

# 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

○谷村眞治<sup>1</sup>・斎藤年正<sup>2</sup>・榎田 努<sup>3</sup>・佐藤登史<sup>4</sup>・小川信行<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪府立大学教授 工学部機械システム工学科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1番1号)

<sup>2</sup>正会員 工博 日立造船株式会社 技術研究所 要素技術研究センター  
(〒551-0022 大阪府大阪市大正区船町2丁目2番11号)

<sup>3</sup>工博 大阪府立大学助手 工学部機械システム工学科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1番1号)

<sup>4</sup>工修 大阪府立大学大学院 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1番1号)

<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)

Initial transient behavior of a tall-building-model due to a strong near-source earthquake has been studied based on the numerical simulation using the code MSC/DYTRAN. It was found that stresses of values 1/3 ~ 3/5 times of yield strength of the column material occurred in some columns of the building at the initial transient state, and a high stress concentration was observed in the location near the connection part of the column with rib. These results show very possibility that a high stress sufficient to lead the initiation of fracture can be reached in some parts of a tall building, at the initial transient state.

**Key Words:** near source earthquake, transient state, stress wave, tall building, dynamic finite element method

## 1. 緒 言

直下型地震特有の地震動初期の激しい上下・水平方向の揺れにより、大型構造物の一部にその地震動初期に対応した過渡応答時において、き裂や部分的破壊が生じ、その後の引き続く揺れによって大きな破壊や破損が起こった場合のある可能性が高いことが報告されている<sup>1)~5)</sup>。直下型実地震動による大型鋼構造物の破壊過程を解明するための、一つのアプローチとして、直下型地震時の揺れ初期の上下・水平動による大型鋼構造モデル(高層建築物モデル)の動的応答解析を、汎用非線形動的有限要素法コードの DYN2D・3D 及び MSC/DYTRAN により、その過渡応答時の動的挙動にとくに注目して、行った。すなわち、高層建築物の骨組要素モデル(Hughes-Liu はり要素と Belyschko-Schwer 要素)に兵庫県南部地震の実測加速度波形を入力し、MSC/DYTRAN で三次元動的有限要素解析を行った。これにより、揺れ初期の過渡応答時に、高層建築物モデルの柱の一部に、この部材の引張強さの 1/3~3/5 程度の平均応力の生じる結果等が得られた。

一方、実建築物の鋼製箱形柱には、はりやブレー

ス、柱内のダイアフラム等が接合されているので、これらが接合されている箱形柱に動荷重が作用するときの部材中の応力分布及び応力集中現象を MSC/DYTRAN で解析を行った。その結果、そのような箱形柱の局所における応力集中係数が約6となる場合のあること、等がわかった。

また、高層建築物の三次元骨組はりモデルに対する一連の地震応答解析を ABAQUS により行って、上記の応力波伝ば現象も考慮した動的応答解析と比較検討している。これらの解析により、直下型実地震時の激しい揺れ初期の過渡応答時に、大型(高層)建築物モデルの鋼製箱形柱の一部に破壊開始が起こった可能性が、かなり高い場合のあること、等を示す結果が得られたので、それらについて述べる。

## 2. 大型鋼構造物の三次元モデルによる解析

### (1) 解析モデル

大型鋼構造物の1つのモデルとして、図1に示すような24階建ての高層建築物モデルを仮定した。構造物全体について、骨組要素を用いて三次元モデル化を行った。その解析モデルのA、D通り鉄骨軸組

