

## 引張り筋違付き鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答

徐 建 年\* ・ 修 行 稔\*\*

Inelastic Dynamic Response of Steel Space Frames  
with Tensile Bracing Members

by

Xu Jian Nian\* and Minoru SHUGYO\*\*

The inelastic dynamic response of steel space frames with tensile bracing members is studied by a new numerical method. The frame is idealized as a multistory, lumped mass, rigid floor system. Three degrees-of-freedom per story, two horizontal translations of the mass center, and a rotation about the vertical axis are considered in dynamic analysis. The restoring forces of the frame are obtained by solving whole structure considering the influence of the large deformation of the frame and the axial deformation of columns by an advanced plastic hinge method. The response of single-story, single-bay space frames with tensile bracing members subjected to simultaneous action of two horizontal components of sinusoidal ground acceleration is studied and the results are compared with other accurate solutions.

## 1. 序

立体骨組構造物の地震応答特性を、部材の断面力の相互作用を考慮しつつ三次元的に解析することによって把握する必要があることは以前から指摘され、標準的な骨組についてその性状が次第に明らかにされてきている<sup>1)~4)</sup>。同時にまた、その解析法についての提案も数多い。しかしながら、これらの解法を部材数の多い構造物や多層の骨組の解析に拡張して適用しようとした場合、計算時間あるいは費用の非現実的なまでの増大が懸念されるか、でなければ解析精度に不安があるか、いずれの解法にも問題点が残されているように思われる。

著者の一人は別報で静的な繰り返し荷重を受ける鋼

構造立体骨組の非線形解析法として、汎用性と計算時間の点で最も有利な塑性関節法に基づきながら、精度をいわゆる部材細分割法に準じる程度に高めた手法を提案し<sup>5)</sup>、さらにこの解法を基礎にした、水平2方向の地震動入力を受ける鋼構造立体骨組の動的応答解析法を示したが<sup>6)</sup>、本論文はこの動的解析法によって引張り筋違付き骨組の応答を解析し、藤本ら<sup>7)</sup>の精密な数値解と比較することによって解法の精度の検証を行うものである。

## 2. 解析法

本解法では骨組を質点系にモデル化するが、質点の運動の自由度と質点に働く復元力の計算に用いるもと

平成元年4月28日受理

\*中国冶金部建築研究総院 (Aseismic Engineering Department, Central Research Institute of Building and Construction, MMI, Beijing, China)

\*\*構造工学科 (Department of Structural Engineering)

もとの骨組の自由度とを独立に考え、復元力は質点の変位を換算して得られる骨組各節点の変位を強制変位として骨組に与えて骨組を全体的に解くことにより得る。従って、動的な効果は無視されるものの、骨組の大変形や柱材軸方向の変形などが復元力におよぼす影響が考慮できる。

2. 1 立体骨組のモデル化と運動方程式

動的な解析に関しては、立体骨組を次のような仮定のもとにモデル化する<sup>9)</sup>。

- (1) 骨組の各層の質量は床板位置に集中し、床板は剛体であるとみなせる。
- (2) 剛体の動的な応答に関する自由度は、水平2方向への並進および重心を通る鉛直軸回りの回転を成分として1層あたり3である。

すると、Fig. 1 に示す多層立体骨組の運動方程式は(1)式ようになる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Q(u) = -M\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここに、 $M$  は各層床板の質量および重心( $O_i, i = 1 \sim n$ )を通る鉛直軸回りの慣性モーメントを成分とする行列、 $C$  は各層の粘性減衰係数を成分とする行列、 $Q(u)$  は各層床板重心位置の骨組の復元力を成分とするベクトル、 $u$  は各層床板重心の  $y, z$  方向および  $x$  軸回りの回転角を成分とするベクトル、 $\ddot{u}_g$  は地動加速度ベクトルである。(1)式の数値積分はニューマークの  $\beta$  法 ( $\beta = 1/6$ ) を用いて反復法で行う。

