

# 直下型地震による大型鋼構造物の過渡応答 及び破壊過程

谷村眞治<sup>1</sup>・三村耕司<sup>2</sup>・榎田努<sup>3</sup>・齋籐年正<sup>4</sup>・小川信行<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪府立大学大学院教授 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>2</sup>工博 大阪府立大学大学院助教授 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>3</sup>工博 大阪府立大学大学院助手 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町二丁目2-21)

<sup>5</sup>工博 防災科学技術研究所 防災総合研究部三次元振動破壊研究室  
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

To study the mechanism of the brittle fracture of steel box columns of a tall building subjected a strong near-source earthquake, the initial transient behavior of the building model was analyzed. It was found that tensile stresses in many columns exceed the tensile strength of the column material in the initial transient stage. Through performing the simulation of the fracture process and discussing about the rate sensitive stress-strain relation peculiar to steel and the size effect on the initiation of the brittle fracture, it was verified numerically that the brittle fracture might occur even at the intermediate strain rate once the tensile stress reached the dynamic yield stress of the material. Numerical study was also carried preliminarily to establish a new technique to prevent the occurrence of such a high tensile stress in a tall building due to the strong near-source earthquake.

**Key Words :** near-source earthquake, brittle fracture, transient stage, tall building, numerical simulation

## 1. 緒言

阪神・淡路大震災時(1995年1月17日)に大型鋼構造物に生じた特異な地震被害例として、高層建築物の鋼製箱型断面柱(ユニバーサルボックス)のぜい性破断<sup>1)</sup>、ニールセン橋の固定支承の破壊<sup>2)</sup>、鉄筋コンクリート製T型長柱の水平破断、鋼製門型橋脚の提灯型座屈、その他が挙げられている。

筆者らは、2種類の橋脚の有限要素モデルに対する数値シミュレーションにより、直下型地震動の揺れ初期の激しい上下・水平動の作用時と対応したモデルの過渡応答時の主要応答により、動的破損や破壊の開始が起こる可能性が高くなるときは、その初期の激しい揺れ波形(速度波形)の立上り時間や立下り時間が短いときほど、また解析モデルがより高層や長大となることであることを指摘した<sup>3-5)</sup>。これらの特異な動的挙動は、構造物中を伝わる応力波の影響を考慮することで、理解される。

また、ニールセン橋の固定支承の破壊の過程について、ニールセン橋及び地盤を含めた有限要素モデルの三次元衝撃解析を行って検討した。その結果、直下型地震動の激しい揺れによりニールセン橋に振動が生じ、それによって上支承と下支承がいったん離れた後、両者間の相対速度(地盤の速度ではない)が5m/s以上で衝突す

る場合において、上支承内部に生じる動的引張応力が材料の動的降伏応力を超えるため、上支承においてぜい性引張破断が起きた可能性が高いことを明らかにした<sup>6,7)</sup>。

また筆者らは、直下型地震による大型鋼構造物の破壊過程解明のための、今一つのアプローチとして、鋼製箱型断面柱にぜい性破断が生じた24階建ての実高層建築物<sup>8)</sup>に近づけた有限要素モデルを作成し、そのモデルの底部に(のみ)、兵庫県南部地震時の各種記録波形を入力して、その構造物モデルの過渡応答時の三次元的挙動を解析して検討した。その結果、そのような24階建ての高層建築物に阪神・淡路大震災時に記録された程度の激しい上下・水平方向の揺れが作用するとき、その激しい揺れの作用時とほぼ対応した時刻における大型鋼構造物の過渡応答時において、その構造物中の複数の柱に高い引張応力が発生して、ぜい性破断が生じる場合のある可能性が高いこと等がわかった<sup>8)-12)</sup>。

本報告では、直下型地震による大型鋼構造物にぜい性破断が起こる過程を、より具体的に検討するために、鋼部材に高い引張力が作用するときの、鋼材特有の動特性とぜい性破断発生との関係と、同じ鋼材でも、対象とする材料が小型の試験片のときから、大型の鋼部材となることによりぜい性破断が発生しやすくなる関係につい