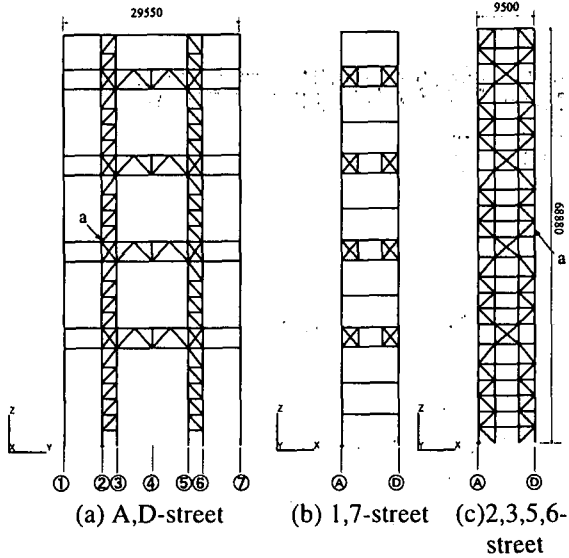


Fig.1 Analytical model of tall-building steel frame

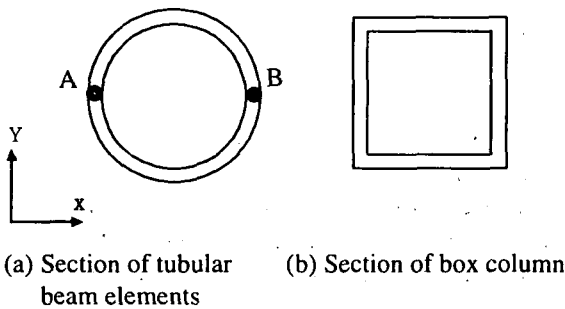


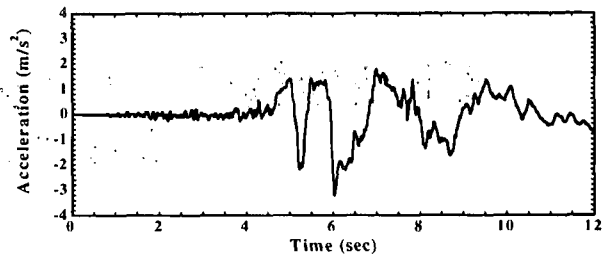
Fig.2 Cross sections of columns

図と 1, 7 通り及び 2, 3, 5, 6 通り鉄骨軸組図をそれぞれ図 1 の(a), (b), (c)に示す。

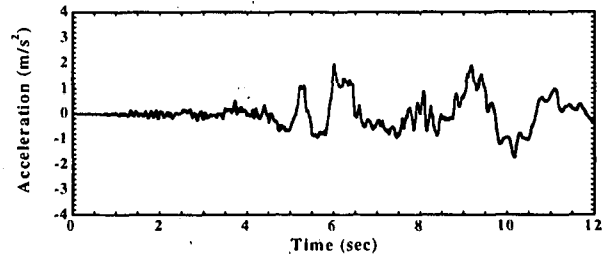
この構造物モデルでは 2, 3, 5, 6 通りの外柱が箱形柱であり, その他については H 形鋼と鋼管からなっているものと仮定した。箱形柱については図 2 (a)に示すような断面形状が中空円の円管はり要素と仮定し, H 形鋼, 鋼管については断面形状をそれぞれ H 形, 中空円管はり要素と仮定した。これらの要素の仮定では, それぞれ断面積と断面 2 次モーメントが等しくなるようにモデル化した。各部材とも材質は鋼の弾塑性体とした。箱形柱の材料特性は密度  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ , 第 1 剛性  $E = 206 \text{ GPa}$ , 第 2 剛性  $E' = 0.790 \sim 0.980 \text{ GPa}$ , ポアソン比  $\nu = 0.3$ , 引張強さ  $\sigma_u = 490 \text{ MPa}$  とした。その他の部材の材料特性はここでは省略する。