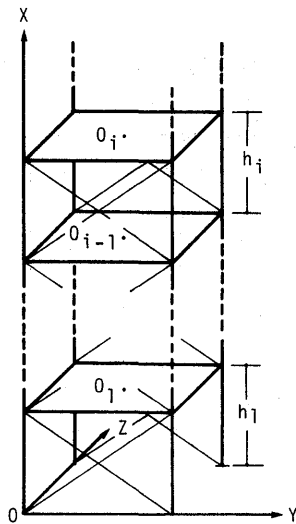


Fig. 1 Analytical Model

2. 2 骨組の復元力の算定

序で述べたように本解法では骨組の復元力を文献5の方法で得るのであるが、復元力の算定に際しては動的な解析に用いるモデルとは独立に次のような方針に従って骨組をモデル化する。

- (1) 床板は剛体とするが、その変位については動的な応答に関する自由度に加えて鉛直変位および重心を通る水平2軸回りの回転を許容する。
- (2) はりは骨組のそれぞれの態様に依じて適当な剛性を持った部材または剛体として取り扱う。
- (3) 引張り筋違材の復元力特性は、Fig. 2 に示す slip model とする。

具体的な解析手順をはりが充分剛で床板と一体となって動いているとみなせる場合を例にとり述べて以下のようにする。

- (1) 1部材1要素を基準として骨組を要素に分割する。ブレースはFig. 2 に示すような軸方向剛性のみを持つ部材として取り扱う。はり要素は必要ない。
- (2) 床板が剛体であるという条件から、各層の床板と柱との接合点の鉛直変位と水平2軸回りの回転を床板の重心の鉛直変位と水平2軸回りの回転によって表すことができるから、この関係を用いて剛性行列を縮約する。
- (3) 各層の床板の重量を重心位置に鉛直方向に载荷して骨組を解き、これを初期状態とする。
- (4) (1)式の数値積分によって床板重心の変位が得られれば、これを換算することによって骨組各節点の水平2方向変位と鉛直軸回りの回転が求まり、前段階での変位との差として各変位の増分が得られるから、これを骨組各節点に強制変位増分として与えて骨組を解くことによって各節点の復元力が計算できる。
- (5) 床板重心の復元力を各節点の復元力を用いて(2)式で計算する<sup>1)</sup>。

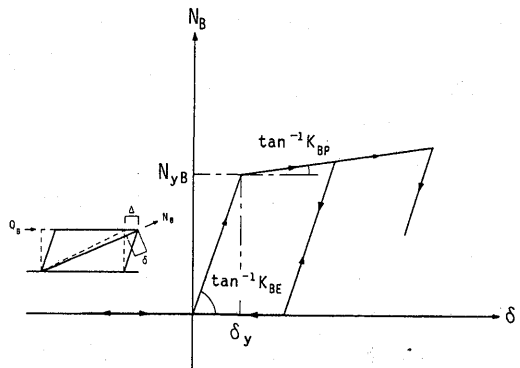


Fig. 2 Axial Load-Displacement Relationship of Bracing Members

$$\left. \begin{aligned} Q_{yi} &= \sum_j Q_{yij} \\ Q_{zi} &= \sum_j Q_{zij} \\ Q_{\theta i} &= \sum_j (a_{yij} Q_{zij} - a_{zij} Q_{yij} + Q_{\theta ij}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $Q_{yi}$ 、 $Q_{zi}$ 、 $Q_{\theta i}$  はそれぞれ  $i$  ( $i = 1 \sim n$ ) 層の床板重心の  $y$ 、 $z$  方向復元力および鉛直軸回りの回転に関する復元力、 $Q_{yij}$ 、 $Q_{zij}$ 、 $Q_{\theta ij}$  はそれぞれ  $i$  層の節点  $j$  ( $j = 1 \sim m$ ) の  $y$ 、 $z$  方向復元力および鉛直軸回りの

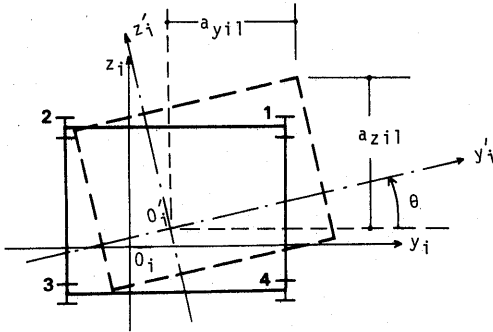


Fig. 3  $i$ -th Floor of Frame

モーメント、 $a_{yij}$ 、 $a_{zij}$  はそれぞれ  $i$  層の節点  $j$  ( $j = 1 \sim m$ ) の現在の  $y_i$ 、 $z_i$  座標 (Fig. 3 参照) である。