て、数値シミュレーションを行って検討した結果を示す。また、24階建ての高層建築物モデルに直下型地震による激しい揺れが作用するとき、その揺れ波形の形により発生する引張力が変化する様子について、若干の検討を行った結果を報告する。また、直下型の激しい地震動が作用するとき、その激しい揺れ波形の入力時刻と対応した大型鋼構造物の過渡応答時における部材に生じる高い引張応力の発生をおさえるための、一方法を示し、その有効性についての予備的検討を行った。すなわち、その大型鋼構造物の柱の一部に、軟弱部材を挿入することによる発生応力をおさえることへの有効性について検討したので、それらの結果を報告する。

## 2. ぜい性破壊発生に及ぼす鋼材の動特性と部材の大きさの影響

阪神・淡路大震災での被害例として、柱のぜい性破断の実例を図-1に示す。このようなぜい性破断の破壊過程を解明するための一つのアプローチとして、24階建ての高層建築物の実建築物<sup>9)</sup>に近づけた有限要素モデルを作成し、このモデルの底部に阪神・淡路大震災時の記録波形を入力して、揺れ初期の激しい上下・水平動によるその入力時間とほぼ対応した過渡応答時に注目して、動的有限要素法コードのMSC.Dytran<sup>13)</sup>により、その三次元動的挙動解析を行った<sup>8), 11), 12), 14)</sup>。その結果、弾塑性体モデルの底部に神戸海洋気象台での記録波形を入力するときは、揺れ初期の激しい揺れによる過渡応答時に、柱の一部に、その部材の降伏応力(仮定した静的降伏応力)を超える引張応力を生じるところが40箇所あった。また、線形弾性体モデルに同記録波形を入力するときは、その部材の引張強さ(仮定した静的引張強さ)を超える引張応力を生じるところが、16箇所あった。このような高い引張応力の発生により、柱にぜい性破断が生じ得るメカニズムについて、鋼材特有の動特性と鋼部材の大きさを考慮して検討した<sup>11), 12)</sup>。このようなメカニズムを例証するための一つの方法として、数値シミュレーションにより、鋼材特有の動特性と鋼部材の大きさ

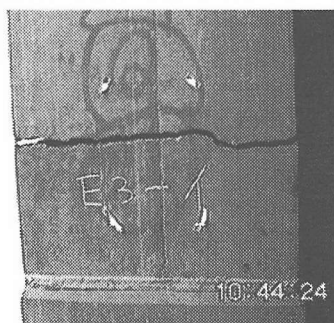
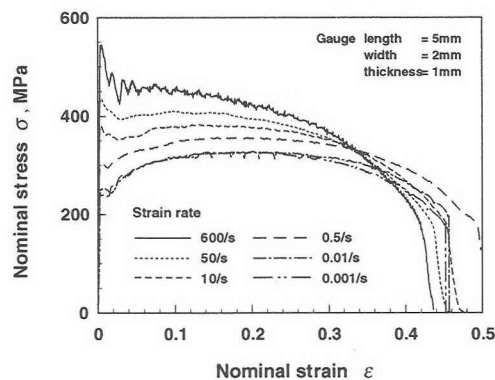


図-1 鋼製柱のぜい性破断の例

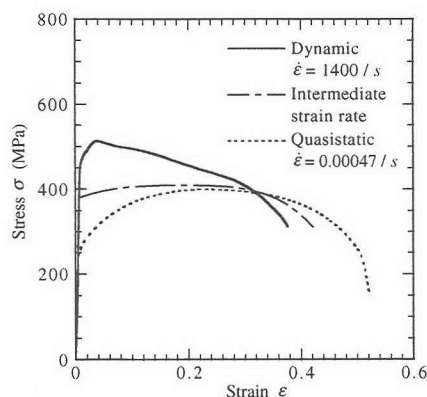
を変化させることによる変形形態とぜい性破断の発生状態を検証した。下記にその結果を示す。なお、このことに関連する最近の論文として、鉄骨のぜい性破断に及ぼす材料じん性と板厚の影響—鉄骨破断に関する研究 その1—<sup>15)</sup>と、地震時の歪速度を考慮した建築鉄骨歪集中部におけるき裂の挙動<sup>16)</sup>の論文が発表されている。