## (2) 解析条件

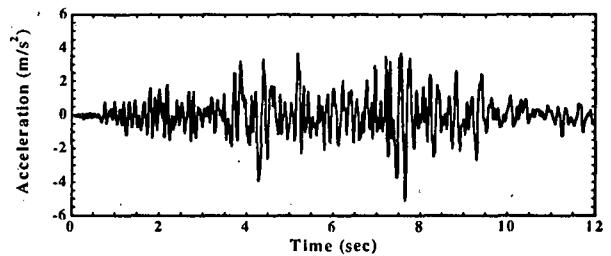
入力地震波形は, 図 3 に示す兵庫県南部地震時に六甲アイランドで実際に観測された加速度波形とした。その入力最大加速度は水平動  $1.96 \text{ m/s}^2$  (EW 方向),  $3.20 \text{ m/s}^2$  (NS 方向), 上下動  $5.08 \text{ m/s}^2$  で, これら 3 つの地震加速度波形を同時に解析モデルの下端部に入力した。すなわち, 図 1 に示すモデルの下端には, 十分に大きい剛体が固定されるとして, その下端の Y 軸方向に図 3 の EW 方向揺れが作用し,



(a) East and west direction



(b) North and south direction



(c) Up and down direction

Fig.3 Input acceleration

X 軸方向に NS 方向の, また Z 軸方向に UD 方向の揺れが, 同時に作用するときとした。解析時間は動的挙動の過渡応答時と定常応答時を明瞭に確認するために 12 秒間とした。

また荷重は, 固定荷重と積載荷重を含めた各階重量が各階ごとに均等に作用すると仮定した。なお解析モデル全体に-Z 方向の重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$  をかけている。全体の動的挙動を動的有限要素法の解析コードである MSC/DYTRAN を用いて三次元解析を行った。

## (3) 破壊条件

破壊は箱形柱にはりやブレース等が溶接されている部分の近傍においてぜい性破断が起こっていたものもあった。その破壊の形態から見て, 引張応力により破壊が開始した可能性が高いと考えられるので, ここでは主に, 柱の軸方向の引張応力について注目した。

## (4) 解析結果

解析モデル全体の中での箱形柱に注目し, その中でも, 比較的大きな引張応力が発生している代表的な箇所として, 図 1 の 2 通り 13 階の柱下端部分 (図中の点 a) の要素における軸方向応力の時刻歴を図 4