2. 3 復元力算定法の精度

鈴木ら<sup>9)</sup> が引張り筋違付き立体骨組の静的な加力実験結果を報告しているので、これと前節で述べた復元力算定法によって得られる結果とを比較して解法の精度を確認しておくことにする。

2. 3. 1 試験体と解析モデル

試験体の形状寸法ならびに加力位置と加力方向を Fig. 4 および Table 1 に示す。骨組 FA が文献 9 の A2 に、FB が同じく B に対応している。Table 2 は使用された鋼材の機械的性質である。

解析においては、柱脚、柱とはりの接合部および床板重心 (加力点) を節点として柱、はり、ブレースをそれぞれ 1 要素で近似し、加力点で接合される X 型水平筋違材ははり要素と同じ断面を持つ 4 個の要素に置換した。解析に際しては階高を 180cm、はりの長さを 140 cm とし、柱脚を完全固定、各柱頭に軸力を載荷した後水平方向への繰返し加力を行った。

2. 3. 2 実験結果と解析結果との比較

実験結果と解析結果を Fig. 5~Fig. 9 に示す。実線が文献 9 の実験結果、破線が解析結果である。図中の

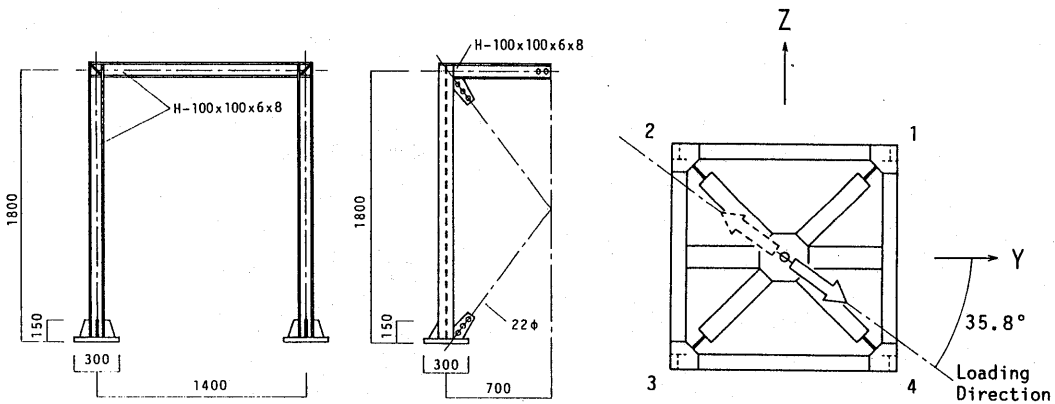


Fig. 4 Dimensions of Test Frame and Loading Condition<sup>9)</sup>

Table 1 Dimensions of Test Frame

	Beams and Columns	Braces	$h$ (mm)	$\ell$ (mm)	$h/i_x$	$h/i_y$	$P/P_y$
FA	H-100×100×6×8	22φ	1797	1402	42.8	73.6	0.20
FB	H-100×100×6×8	16φ	1799	1400	42.7	73.9	

$h$  : column height  $P$  : column axial load  
 $\ell$  : beam length  $P_y$  : yield axial load of a column  
 $i_x, i_y$  : radii of gyration of a column about  $x$ - and  $y$ -axis, respectively

Table 2 Mechanical Properties of Test Frame Members

	Beams and Columns						Braces					
	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$	$\epsilon_{st}/\epsilon_y$	$E$ (t/cm <sup>2</sup> )	$E_{st}/E$	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$	$\epsilon_{st}/\epsilon_y$	$E$ (t/cm <sup>2</sup> )	$E_{st}/E$
FA	2.90	4.54	0.0014	15.3	2190	0.0150	2.59	4.41	0.0013	15.1	2220	0.159
FB	2.95	4.59	0.0013	15.5	2060	0.0152						

$\sigma_y$  : yield stress  
 $\sigma_u$  : tensile strength  
 $\epsilon_y$  : strain at yield stress  
 $\epsilon_{st}$  : strain at initial strain hardening  
 $E$  : modulus of elasticity  
 $E_{st}$  : strain hardening modulus

