

鉄筋コンクリート煙突の崩壊メカニズム と地震力について

広島大学工学部 佐藤 誠*

広島大学工学部 田澤 栄一**

広島大学大学院 川上 直也***

阪神・淡路大震災において、軸力が卓越して破壊したと推定される構造物の破壊が多数観察された。また、地震力の作用が極めて瞬間的で衝撃的な载荷状態によると考えられる破壊も存在している。しかし、地震計が感知することのできる周波数領域は約30~40Hz以下であり、衝撃的な振動は精度よく記録できない状況にある。ここでは、上部が引張破壊されたように見えるRC煙突の被害形態に注目し、地震計では計測できない衝撃的な地震力が作用した可能性を検討した。まず、神戸海洋気象台で観測された地震波に対する動的応答解析を行い、次いで、実際に煙突に生じた破壊が起こりうるように想定した上下動入力による応答解析を行って比較した。その結果、観測された地震動では実際に煙突に生じたような破壊が発生する可能性は低く、1000 Galを越える衝撃的な地震力が作用した可能性があることが明らかにされた。

1. はじめに

地震発生から今日までに多くの研究者が、土木構造物の被害のメカニズムをはじめ地震の発生機構などを積極的に研究している。

一般に、周期の極端に短い衝撃的な波動成分は、地震波が伝播する途中で減衰によりほとんど消滅してしまうので、これまでの構造物に対する地震応答解析の多くは、波動論的解析よりも振動論的に解析が行われている。しかし、今回のような内陸直下型地震の場合は、震源と地表の距離が短いため、強震計の測定振動数領域を超えた衝撃的な地震力が構造物に作用した可能性が検討されている^{1) 2)}。

また、この観点からの研究もすでになされており、被災者の多くが証言している衝撃的上下動を考慮した地震応答解析が行われている^{3) 4)}。

特に、橋脚などにおける水平全周クラックの発生

原因は、衝撃的引張力が作用したことによる場合もあるとされている。



図-1 RC煙突の頂部破壊例

キーワード：阪神・淡路大震災，地震衝撃力，引張破壊，RC煙突，波動応答

* 広島大学工学部，0824-24-7791

** 広島大学工学部，0824-24-7786

***広島大学大学院構造工学専攻，0824-24-7792

ここでは、図-1に示す鉄筋コンクリート煙突の

破壊形態に注目して地震衝撃力による煙突の応答を検討する。

図-1では、2本ある高さ38mの煙突の上部から約5mの断面が水平に切断され、一本には円周に沿って水平な亀裂が残っている。また、切断された煙突の上部には、脱落した鉄筋コンクリートの縦方向主筋がまっすぐ鉛直に立ったまま残された。このような破損状況は、煙突に対して衝撃的な軸引張応力が破断強度を超えて作用した可能性があることを示唆している。

本研究は、上記のことを検討するため、煙突モデルに軸力が卓越すると考えられるさまざまな衝撃的外力を入力し、波動論的に地震応答解析を行った。

2. 解析方法

対象とする系の動的応答を数値解析する手段として、ここでは、汎用構造解析有限要素法プログラムMARC⁵⁾を用いた。

(1) 解析モデル

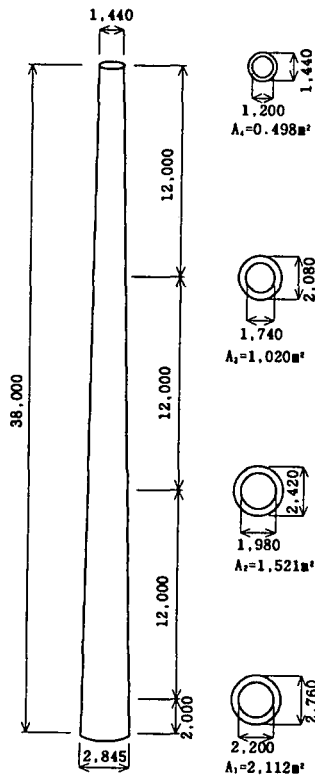


図-2 RC煙突

図-2と表-1に本研究で対象とする鉄筋コンクリート煙突およびその諸元を示す。なお、波動解析において、煙突内の主鉄筋およびフープ筋の存在は、波動伝播速度が相違するためコンクリートと鉄筋と