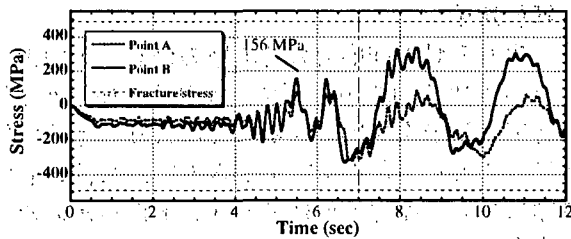


Fig.4 Stress time history in a column at 13th floor

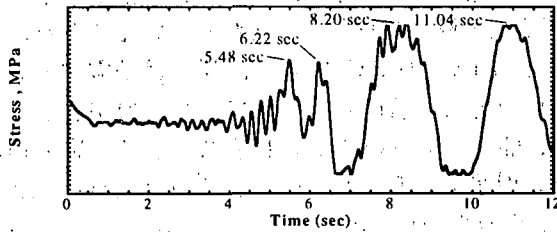


Fig.5 Stress time history in a column at 13th floor

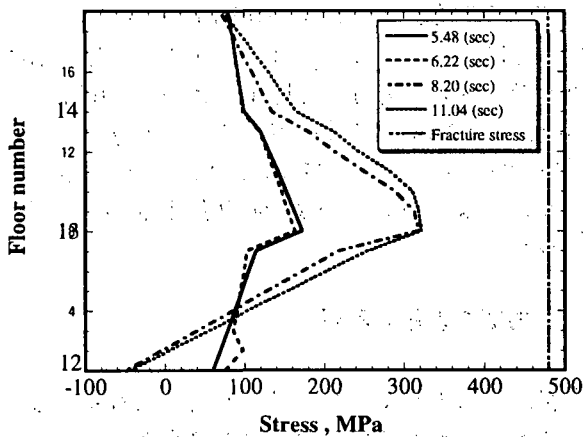


Fig.6 Stress distribution in columns

に例示する。図4は、図2の点A、Bの軸方向の応力とY軸まわりの曲げモーメントからの曲げ応力を加算した合成応力の応力-時間線図である。図4中の破線は、この部材の引張強さのレベルを示している。図4を見ると、約7secから後はほぼ一定の周期を持った定常状態の応答になっていることがわかる。図3の入力波形と図4の応答波形を見比べると、約7secまでの応答が過渡応答であると見ることができて、この過渡応答時での5.5secにおいて156MPaと、この部材の引張強さ490MPaの1/3近くの値となっている。この値は、図3の(a)、(b)に示す水平動の最初の大きな波が入力されつつある時点での応答であることから、これが過渡応答時の値であることがわかる。応力集中係数が3以上になることのあること(後述する)を考慮すると、過渡応答時において、部材の一部で引張強さに達する部材のある可能性が高いといえる。

図4に示した13階の柱下端部分での円管状モデルの断面の、図2(a)に示したA点近くの他の点での軸方向の応力の時刻歴の例を、図5に示す。この図5で、過渡応答時での時間5.48secと6.22secの時点

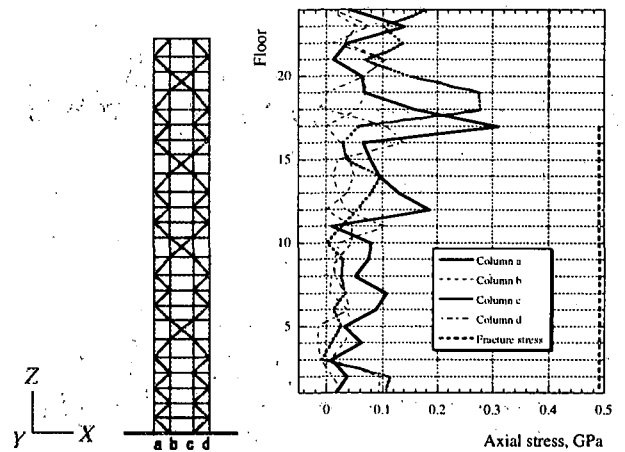
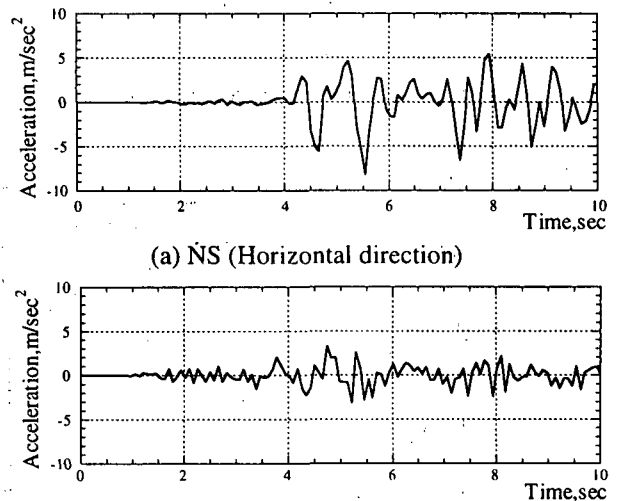


Fig.7 Analytical model Fig.8 Max. axial stress/Floor



(a) NS (Horizontal direction)  
(b) UD (Vertical direction)  
Fig.9 Seismic acceleration record

での、その柱の長手方向における軸方向の応力の分布状態を図示すると、それぞれ図6の太い実線と点線のようになる。これらに対して、定常振動域と考えられる8.20secと11.04secの時点での応力分布は図6中の細い実線と破線のようにになっている。図より、過渡応答時での柱の応力分布は、定常振動時での分布状態とは異なり、かなりゆるやかな分布状態となっていることがわかる。