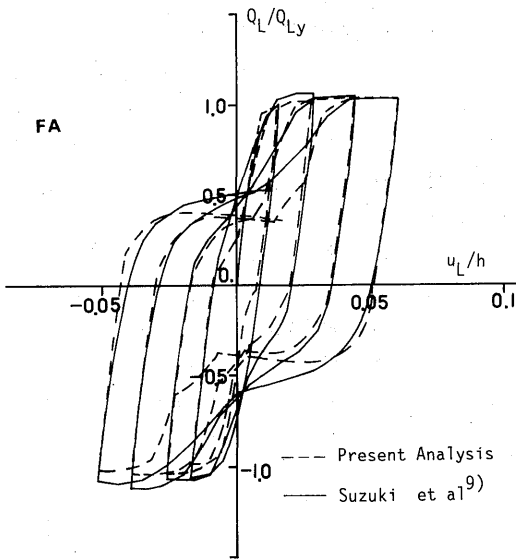


Fig. 5 Lateral Force-Displacement Relationship of FA Frame in Loading Direction

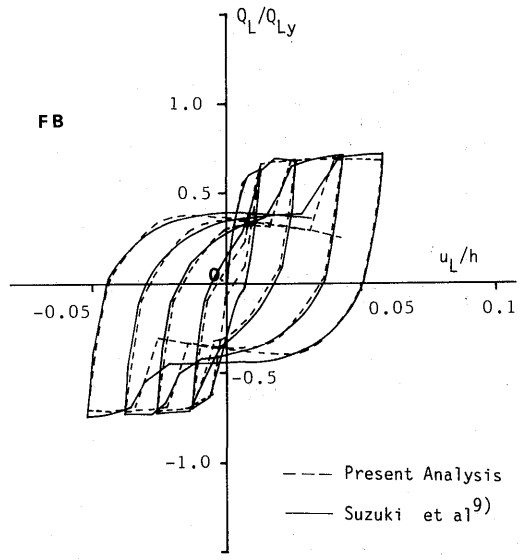


Fig. 6 Lateral Force-Displacement Relationship of FB Frame in Loading Direction

変位, 荷重およびその無次元化の基準値は次の通りである.

- $u_L$  : 骨組中心の加力方向への層間変位
- $\beta$  : 骨組中心の回転角
- $v_i, w_i$  : はし材  $i$  の Y, Z 方向層間変位
- $Q_L$  : 水平力
- $Q_{yi}, Q_{zi}$  : 柱材  $i$  の Y, Z 方向せん断力
- $h$  : 階高
- $Q_{Ly}$  : 水平力の Z 方向成分が骨組の Z 方向降伏荷重になる時の水平力
- $Q_{zyi}$  : 柱材  $i$  の Z 方向降伏時のせん断力
- $Q_{byi}$  : 筋違材  $i$  の降伏時に分担するせん断力

$u_L$  と  $\beta$  の算出法については文献 9 を参照されたい。また,  $Q_{Ly}$ ,  $Q_{zyi}$  は軸力の影響を無視した値である。