表-1 RC煙突の諸元

高さ	38m	
弾性係数	$29.4 \times 10^9 \text{MPa}$	
単位体積重量	2.3t/m^3	
ポアソン比	0.2	
縦波速度	$3,575 \text{m/s}^2$	
圧縮強度	8.82MPa	
引張強度	0.88MPa	
総重量	119.59t	
外径	上端	1.440m
	下端	2.845m
内径	上端	1.200m
	下端	2.280m
断面積	上端	0.498m^2
	下端	2.273m^2
鉄筋比	上端	0.1
	下端	0.9

の境界でせん断応力やはく離などが発生する原因となるが、本研究ではこれらを無視し、コンクリートのみの煙突として波動解析を行う。また、煙突の基部には厚さ1.05m、直径7.2mの円錐台形のコンクリート基礎があるが、ここでは煙突部のみをモデル化した。

煙突の解析モデルに図-3に示す三次元要素と図-4に示す二次元要素によるモデルを用いた。

三次元要素には、8節点厚肉曲面シェル要素を用い、水平動方向の対称軸を考慮して半円のみで構成した。このモデルは煙突の断面積と曲げ剛性を正しく表現しており、主として上下動と水平動を受ける実地震波を考慮する場合の曲げ応答の検討に用いた。この場合の要素数は38、節点数は157である。

二次元要素には、厚さ1m(一定)の8節点四辺形平面応力要素を用い、煙突の断面積を正しく表現させ、主として上下動に対する軸力応答の検討に対して計算時間を節約するために用いた。高さ方向と水平方向にそれぞれ38分割と2分割で合計78要素、309節点である。

このモデルの場合、実際の煙突と高さ方向に同じ断面積変化率を持たせると、二次元モデルの直径変化(テーパ)が実際より大きい。後で示すように軸力応答は三次元モデルの場合とほぼ等しい。