図-2に、鋼材の引張応力—ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度依存性の例を示す。図-2(a)は、厚さ1mmの板状試験片を用いて、検力ブロック式高速材料試験機(驚宮製作所製)による広ひずみ速度域での引張試験を行って求めた結果である。図-2(b)は、同じく板状試験片を用いて、非共軸ホプキンソン棒法<sup>17)</sup>での引張試験を行った結果である。図-2(a), (b)に例示されているように、鋼材特有のひずみ速度依存性がある。鋼材の強度のひずみ速度依存性は、 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 程度のひずみ速度域では、主として熱活性化過程で支配されて、各変形(ひずみ)状態に対する変形抵抗(強さ)はひずみ速度の対数とほぼ直線関係になる<sup>9), 10), 18), 19)</sup>。

前述した24階建ての高層建築物モデルの三次元応答解析<sup>8), 11), 12)</sup>での弾塑性解析においては、各鉄骨部材の材料の応力—ひずみ関係は、図-2(b)の点線で例示されるような準静的な応力—ひずみ関係を、弾・線形硬化塑性型の応力—ひずみ関係で単純近似化していた。その一方、弾塑性解析の結果より、過渡応答時の主要応答で、



(a) 冷間圧延鋼板の応力—ひずみ曲線 (SPCC)



(b) 一般鋼材の応力—ひずみ曲線 (270 MPa)

図-2 鋼材の静的・動的引張応力—ひずみ曲線の例

箱形柱において、その部材の降伏強さを超えるような大きな引張応力が生じているところでは、 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ の中ひずみ速度に達している箇所が多数あった。この $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ の中ひずみ速度域の応力-ひずみ曲線は、図-2(b)の一点鎖線で示されているようになり、その加工硬化率はほぼ0となる。すなわち、 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ の中ひずみ速度域においても、一般鋼材は、加工硬化率が小さくなり、不安定変形を生じて、局所変形が生じやすい特性を有している<sup>9), 10), 18), 19)</sup>。

一方、箱形柱のような大きな部材に引張荷重が作用するときは、大型部材によるひずみの拘束条件下での変形となり、局所変形が生じやすくなる。いったん局所変形が生じると、その局所でのひずみ速度は、部材断面に一樣な変形が生じるときのひずみ速度よりも大幅に高くなる。このため、鋼製の箱形柱のような場合は、上記の鋼材特有の動特性(図-2参照)により、一層局所変形が進行することとなり、応力集中現象も加わり、ぜい性破断が発生しやすくなる。

これらのことを、定量的に例証するために、次のような数値シミュレーションを行った。すなわち、通常材料試験用の試験片と対応させて、図-3(a)に示す円柱状モデルの引張りの場合と、小型の部材の引張りに対応させた図-3(b)の板材の引張りの場合の挙動をLS-DYNAにより解析した。材料特性には、鋼材特有の動特性をモデル化して、準静的応力-ひずみ曲線と対応した真応力