Fig. 5 と Fig. 6 はそれぞれ骨組 FA と FB の骨組中心の水平力～層間変位関係, Fig. 7 は FA 骨組の水平

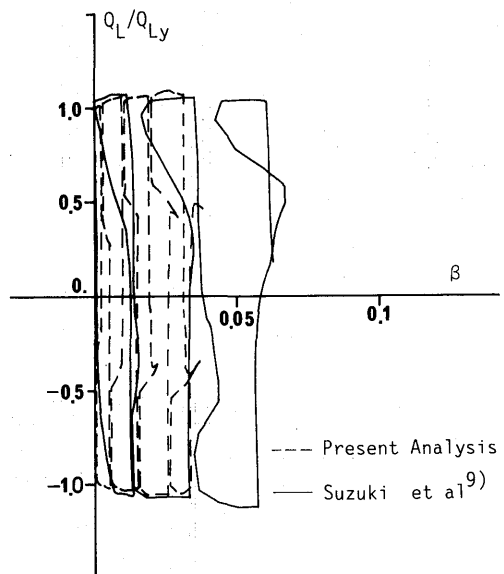


Fig. 7 Lateral Force-Torsional Displacement Relationship of FA Frame

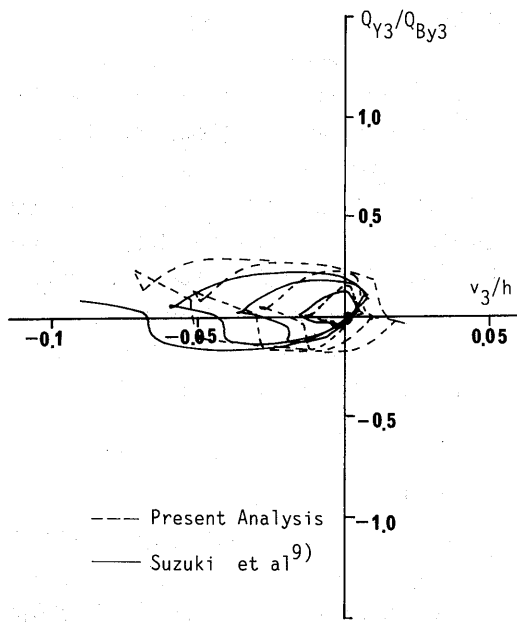


Fig. 8 Lateral Force-Displacement Relation of Column 3 in Y-Direction

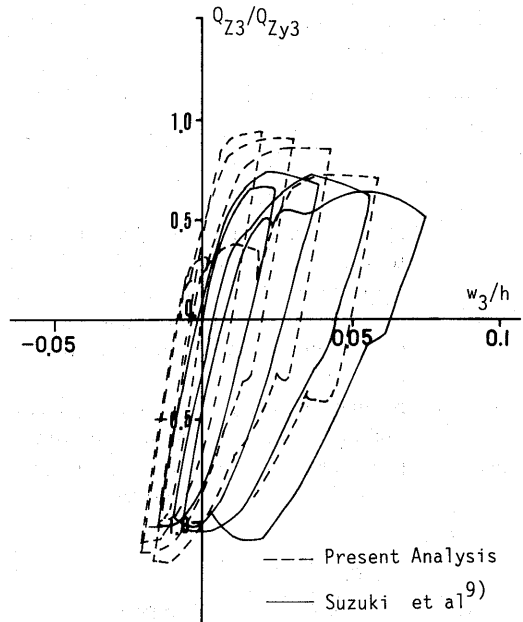


Fig. 9 Lateral Force-Displacement Relation of Column 3 in Z-Direction

Table 3 Dimensions and Mechanical Properties of Frames, Columns and Braces

Columns			Braces			Height <i>h</i> (cm)	Span (cm)	<i>P/P<sub>y</sub></i>	<i>h/i<sub>x</sub></i> <i>h/i<sub>y</sub></i>
Section	$\sigma_y$ ( <i>t/cm<sup>2</sup></i> )	<i>E<sub>st</sub>/E</i>	<i>A<sub>B</sub></i> ( <i>cm<sup>2</sup></i> )	$\sigma_y$ ( <i>t/cm<sup>2</sup></i> )	<i>E<sub>st</sub>/E</i>				
H-300×300 ×10×15	2.40	0.01	8.05	2.40	0.01	300	500 in X-and Y-Direc.	0.3	22.9( <i>h/i<sub>x</sub></i> ) 39.9( <i>h/i<sub>y</sub></i> )

*A<sub>B</sub>* : cross sectional area of a brace

$\sigma_y$  : yield stress

*E* : modulus of Elasticity

*i<sub>x</sub>, i<sub>y</sub>* : radii of gyration of a column about *x*- and *y*-axis, respectively

*P* : column axial load

*P<sub>y</sub>* : yield axial load of a column

*E<sub>st</sub>* : strain hardening modulus

力～ねじり変形関係, Fig. 8 と Fig. 9 はそれぞれ FA 骨組の柱 3 の Y 方向 (弱軸方向) および Z 方向 (強軸方向) のせん断力～層間変位関係である。水平力～ねじり変形関係にかなりの差が見られ, その他の挙動にも部分的な誤差があるが, 解析の結果は骨組の全体的な挙動をよく表現している。

### 3. 引張り筋違付き立体骨組の 2 方向地動

#### 入力下の応答

本論文の目的は, 提案する簡略な弾塑性動的応答解析法の精度を検証することである。そのためには実験あるいはより精密な数値解析法との比較を行わねばならない。しかしながら, プレース付き立体骨組の動的弾塑性応答に関する研究は従来極めて少く, 高精度の