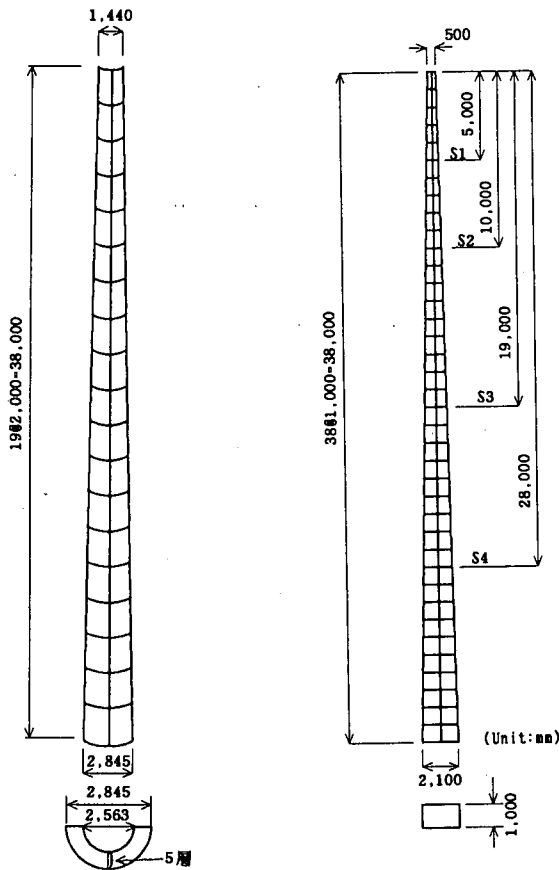


図-3 三次元モデル 図-4 二次元モデル

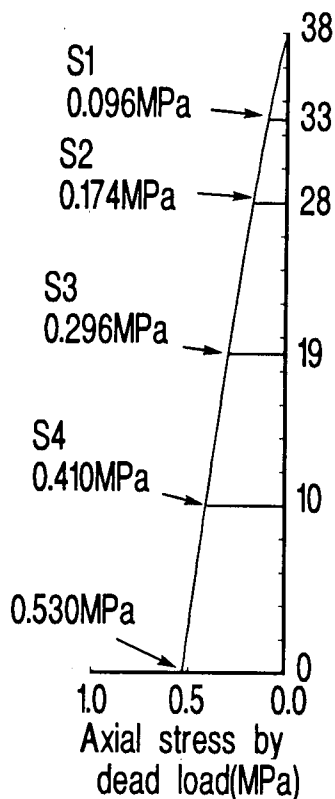


図-5 自重による軸応力分布

両モデルにおいて、煙突の上端から5m, 10m, 19m,

28mの断面をそれぞれ断面S1, S2, S3, S4とし、軸応力を検討する代表断面とした。

図-5に自重による軸応力分布を示す。

(2) 入力条件

下記の実地震波と地震衝撃力をそれぞれモデル下端の節点に与えた。

a) 実地震波

図-6に示す神戸海洋気象台で観測された地震加速度のN-SとU-D 2成分を三次元モデルに与えた。ただし、水平動と上下動の最大値がほぼ同じ時間帯に現れ、しかも最大加速度を含んでいる3~6secの3秒間を解析に用いた。なお、この加速度波形は、1/50秒間隔の150データで構成されていたが、解析時間間隔 Δt を0.5ms、6,000データとするため、データ間を直線近似して用いた。

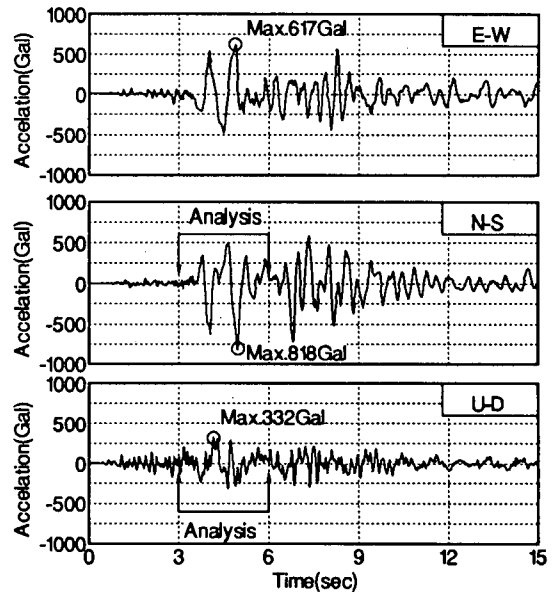


図-6 神戸海洋気象台の加速度波形

b) 地震衝撃力

衝撃的に引張力が作用したと考えられる地震衝撃力を考慮するため、式(1)に示す正弦1波の衝撃加速度と衝撃力を上下動として二次元モデルに与えた。

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi t / \tau) \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (1)$$

ここで、 A_0 は加速度または衝撃力の振幅であり、 τ は周期(継続時間)である。

図-7に、解析に用いた $A_0 = 4.8 \text{ kN} (500 \text{ kgf})$ で $\tau = 6.6 \text{ ms}, 10 \text{ ms}, 20 \text{ ms}$ の3種類の衝撃力と、 $A_0 = 100 \text{ Gal}$ で $\tau = 6.6 \text{ ms}, 10 \text{ ms}$ の2種類の加速度を示す。

時刻歴応答解析は、時間間隔 $\Delta t = 0.1 \text{ ms}$ で0~0.1

sまでの1,000ステップとした。

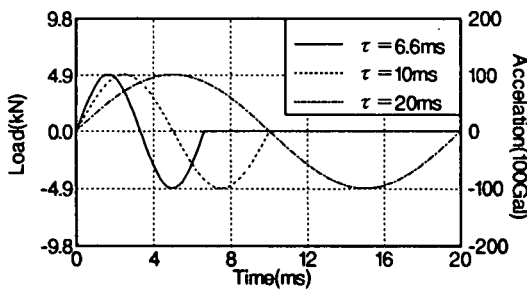


図-7 衝撃力と加速度の入力波形

(3) 時刻歴応答解析

ここでは、煙突の波動応答解析を時刻歴解析として行うが、MARCプログラムのNewmark- β 法($\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$)を採用した。減衰を考慮する場合は、減衰定数を $h = 0.01$ に相当するレイリー減衰とした。対応する対数減衰率は約0.051となる。

3. 実地震波による応答解析結果

(1) 上下動地震入力による解析結果

図-8にU-D加速度成分のみを三次元モデルに入力した場合の解析結果を、入力端(下端)の軸力、断面S1~S4の軸応力で示す。ただし、自重による断面力と応力は考慮していない。