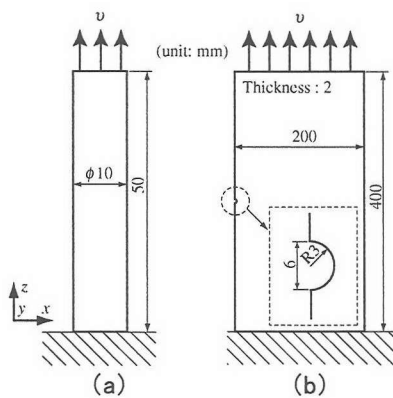


図-3 解析モデル

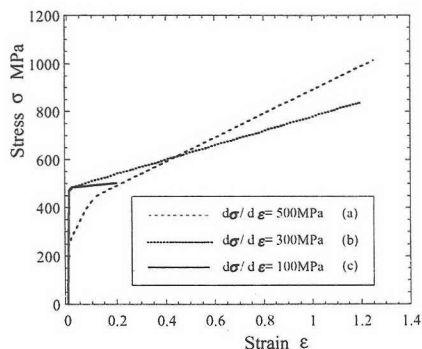


図-4 真応力-真ひずみ関係

-真ひずみ関係を図-4中の(a)で、また動的曲線で加工硬化率が小さくなったものの関係として、図-4中の(b) (中ひずみ速度の場合とほぼ対応)と(c) (高ひずみ速度の場合と対応)でモデル化した。これらの各直線の先端は、破断ひずみ値と対応している。図-3(a)の試験片の引張試験で、材料の静的及び動的真応力-真ひずみ関係が図-4中の(a)、(b)及び(c)であるときの破断後の試験片形状を図-5中の、それぞれ、(a)、(b)及び(c)で示す。同図中の(d)は試験前の試験片を示している。図-5中の(a)、(b)及び(c)に対応した破断直前での変形状態と応力分布状態を、それぞれ図-6中の(a)、(b)及び(c)で示す。これら引張試験片の両端間の軸方向ひずみは、それぞれ38.0%、16.7%及び5.3%となっている。これらの結果より、同じ小型の試験片の引張りの場合でも、静的と動的とに対応した鋼材特有の材料特性(図-4)によって、動的変形の場合は破断ひずみが小さくなり、ぜい性破断の様相を示すことがわかる。

一方、図-3(b)の板の引張りでは、材料特性が図-4中の(a)と(b)のときの、変形状態と応力分布状態を、図-7中の、それぞれ(a)と(b)に示す。これより同じ準静的材料特性の図-4中の(a)の場合でも、小さい試験片の場合は図-6(a)のような延性を示すが、小型の板材の