解としてはわずかに藤本ら<sup>7)</sup>の CDC 法を基礎にした 1 層 1 スパン立体骨組の応答に関する研究がある程度である。ここではこの藤本らの解との比較を試みる。

#### 3. 1 解析モデル

解析モデルは形状としては Fig. 4 に示したものと同じである。各部の寸法と部材の力学的特性を Table 3 に示す。入力地動は次式で表される正弦波である。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{v}_g &= A_Y(Q_{Yy}/M) \sin(\omega_Y t + \phi_Y) \\ \ddot{w}_g &= A_Z(Q_{Zy}/M) \sin(\omega_Z t + \phi_Z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに,

*Q<sub>Yy</sub>, Q<sub>Zy</sub>* : 軸力による降伏モーメントの低下を無視した骨組の Y, Z 方向の降伏荷重

*M* : 剛体の質量

Table 4 Conditions of Sinusoidal Ground Accelerations

Frame	$A_Y$	$A_Z$	$\omega_Y$	$\omega_Z$	$\psi_Y$	$\psi_Z$
F1			8.726	8.726		$\pi/2$
F2	0.91	0.91	6.108	6.108	0	$\pi/2$
F3			6.108	6.108		0

$A_Y, A_Z$  : ratios of maximum ground acceleration to yield acceleration of a frame in Z-direction neglecting axial load effect on the reduction of the yield moment of a column in Y- and Z-direction, respectively

$\omega_Y, \omega_Z$  : circular frequency of ground acceleration in Y- and Z-direction, respectively

$\psi_Y, \psi_Z$  : phase angles of ground acceleration in Y- and Z-direction, respectively

$A_Y, A_Z$  : 加速度比

$\omega_Y, \omega_Z$  : Y, Z方向の入力の円振動数

$\psi_Y, \psi_Z$  : Y, Z方向の入力の位相角

$t$  : 時間

である。解析は Table 4 の 3 種類の入力条件に対して行った。表中の F1, F2, F3 はそれぞれ文献 7 の

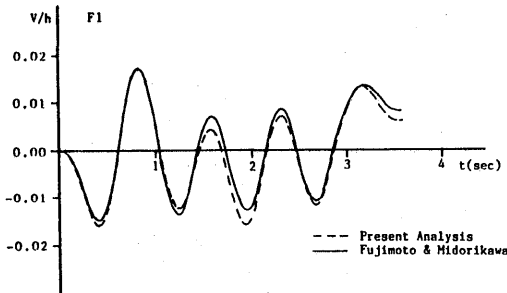
HBA1, HBA3, HBA4 骨組に対応している。

3. 2 解析結果の比較

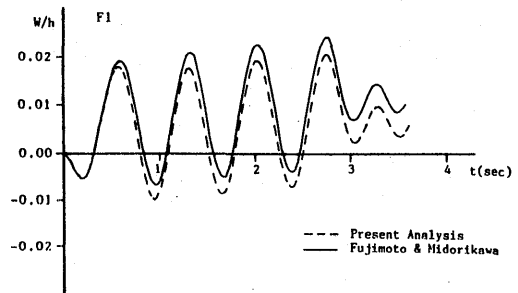
Fig. 10 に F1 骨組の床板重心の Y 方向 (弱軸方向) と Z 方向 (強軸方向) への層間変位~時間関係および復元力~層間変位関係を示す。Fig. 11 と Fig. 12 はそれぞれ F2 と F3 骨組の Y および Z 方向復元力~層間変位関係および復元力~時間関係である。いずれも図中の実線が藤本らの解析結果、破線が本解法の結果である。部分的な差異はあるが全体的に極めてよく一致しており、本解法は 1 部材 1 要素近似の簡略な解法としては相当に高い精度を有していると言えよう。