鉛直加速度のみを入力した場合は当然軸応力が卓越して発生する。下端の断面力および軸応力は入力加速度とほぼ同じ波形で変化しているが、上下端間の縦波の往復時間約23msで極わずかな乱れを生じている。また、各断面の軸応力は、その断面より上にある質量と入力加速度による慣性力から得られる値にほぼ等しく、波動伝播による応答の効果はわずかで、入力加速度に対する慣性力が応答応力をほぼ支配している。したがって、下方の断面ほど大きな軸応力となり、たとえば、断面S4の最大引張軸応力は約125kPaで自重による圧縮軸応力0.41MPaより小さく常に圧縮応力であり、実地震の上下動によって引張り破断する可能性はない。

図-9にN-S加速度成分のみを三次元モデルに入力した場合の解析結果を、入力端のせん断力および各断面の曲げ応力(軸応力)で示す。ただし、自重は考慮していない。なお、曲げ応力は振動方向の一方の縁応力のみを示しているが、他方の縁応力は逆符

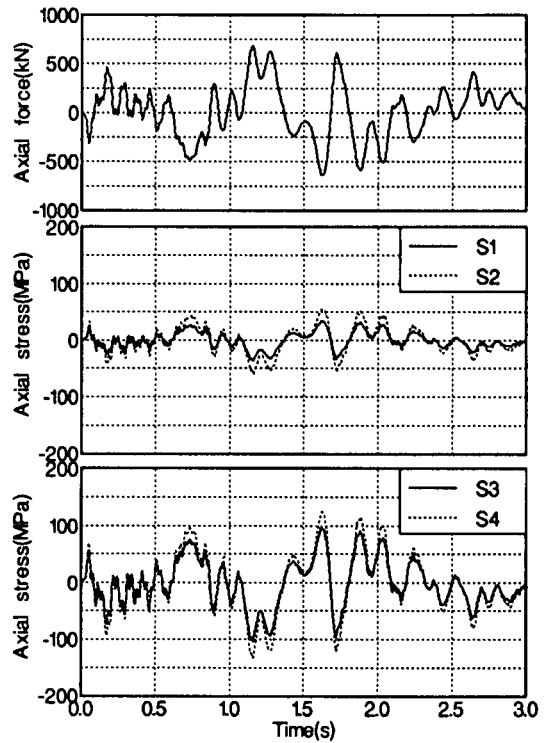


図-8 上下動実地震波による応答($h = 0.01$)

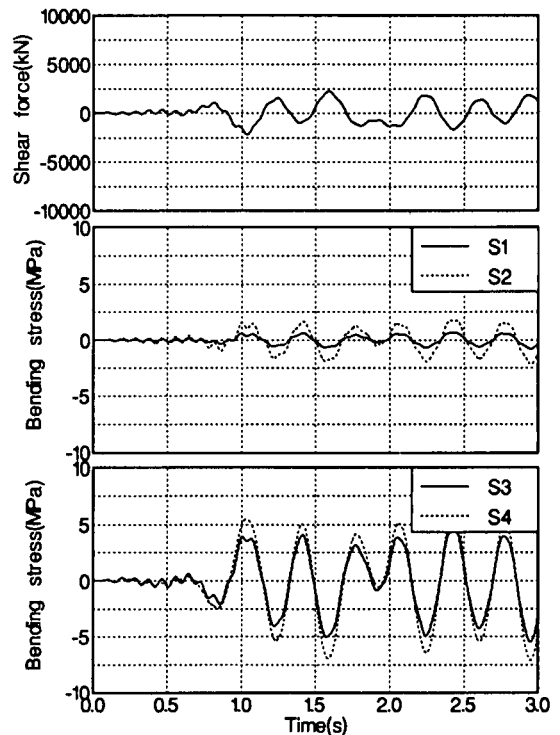


図-9 水平動実地震波による応答($h = 0.01$)

号同値で発生している。

ここでは、線形解析であるので、U-D動とN-S動の結果を重ね合わせることができるが、U-D動の最大軸応力は、N-S動による最大軸応力の約1%にすぎず、水平動による曲げ応力が卓越しているのでN-S

動のみで考える。この煙突のコンクリートの引張強度は0.9MPaであるから、自重による軸圧縮応力を考慮しても最初にこの値を超える曲げ応力となる断面は断面S4より下方にある。少なくとも煙突上端に近い断面が最初に破断することは考えられない。なお、この解析結果は破壊後を考慮していない。