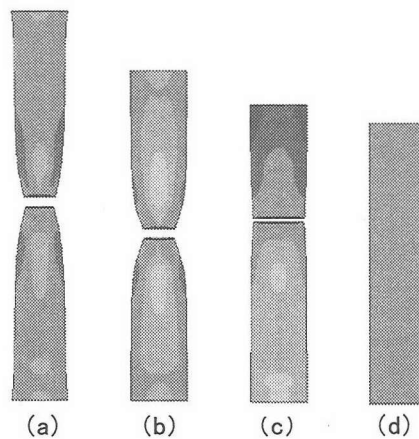


図-5 引張試験前後の試験片

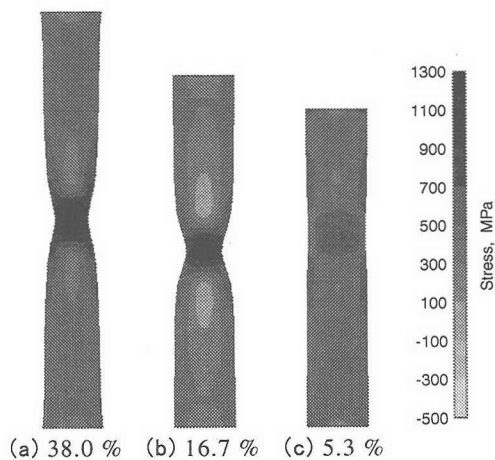


図-6 破断直前の試験片内の軸応力分布

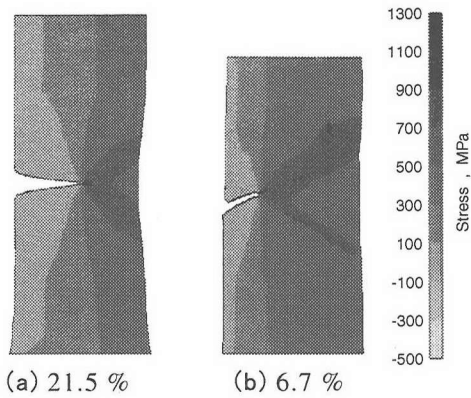


図-7 板内の最大主応力分布

場合は図-7(a)のようにぜい性的な変形となっている。中ひずみ速度とほぼ対応した図-4中の(b)の場合は、図-7(b)のように、さらにぜい性的な変形挙動を示す。

これらの結果より、数10%程度の破断伸びを有する延性材料の場合でも、その材質が鋼材で、しかも大型部材のときは、その鋼材の動的降伏強さ(図-2(b)の1点鎖線で示すような加工硬化率がほぼ0に近い動的曲線の降伏点)に達するような動的引張応力がその大型部材に生じると、ぜい性破断が生じることになる。なお、このような動的引張応力が、直下型地震動により、高層建築物モデルの鋼製箱形柱に生じるかどうかを調べるためには、解析モデルを線形弾性体と仮定した弾性解析が、一つの有効な手法となる。このことから、前述したような弾性解析結果により、過渡応答時の主要応答において、箱型柱にその部材の引張強さ(図-2(b)の1点鎖線で例示されているように、その鎖線で示される曲線の動的降伏強さは、点線で示す準静的曲線の引張強さとほぼ対応している)を超える引張応力を生じていた箇所が15箇所あったことは、そのような箇所ではぜい性破断が生じる可能性が高いことと対応している。

### 3. 高い引張応力の発生を防止するための予備的検討

大型鋼構造物のモデルの一つとして、実高層建築物に可能な限り近づけた図-8と9に示すような24階建て鉄骨高層建築物モデルを作成して、そのモデルの下部(図-8)に阪神・淡路大震災時の各種記録波形を入力して、その激しい揺れ波形の入力時間と対応した過渡応答時の主要応答に、とくに注目して、一連の解析を行った(8, 11, 12, 14)。ここでは、高い引張応力の発生を防止するための予備的な検討として、同じモデルで線形弾性体を仮定し、図-10に示すような1階の全ての柱の上部の1/4の部分のみを、軟弱な部材の弾・直線硬化塑性体とすることにより、発生応力値の抑止効果を調べた。図-11に示す神戸海洋気象台での記録波形を、図-8に示すモデ