4. 結語

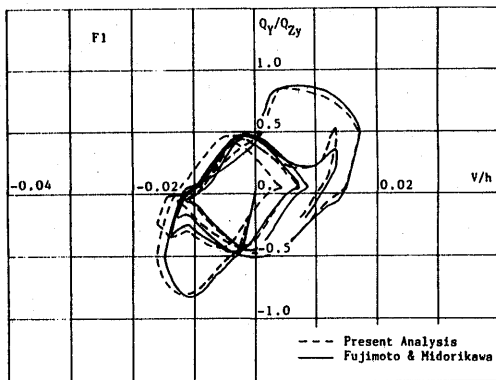
先に提案した鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答解析法<sup>9)</sup>の引張り筋違付き立体骨組への適用を試み、既往の静的加力実験結果および動的応答に関する精密数値解との比較を行った。その結果、本解法が 1 部材 1 要素近似を基準とする簡略な解法としては極めて高い精度で実験結果や精密な解析で得られた挙動を追跡し得ることが明らかになった。



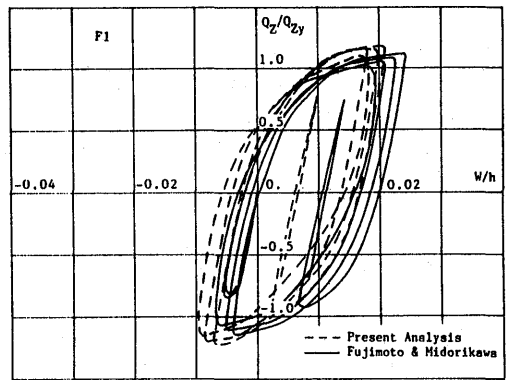
(a) Relative Displacement-Time History at Mass Center in Y-Direction



(b) Relative Displacement-Time History at Mass center in Z-Direction

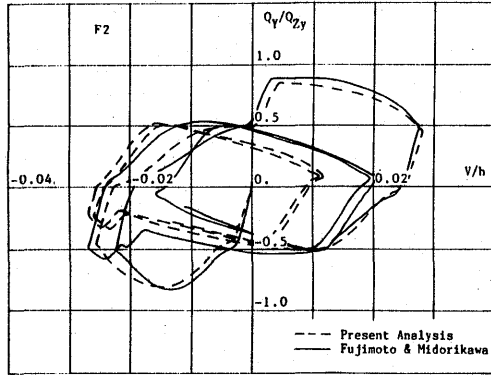


(c) Restoring Force Response to Relative Displacement in Y-Direction

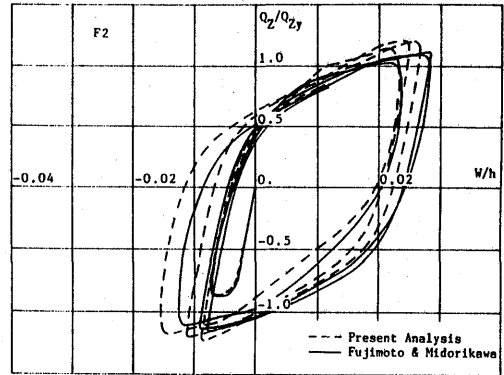


(d) Restoring Force Response to Relative Displacement in Z-Direction

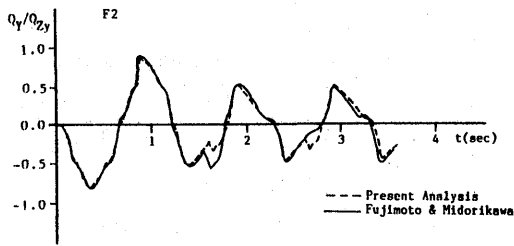
Fig. 10 Comparison of Response of F1 Frame



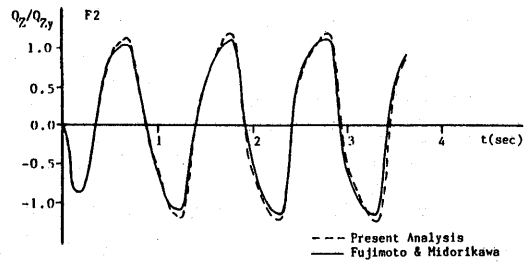
(a) Restoring Force Response to Relative Displacement in Y-Direction