4. 上下動衝撃力および加速度入力による解析結果

以下で行う上下動衝撃力に対する応答解析は、継続時間の短い波動の解析であることから、解析時間間隔 $\Delta t=0.1\text{ms}$ で行うため、図-4の二次元モデルを使用して計算時間を節約した。二次元モデルを使用することの妥当性を調べるために、図-3の三次元モデルと高さと体積を等しくした二次元一様断面モデルについて、 $\tau=10\text{ms}$ 、 $h=0.0$ として正弦1波の上下動加速度を煙突下端に入力した場合を比較した。ただし、以下の解析結果は自重の影響を考慮していない。

図-10に、それぞれのモデルの断面S1の軸応力を示す。

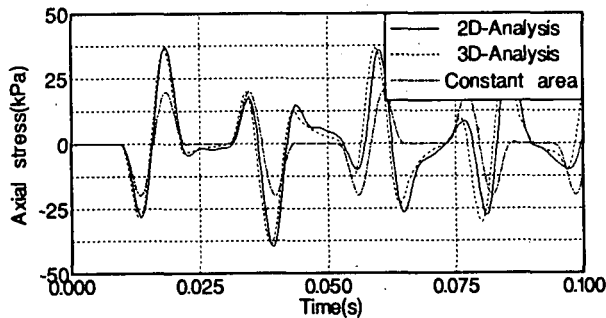


図-10 各モデルの断面S1の軸応力
(加速度, $\tau=10\text{ms}$, $h=0.0$)

図-10では、減衰を無視しているため、応力波が煙突を往復している状態がそのまま示されている。

$\tau=10\text{ms}$ の正弦1波の加速度を入力すると、継続時間10msの余弦半波の応力波が発生する。したがって、一様断面モデルの最初の圧縮応力に続く引張応力のグループは、まず、上昇中の圧縮応力と、続いて上端で反射して逆符号となって断面S1に達した下降中の引張波とで形成され、第二のグループ以下は、固定端である下端で反射するとき応力の符号を変えないことを考えて説明される。

二次元モデルと三次元モデルでは、三次元モデルの方が時間とともに応答がやや速く現れる以外はほ

ぼ等しく、縦波に対して断面積変化率すなわち音響抵抗変化率が等しければ、応答も等しいと考えられる。しかし、振幅と周期が一定の一様断面モデルの応答に比較して、煙突上端と下端で反射する毎に振幅とパルス長が変化し、断面積変化による分散効果が現れている。

(1) 衝撃力入力

図-7に示した周期 $\tau=6.6\text{ms}$ の正弦1波の衝撃力は、煙突の上端から5mの断面で上端からの反射波と入射波が重なって最大応力となるように設定されている。

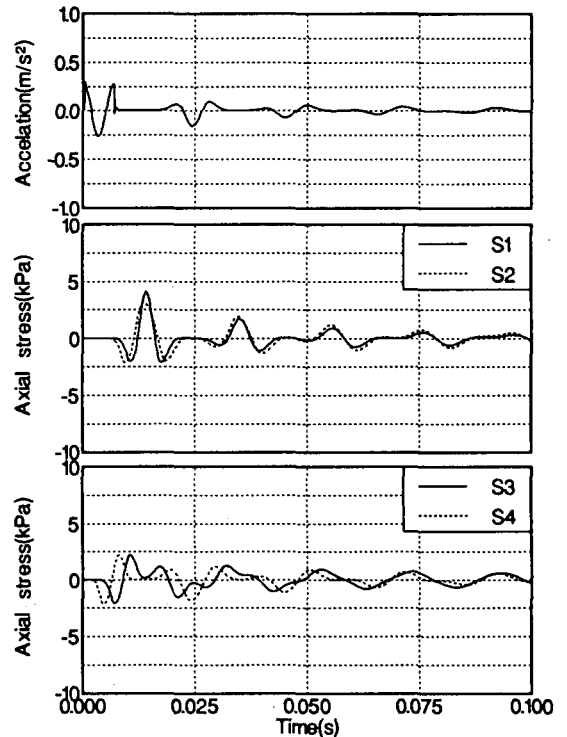


図-11 上下動衝撃力による解析結果
(衝撃力, $\tau=6.6\text{ms}$, $h=0.01$)