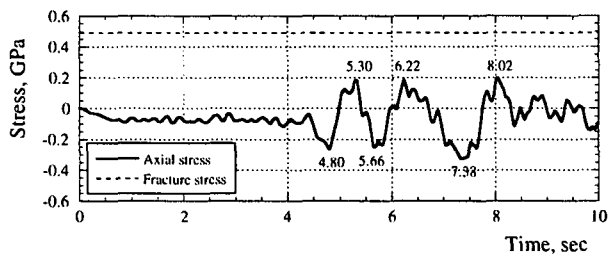
### 3. 大型鋼構造物の二次元モデルによる解析

#### (1) 解析モデル

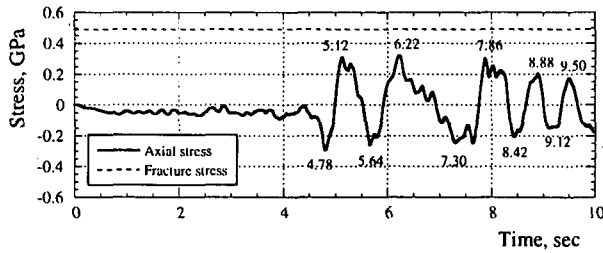
図1に示した高層建築物モデルの一部で、その張間方向のトラス架構4面のうちの1面を取り出し、はり要素を用いて、図7(図1の(c)と同じ)に示す二次元モデルを仮定し解析対象とした。

#### (2) 解析条件

入力地震波は、図9に示す神戸海洋気象台で観測された加速度波形とした。図7に示したモデルの下端は十分に大きい剛体に固定されているとして、そ

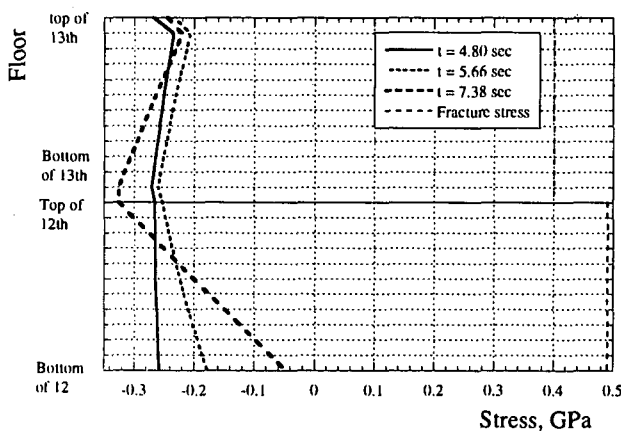


(a) 12F

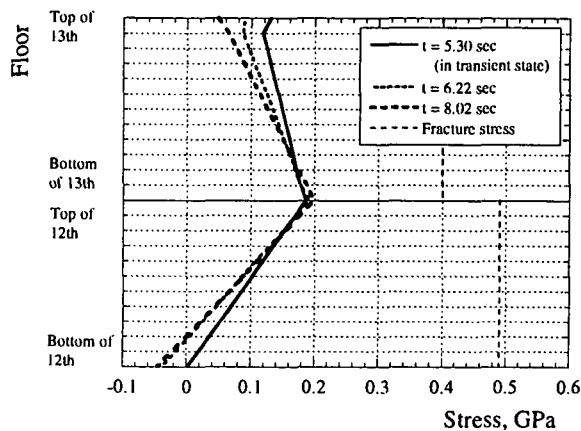


(b) 17F

Fig.10 Stress time histories in columns



(a)



(b)

Fig.11 Stress distribution in the columns of the 12th and 13th floors

の下端の X 軸方向に図 9 の NS 方向の揺れが、また Z 軸方向には UD 方向の揺れが、同時に作用するとした。このモデルの動的挙動を MSC/DYTRAN を用いて三次元解析を行った。

### (3) 解析結果

柱に生じる軸方向応力の時刻歴の例を、入力地震波と対応させて、図 10 に示す。入力地震加速度波形と応答応力波形を対応させることにより、過渡応答時と見ることが出来る 4.2 sec から 5.2 sec の間に各階の柱頭に生じた軸力と曲げモーメントから求めた軸方向応力の最大値を図 8 にまとめて示している。図 8 中の破線で示す直線は、部材の引張強さを示し、16 階と 17 階で部材強さが変わっていることを示している。図より柱 a の 12 階、17 階では地震波の立上り途中（過渡応答時）において引張応力が急激に発生し、部材が不連続になる 17 階では、その応力値は部材の引張強さの約 63% に達し、部材が連続な 12 階でも、その約 38% の応力が生じていることがわかる。図 8 の中から特に大きな応力値を生じた部材の応答応力波形の例を、示したものが図 10 である。