(b) Restoring Force Response to Relative Displacement in Z-Direction

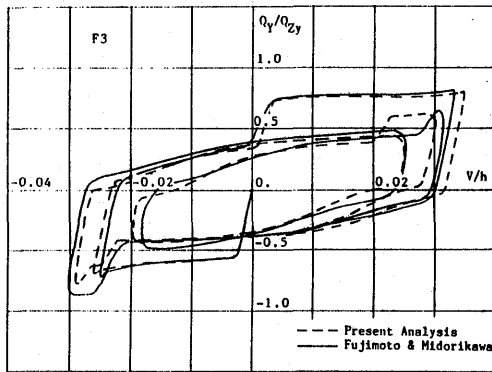


(c) Restoring Force-Time History in Y-Direction

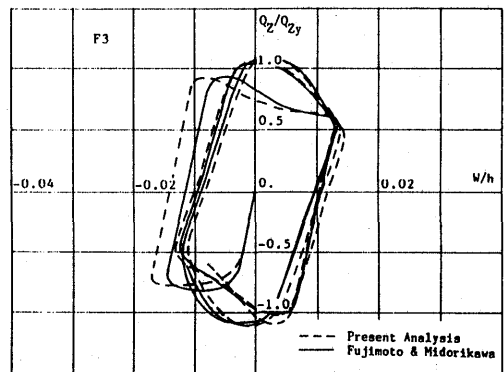


(d) Restoring Force-Time History in Z-Direction

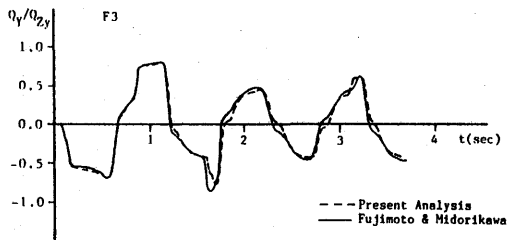
Fig. 11 Comparison of Response of F2 Frame



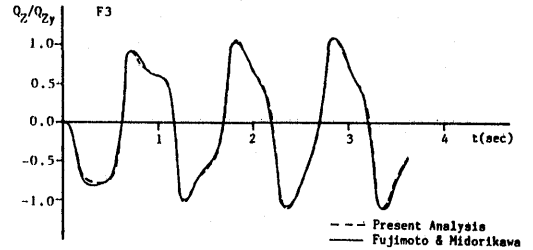
(a) Restoring Force Response to Relative Displacement in Y-Direction



(b) Restoring Force Response to Relative Displacement in Z-Direction



(c) Restoring Force-Time History in Y-Direction



(d) Restoring Force-Time History in Z-Direction

Fig. 12 Comparison of Response of F3 Frame

本解法では復元力の計算を汎用性の高い立体骨組の解法によって行うため任意の形状の骨組に適用可能であり、1部材1要素近似を標準とする低自由度の解法であるから多層多スパンの骨組への適用も可能である。

#### 参考文献

- 1) 藤本盛久, 緑川光正: 鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答に関する研究, その1, 日本建築学会論文報告集, 第282号, pp. 9-21, 昭和54年8月
- 2) 松井千秋, 森野捷輔, 内田保博: 水平2方向外力を受ける鋼構造立体骨組の弾塑性性状, その3, 日本建築学会論文報告集, 第349号, pp. 22-33, 昭和60年3月
- 3) 五十嵐定義, 井上一郎, 平原章次, 多田元英: はりブレース降伏形立体骨組の動的弾塑性応答解析例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1929-1930, 昭和56年9月
- 4) 谷口英武, 高梨晃一, 田中尚: 2方向水平力を受けるH形鋼柱の復元力特性モデルとその利用, 日本建築学会論文報告集, 第337号, pp. 53-64, 昭和59年3月
- 5) Shugyo, M.: A new plastic hinge method for steel space frames, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 36, pp. 245-262, 1988
- 6) 修行 稔, 徐 建年: 鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答の一解法, 構造工学論文集, Vol. 33B, pp. 283-294, 1987
- 7) 藤本盛久, 緑川光正: 鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答に関する研究, その2 引張筋違材を有する1層1スパン立体骨組, 日本建築学会論文報告集, 第298号, pp. 19-29, 昭和55年12月
- 8) Pecknold, D. A.: Inelastic structural response to 2D ground motion, ASCE, Vol. 100, No. EM 5, pp. 949-963, 1974
- 9) 鈴木敏郎, 玉松健一郎, 久保寺勲: 4本柱立体骨組の弾塑性挙動に関する実験的研究—低層鉄骨造骨組の耐震性に関する研究—その2—, 日本建築学会論文報告集, 第265号, pp. 33-43, 昭和53年3月