図-11に、 $\tau=6.6\text{ms}$ の正弦1波の衝撃力に対する各断面の軸応力と下端の発生加速度を示す。

正弦1波の衝撃力を入力すると、同じ波形の応力波が伝播する。ただし、減衰を考慮しているため、図-10の場合と異なり、煙突を往復するにつれて振幅は減少する。

引張応力の最初のピークは、先行した圧縮波が煙突上端の自由端で反射し、後続の引張波と重なって形成される。伝播応力パルスは、上端と下端で反射を繰り返す度に波形が滑らかになり減衰効果と上記

の分散効果を示している。

軸応力の最大値は、断面積の小さい断面S1の最初の引張応力ピークで生じ3.9kPaである。

図-12に、 $\tau = 10\text{ms}$ の衝撃力を入力した場合の解析結果を示す。

下端の最大値加速度は、 $\tau = 6.6\text{ms}$ の場合の約66%で、振幅一定のとき衝撃力の正弦1波の周期が長くなるにつれて加速度の最大値は減少する。

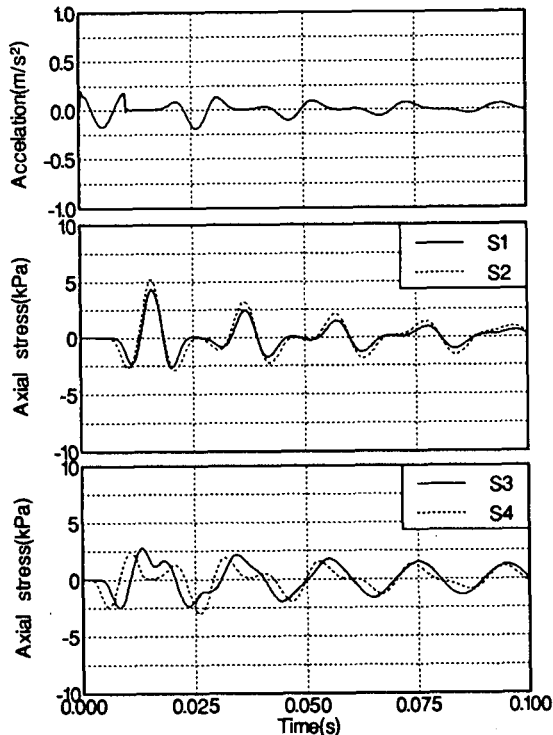


図-13 上下動衝撃力による解析結果
(衝撃力, $\tau = 10\text{ms}$, $h = 0.01$)

この場合は、断面S1で最大応力とならず、断面S2が最初の引張応力のピークで最大値5.1kPaになる。

図-14に、 $\tau = 20\text{ms}$ の衝撃力を入力した場合の解析結果を示す。

ここでは、 $\tau = 6.6\text{ms}$ および 10ms の応答波形との違いを強調するために、減衰がない場合を示した。

衝撃力の周期が煙突の縦基本固有周期より長くなると、波動伝播による応答より、煙突全体の伸縮による応答が支配的となる。断面S1~S4の軸応力が0となる時間が一致しており、そのことを示している。

軸応力の最大値は $\tau = 6.6, 10\text{ms}$ の場合より小さい。

(2) 加速度入力

以下では煙突下端に $A_0 = 100\text{Gal}$ の正弦1波の上下動加速度を入力した場合を示す。

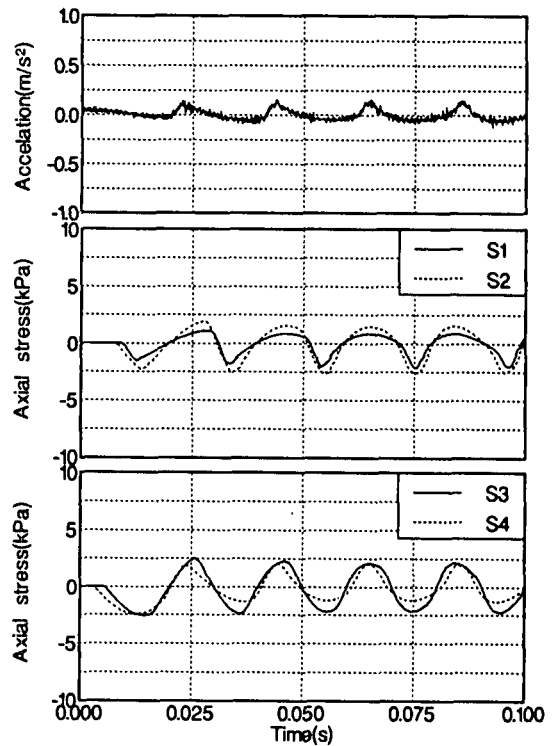


図-14 上下動衝撃力による解析結果
(衝撃力, $\tau = 20\text{ms}$, $h = 0.0$)