図 10a に示した各ピーク値の時点における 12 階柱頭近くでの柱の応力分布を図 11 に示す。両図より、4.8 sec 及び 5.3 sec の過渡応答時での応力分布は、7.38 sec 及び 8.02 sec の定常振動域での応力分布状態とは異なり、かなりゆるやかな分布状態となっていることがわかる。

### 4. 応力集中現象の解析

高層建築物モデルの柱には、通常、はりやブレース、ダイアフラム等の他の部材が接合されている。また、途中で、部材の形状や材質が変わったりしているため、部材中での応力分布状態がそれらの局所において大きく変化したり、応力集中が生じたりする。そこでまず、はりやブレース等が接合されているところにおける応力集中現象を調べることにした。

#### (1) 解析モデル

箱形柱に、はり、ブレース、ダイアフラム等を接合したモデルを作成し、これを解析対象とした。この解析モデルの全体図と断面図を図 12(a), (b) に示す。箱形柱 A は UB-544×544×47(SM490) であり、ダイアフラム B~F の全側面は、柱 A の内側面に完全に密着しているものとした。はりの G, H およびブレース I には H 形鋼を用い、ブレースの鋼管 L はリブ J, K (両者とも厚さ  $t=19$  mm) を介して柱 A に接合した。柱 A とリブ J との接合部は、すみ肉溶接されているものと考え、その余盛りを図 13 に示すようにモデル化した。また、リブの接合部①では、できるだけ要素形状が立方体になるようにモデル化を行った。

各部材とも材質は鋼であり、密度  $\rho=7850$  kg/m<sup>3</sup>、縦弾性係数  $E=207$  GPa、ポアソン比  $\nu=0.3$  の線形弾性体とした。

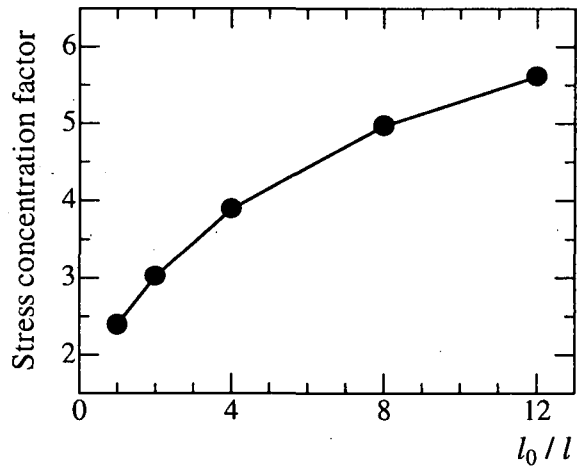
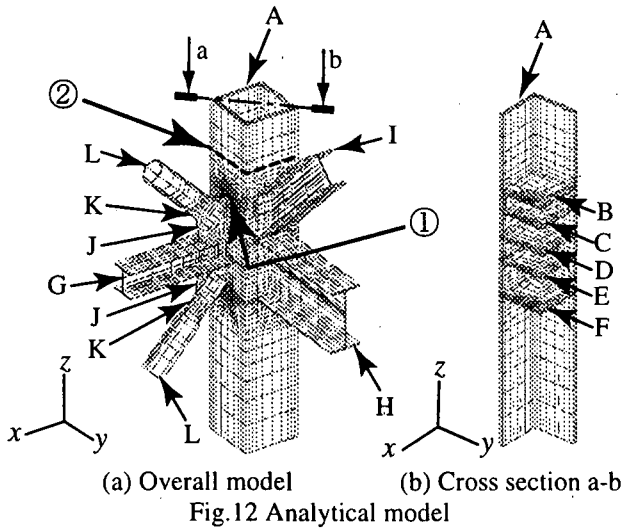