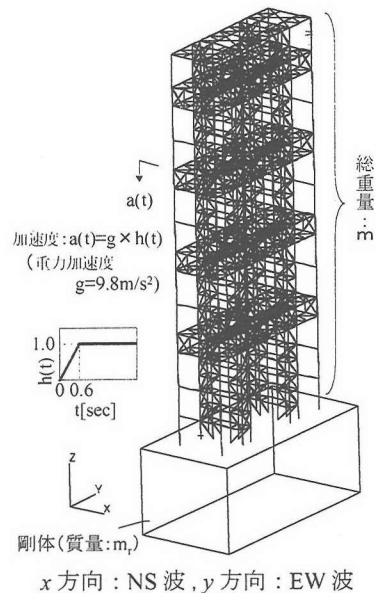


図-8 解析モデル

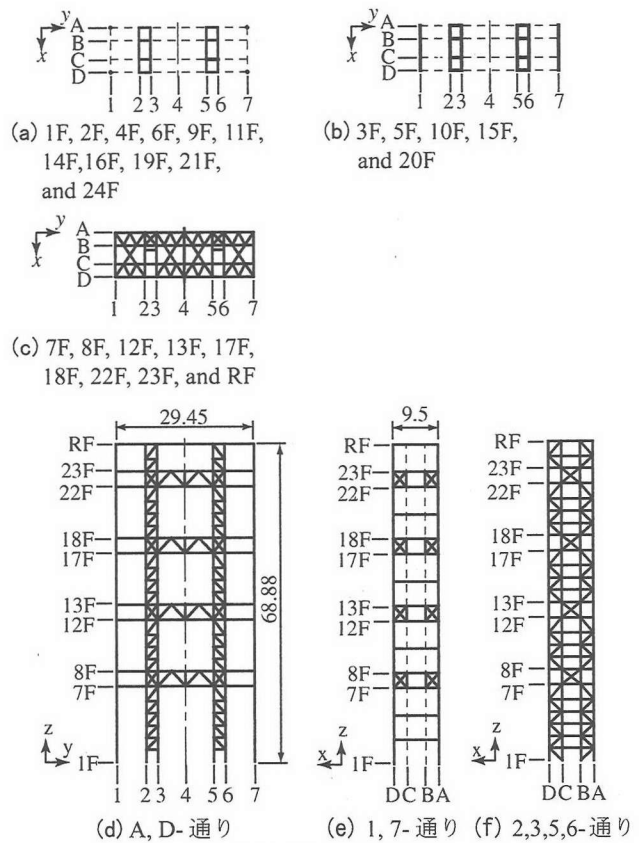


図-9 大型鋼構造物の解析モデル

ル下部の剛体のx方向にNS波、y方向にEW波、上下方向にUD波を入力した。鋼製柱の降伏強さを100としたときに対する軟弱部材の降伏強さの割合を25%としたとき、過渡応答時(2.8~4.5秒)に柱Dの各階に生じた最大引張応力の例を図-12中の実線で示す。同図中の破線は、軟弱部分を挿入しないときの弾性応答解析による結果を示す。この場合、12階の柱に生じた応力値は、弾性解析では700MPaであるが、軟弱部を挿入すると475MPaと減少している。挿入した軟弱部の降伏強度を

種々変えたとき、12階の柱に生じる最大引張応力の变化の様子を図-13に例示する。

このような検討を積み重ねて、通常多発するような比較的弱い地震動では構造物に破損等は生じないが、直下型のとくに激しい地震動のときには、大型鋼構造物の一部のみにすべりや、変形、圧潰などを生じさせ、その他の部材には高い動的応力の発生や破壊等を生じさせないようにする、一つの防止法の有効性を検討することも、重要となるであろう。