いま、正弦形の加速度を ω を円振動数として

$$A(t) = A_0 \sin \omega t \quad (2)$$

とすると、粒子速度 $V(t)$ は、 $V(0) = 0$ の初期条件で

$$V(t) = (A_0 / \omega)(1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

となる。

一方、一次元波動伝播理論⁶⁾では、軸力 F は断面積を S 、密度を ρ 、縦波の伝播速度を C_0 とすると

$$F(t) = -\rho S C_0 V(t) \quad (4)$$

であるから軸力は粒子速度に比例する。

式(4)に式(3)を代入すると

$$F(t) = -\rho S C_0 (A_0 / \omega)(1 - \cos \omega t) \quad (5)$$

と書ける。

したがって、煙突下端の軸力は、断面変化と減衰を無視すれば式(5)で表現されると考えられ、加速度入力と衝撃力入力との関係が得られる。

図-15に、 $\tau = 6.6\text{ms}$ の加速度を入力した場合の煙突下端の軸力と各断面の軸応力を示す。

この図における下端の軸力の最初に現れる軸力波形は式(5)に示した波形であり、各断面の軸応力の最初に現れる圧縮応力と引張応力の組以後も、下端を固定端としての応力波の往復によって形成されて

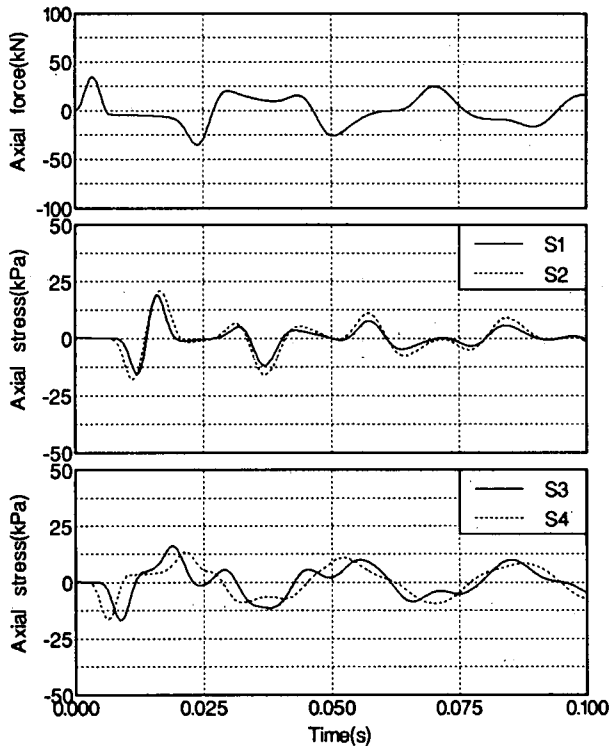


図-15 上下動加速度による解析結果
(加速度, $\tau = 6.6\text{ms}$, $h = 0.01$)