Fig. 15 Variation of stress concentration factor variations with element size ( $l_0 = 9.5$  mm)

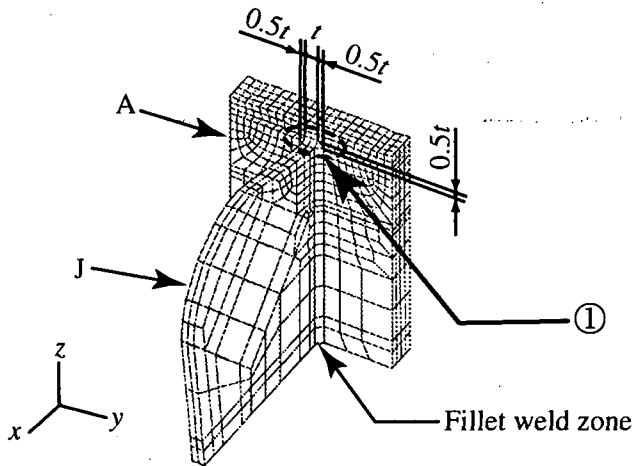


Fig. 13 Fillet weld zone of rib

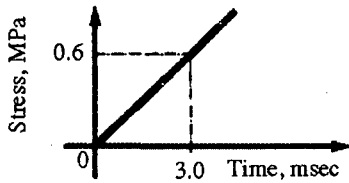


Fig. 14 Input loading

## (2) 解析条件

直下型実地震動により実際に起こった箱形柱の破断のうちの一部のものは、図 13 で示すようなリブの接合部①を通る断面で起こっていた。そこで、本研究では、地震動初期の激しい上下・水平方向の揺れによって箱形柱の①の部分に応力集中が起こり、箱形柱の破壊開始の原因となるき裂や部分破壊を生じたのではないかとこの観点から解析を進めた。

柱の接合されていない側のはりとブレースは、自由端とした。ただし、この場合、その長さが長すぎると自重による効果を考慮する必要があり、短すぎると柱との接合部に影響を及ぼしてしまう。そのため、はりやブレースの長さを柱の断面長 544 m の 2 倍とした。

上下端を図 14 に示すような傾き  $2.0 \times 10^8$  Pa/sec

Table 1 Total number of elements and element size

Total number of elements	Element size $l$ [mm]	$l_0/l$
17318	9.5	1.0
22834	4.7	2.0
30854	2.4	4.0
48390	1.2	8.0
69218	0.8	12.0

(時間 3.0 msec で、0.6 MPa) の一次関数で与えられる波形の動的応力で引っ張り、全体の動的挙動を動的有限要素法コード MSC/DYTRAN で解析した。なお、本解析は弾性計算であり、入力した応力 0.6 MPa は、柱の端面全体に 6 tonf の力が作用したことに相当する。

図 12(a)の破線②で示した箱形柱断面で、ほぼ一様応力分布となったので、その最大主応力を基準応力  $\sigma_0$  とした。そして、図 13 に示したリブの接合部①に生じた最大主応力  $\sigma_m$  との比を応力集中係数として評価した。なお、この方法で応力集中係数を求めることの妥当性についても、動的応力分布状態を調べて検討し、十分に評価できることを確かめた。

## (3) 解析結果

FEM 解析において、解析結果は、要素の形状や大きさによって微妙に変化する。そこで、図 14 の応力で箱形柱の両端を引っ張るとき、リブの接合部①近傍の要素の大きさを変化させ、その要素分割が解析結果に与える影響を検討した。①に接合された厚さ  $t = 19$  mm のリブを厚さ方向に 2 分割したときの要素長さ  $l_0 = 9.5$  mm を基準要素長さとした。そして、リブの接合部①の要素が基準要素長さに対して、1/12 の要素長さになるまで大きさを変化させたときの応力集中係数の変化を図 16 に示す。また、モデル全体の要素数とリブの接合部①の要素長さ  $l$  を表 1