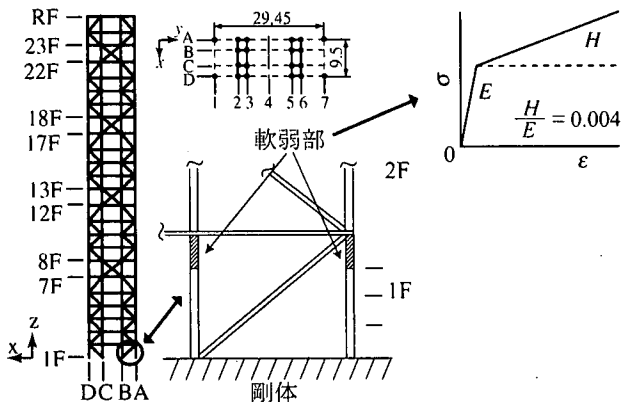


図-10 軟弱部を挿入した箇所

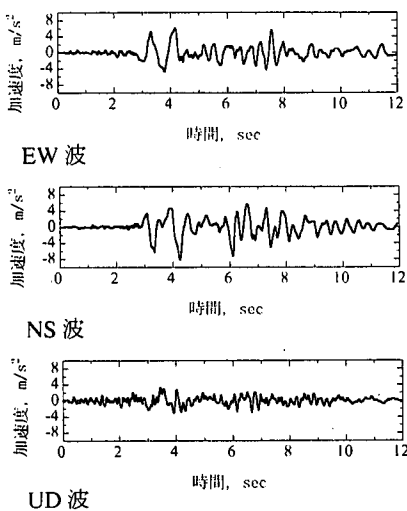


図-11 神戸海洋気象台での実測加速度波形

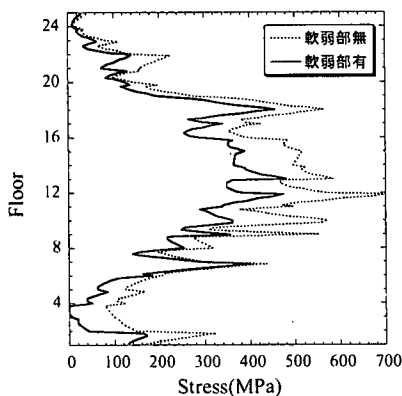


図-12 過渡応答時(2.8~4.5秒)に柱Dに生じた最大引張応力分布

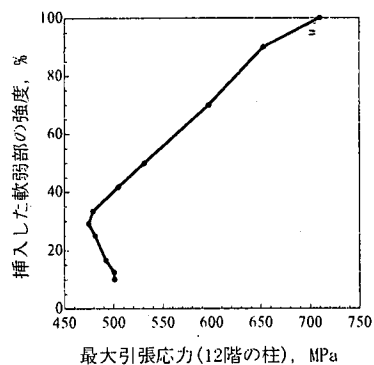


図-13 軟弱部の挿入による最大引張応力

#### 4. 大型鋼構造物の過渡応答に及ぼす揺れ波形の形状の影響

直下型地震での初期の激しい揺れ波形が大型構造物に作用するとき、その激しい揺れ波形の入力時間とほぼ対応した構造物の過渡応答時に生じる引張応力は、その入力波形(速度波形)の立上り時間や立下り時間が短いときほど、また構造物が長大となるときほど大きくなり、かつそのようなときの動的挙動は応力波伝ばの影響が無視できなくなる場合があることを指摘した<sup>2)-5)</sup>。

このことを例証するための一つの方法として、24階建て高層建築物モデル(図-8)の一部の構造(図-9の(f))の底部に、x方向に、EW波(図-11)を入力するときの構造物の三次元過渡応答解析を、MSC.Dytranで行った。その入力によるモデル底部の振幅は同じになるようにして、入力波の周期を半分( $n=0.5$ )、記録波形のまま( $n=1$ )及び2倍( $n=2$ )となるようにした波形を入力して比較した。それぞれの入力波形の初期の激しい揺れ波形の入力時間と対応した、2.4~3.1秒( $n=0.5$ の入力波形の場合)、2.8~4.2秒( $n=1$ の場合)及び3.6~6.4秒( $n=2$ の場合)の時間での過渡応答時において、各階の柱に生じた最大引張応力を図-14に例示する。この図より、このような高層建築物モデルの場合、入力部での揺れの振幅は同じであっても、その揺れの周期が短いとき(速く揺れるとき)ほど最大引張応力

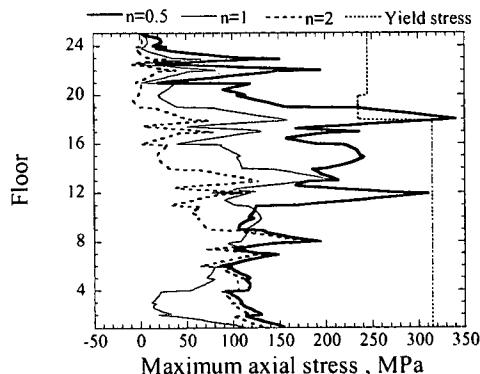


図-14 過渡応答時の主要応答での最大引張応力分布(2,3,5,6通りの構造に相当するモデルで評価)

が大きくなっていることがわかる。このような現象は、高層建築物モデル中を伝わる応力波伝ばの影響を考慮に入れると理解されやすい。

## 5. 結言

(1) 直下型地震による大型鋼構造物にぜい性破断が起こる過程を、より具体的に検討するために、鋼部材に高い引張力が作用するとき、鋼材特有の動特性とぜい性破断発生との関係と、同じ鋼材でも、対象とする材料が小型の試験片のときから、大型の鋼部材となることによりぜい性破断が発生しやすくなる関係とについて、数値シミュレーションを行って検証した。

(2) 直下型の激しい地震動が作用するとき、その激しい揺れ波形の入力時刻と対応した大型鋼構造物の過渡応答時における部材に生じる高い引張応力の発生をおさえるための、一方法について、その有効性についての予備的検討を行った。

(3) また、24階建ての高層建築物モデルに直下型地震による激しい揺れが作用するとき、その揺れの波形の形により発生引張力が変化する様子について、若干の検討を行った。このような検討を積み重ねて、通常多発するような比較的弱い地震動では破損等は生じないが、直下型のとくに激しい地震動のときは、大型鋼構造物の一部のみならず、変形、圧潰などを生じさせ、その他の部材には高い動的応力の発生や破壊等を生じさせないようにする、一つの防止法の有効性を検討することも、今後の重要な課題となるであろう。

