣, 山田 幸: せん断崩壊型はり部材を有する鋼 2 層門形ラーメンの非弾性地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.45A, 土木学会, pp.227～234, 1999 年 3 月。
- 6) 森下泰光, 高久達将, 青木徹彦, 福本嘯士, 岡本 隆, 松井鋭一: 中間を有する鋼製ラーメン橋脚の耐荷力と変形性能, 構造工学論文集, Vol.46A, 土木学会, pp.831～840, 2000 年 3 月。
- 7) 酒造敏廣: せん断崩壊型はり部材を持つ鋼門形ラーメンの非弾性地震応答に及ぼすひずみ速度の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, 土木学会, pp.771～782, 2001 年 3 月。
- 8) Imai, S., Shimizu, S. and Miki, T: A Dynamic Elastoplastic Analysis on the Web Plates at the Center Part of Beam in a Steel Portal Frame, *Proc. of 8th International Conference on Shell Structure, Theory and Application*, Gdansk-Jurata, Poland, pp.476～480, Oct. 2005.
- 9) 武田八郎: せん断パネルの非弾性交番座屈実験, 鋼構造年次論文報告集, 第 2 巻, JSSC, pp.147～154, 1994 年 11 月。
- 10) 福本嘯士, 上野谷 実, 中村雅樹, 小林泰男: 繰返しせん断力を受けるプレートガーダーの強度と変形能, 構造工学論文集, Vol.46A, 土木学会, pp.143～150, 2000 年 3 月。
- 11) 葛西 昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, Chusilp, P.: せん断力を受ける無補剛箱形断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.129～140, 2002 年 4 月。
- 12) 酒造敏廣, 山田 幸, 樋口直紀: 繰返しせん断力を受ける鋼腹板の弾塑性応答性状に関する実験, 構造工学論文集, Vol.53A, 土木学会, pp.117～124, 2007 年 3 月。
- 13) 山田 幸, 酒造敏廣: はりがせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンのオンライン実験法による地震応答解析, 土木学会論文集 (投稿中)。
- 14) 中島正愛, 石田雅利, 安藤和博: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 417 号, pp.107～117, 1990 年 11 月。
- 15) 中島正愛, 赤澤隆士, 阪口 理: 実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp.61～71, 1993 年 12 月。
- 16) Hughes, T.J.R. and Liu, W.K.: Implicit-explicit finite elements in transient analysis, *Stability Theory, Journal of Applied Mechanics*, Vol.45, pp.371～374, June 1978.
- 17) Hilber, H.M., Hughes, T.J.R. and Taylor, R.L.: Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.5, pp.283～292, June 1977.
- 18) Bursi, O.S. and Shing, P.B.: Evaluation of some implicit time-stepping algorithms for pseudodynamic tests, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, pp.333～355, 1996.

(2008年9月18日受付)