に示す。

図 14 に示すように、応力集中係数の値は要素分割により変化するが、リブの接合部①の要素長さを基準要素長さの 1/12 程度 ( $l=0.8 \text{ mm}$ ) の要素分割とすれば、応力集中係数はある程度、収束する傾向を示している。

この解析モデルにおいて、箱形柱の両端にある動的応力で引張ったとき、リブの接合部①で最も大きな応力を生じる応力分布となった。そして、このリブの接合部①の応力集中係数は、5.6 と、かなり大きな値となった。

## 5. 大型鋼構造モデルの地震応答解析

図 1 に示した高層建築物モデルに対して、通常用いられる地震応答解析用の三次元骨組はりモデルを作り、汎用解析コード ABAQUS による地震応答解析も行った。この解析結果と前 2 章の解析結果との比較検討を行った。(この結果は、紙面の関係で省略、講演当日発表予定)

## 6. 結 言

- (1) 直下型地震動の記録波形を入力し、大型鋼構造モデル(高層建築物モデル)の動的挙動について、その揺れ初期の過渡応答に、とくに注目して、解析した。これにより、過渡応答時において、高層建築物の柱のいくつかにおいて、その部材の引張強さの 1/3~3/5 程の引張応力の生じる場合がある結果が得られた。
- (2) 仮定した高層建築物モデルの鋼製箱形柱には、はりやブレース、柱内のダイアフラム等が接合されているので、そのような接合部に動荷重が作用するときの応力集中現象を調べた。これにより、箱形柱破壊の実例の一つと良く対応した位置、すなわち柱とブレースの鋼管をつなぐリブの接合部で、高い応力集中が生じる結果が得られた。このような結果から、部材の不連続部分等での応力集中現象を調べることが重要である。
- (3) 上記の(1)と(2)の解析結果を考え合わせると、直下型地震動による揺れ初期の過渡応答時において、仮定した高層建築物モデルの箱形柱の一部に、破壊や破損の開始が起こったもののある可能性が高く、今後、種々の角度から検討することが極めて重要である。
- (4) 過渡応答時に大きい引張応力が生じた柱の位置近くにおける柱の長手方向の応力分布状態を調べた。それによると、過渡応答時での柱に生じる応力分布の状態は、定常振動時での応力分布の状態とは異なり、かなり変動の小さいなめら

かな分布状態となっていた。このことは、揺れ初期の過渡応答時に破壊開始が起こるとき、その発生位置が定常振動時での発生位置と違ったところで起こる場合のあることを示している。

- (5) これらの研究成果により、今後(当面)、次のような課題に取り組むことが、極めて重要であると考えられる。
  - a) 直下型実地震動の水平方向揺れが、高層建築物モデルの桁方向と張間方向の任意の方向に作用するときの動的挙動。
  - b) 建築物モデルの基礎部の境界条件の設定の問題。
  - c) 構造物中の種々の不連続部での応力集中現象を明らかにすること。
  - d) 過渡応答時と定常振動時とで、大型構造物中に生じる動的応力分布の違いを明らかにすること。
  - e) 大型構造モデルに対して、常用の地震応答解析用モデルによる解析、衝撃応答解析用モデル(応力波伝ばの影響を含む)による動的応答解析結果とに対して、とくに過渡応答時に注目して両者の比較検討を行うこと。
  - f) など...

## 7. 参考文献

1. 谷村真治：低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；日本機械学会関西支部第 255 回講演会講演論文集，No.974-2，pp.177-181，1997。
2. Tanimura, S. and Mimura, K. : Dynamic Failure due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Proc. of 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Melbourne, Australia, pp.547-552, 1997.
3. 谷村真治，三村耕司，野中泰二郎，地西 徹：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 Response of Materials & Structures, Ed. by Shin, 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., (in press), 2000.