謝辞：本解析用のモデル作成において、複数の建築専門家の論文中の手法を参照させていただいた。また、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 基盤研究(A)(1) (課題番号：11355025) (B)(2) (課題番号：10450050)、および平成13年度科学技術振興調整費(総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上の研究」の第3分科会の分担課題の1つ)による支援を受けたことを付記し、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 鉄骨造建築物 シェル・空間構造 容器構造, pp. 142-161, 1997.
- 2) Tanimura, S. and Mimura, K. : Dynamic Failure Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Proc. of the 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Melbourne, Australia, pp. 547-552, 1997.
- 3) 谷村真治・ほか3名：直下地震動による速度負荷を受ける構造物の動的挙動および破壊について, 日本機械学会材料力学部門所属 材料・構造物の衝撃破壊現象とその防止に関する調査研究分科会 材料・構造物の衝撃的破壊現象とその防止に関するシンポジウム講演論文

集, pp. 1-10, 1998.

- 4) Tanimura, S., Mimura, K. and Liu, K. : Dynamic Failure of Structures Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Impact Responce of Materials & Structures, Ed. by Shim, V.P.W., Tanimura, S. and Lim, C.T., Oxford Univ. Press, pp. 87-99, 1999.
- 5) Tanimura, S., Mimura, K., Nonaka, T. and Zhu, W. : Dynamic Failure of Structures Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Int. J. of Impact Eng., Vol. 24, pp. 583-596, 2000.
- 6) 谷村真治・ほか4名：ニールセン橋支承部の三次元動的挙動解析, 日本機械学会論文集, Vol. 66, No. 651, A編, pp. 2079-2086, 2000.
- 7) Tanimura, S., Sato, T., Umeda, T., Mimura, K. and Yoshikawa, O. : A Note on Dynamics Fracture of the Bridge Bearing Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Int. J. of Impact Eng., Vol. 27, No.2 (in press).
- 8) 谷村真治・ほか4名：直下型地震による大型鋼構造物の過渡応答時における動的応力, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp. 103-108, 2000.
- 9) Tanimura, S., Mimura, K. and Zhu, W.H. : Practical Constitutive Models Covering Wide Ranges of Strain Rates, Strains and Temperature, Key Engineering Materials, Trans. Tech. Publications, Vol. 177, No. 180, pp. 189-200, 2000.
- 10) Tanimura, S., Mimura, K. and Zhu, W.H. : A Dynamic Constitutive Equation and Its Experimental Verification, J. Phys. IV, Vol. 9, pp. 33-38, 2000.
- 11) 谷村真治・ほか6名：直下型地震による大型鋼構造物の過渡応答および部材間の衝突, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp. 141-146, 2001.
- 12) 谷村真治・ほか5名：直下型地震における大型鋼構造物の過渡応答時における動的応力, 日本機械学会論文集 (掲載決定) .
- 13) MSC/DYTRAN Version 4.7 User's Manual, MSC Software Corporation, 1999.
- 14) Tanimura, S., Sato, T., Saito, T., Umeda, T., Mimura, K. and Ogawa, N. : Initial Transient Behavior of a Tall-Building Model Due to a Low Speed Impact, Impact Engineering and Application (Proceedings of the 4th International Symposium on Impact Engineering, Edited by Akira Chiba, Shinji Tanimura and Kazuyuki Hokamoto), Elsevier Science, Volume II, pp. 657-662, 2001.
- 15) 桑村仁, 伊山潤, 松井康治：鉄骨の脆性破断に及ぼす材料靱性と板厚の影響-鉄骨破断に関する研究 その1-, 日本建築学会構造系論文集, 525, pp. 109-116, 1999.
- 16) 島貫広志, 萩原行人, 豊田政男：地震時の歪速度を考慮した建築鉄骨歪集中部におけるき裂の挙動, 溶接学会論文集, 19-3, pp. 489-497, 2001.
- 17) 谷村真治, 栗生直樹：薄板鋼板の高速引張特性, 日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, No. 940-36, pp. 144-145, 1994.
- 18) 中川憲治, 岸田敬三, 谷村真治：材料の衝撃問題の基礎と応用-高速変形に対する材料の構成式-, 「講座」, 材料, 34巻, 384号, pp. 1115-1120, 1985.
- 19) 谷村真治：材料の高速変形と構成式, 「解説」, 日本金属学会会報, 29巻, 5号, pp.337-344, 1990.