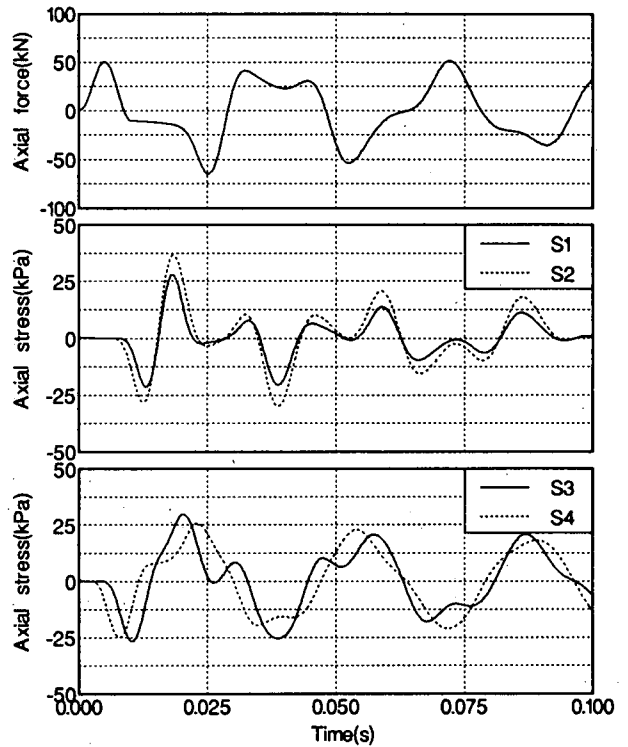


図-16 上下動加速度による解析結果
(加速度, $\tau = 10\text{ms}$, $h = 0.01$)

いる。

断面S1より断面S2の最大軸応力が大きいのは、断面の減少による軸応力の増加より減衰による減少が上回るためと考えられる。

図-16に、 $\tau = 10\text{ms}$ の上下動加速度を入力した場合の解析結果を示す。

この場合も図-15の場合と同様であるが、 $\tau = 6.6\text{ms}$ に比較して式(5)で ω が0.66倍になるため、軸力の振幅は約1.5倍となる。したがって、軸応力応答も増加し断面S2の軸応力が最大となる。

(3) 衝撃的引張破壊の可能性

図-1で述べたように、引張破壊した煙突断面の主鉄筋が鉛直に残っていたことから、鉄筋の引張強度は考慮しない。

解析モデルのコンクリートの引張強度は約0.9MPaであるから、少なくとも引張軸力が切断断面の自重による軸力を超えなければならない。自重による軸応力分布は図-6に示したとおりであり、引張強度に比べて断面S1~S4の自重軸応力は、11%~46%と小さい。

ここで、上下動の衝撃力入力と衝撃加速度入力、すなわち地震衝撃力に対して、断面S1が引張破壊し

得る加速度振幅を検討する。

なお、衝撃力の振幅を加速度の振幅に換算する場合、正弦形の衝撃力を ω を円振動数として

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (6)$$

とすると、一次元波動論により加速度は

$$\begin{aligned} A &= -(\omega C_0 F_0 / E S) \cos \omega t \\ &= A_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

となることを用いた。

ここに、 E は弾性係数である。

表-2に、衝撃力および加速度入力に対して、入力加速度振幅 $A_0 = 1,000\text{Gal}$ に対応する各断面の最大軸応力を、 $h = 0.0$ と $h = 0.01$ の場合に対して示す。同時に自重による軸圧縮応力も示した。

表-2の換算引張軸応力と自重圧縮軸応力の和(実質引張応力)が引張(正)となる断面は、断面S1、衝撃力 $\tau = 6.6\text{ms}$ を除いた断面S2および断面S3の加速度 $\tau = 10.0$ の非減衰の場合だけである。

これらのうち、実質引張応力 σ_T が最大となるのは、加速度 $\tau = 10.0$ のときの断面S2で $\sigma_T = 292.1\text{kPa}$ 、次いで同じ加速度のとき断面S1の $\sigma_T = 264.0\text{kPa}$ である。

一方、煙突のコンクリートの引張破断応力は σ_F

表-2 各断面の最大軸応力(kPa/1,000Gal)
上段: h=0.0, 下段: h=0.01

入 力		断 面			
		S1	S2	S3	S4
衝 撃 力 (τ)	6.6	282.1	140.7	112.9	97.5
		152.0	119.1	82.5	81.7
	10.0	328.0	384.3	176.2	146.6
		244.2	292.2	154.6	138.8
	20.0	121.9	221.2	281.1	209.8
		—	—	—	—
加 速 度 (τ)	6.6	309.7	280.4	224.8	194.7
		189.5	206.0	157.9	131.7
	10.0	360.0	446.1	352.7	302.8
		277.1	364.2	295.6	254.3
自重軸応力		-96.0	-174.0	-296.0	-410.0

=900kPaと考えているから、コンクリートの引張強度に対しては実質引張応力はかなり小さい。考えている衝撃的加速度波形で引張破壊するには、断面S2で3,000Gal以上、断面S1で3,400Gal以上の振幅である必要がある。

しかし、コンクリートの打ち継ぎ面とか微小なき裂が存在していた可能性を考えると、3,000Gal以下の衝撃的加速度で破壊する可能性も考えられる。

5. まとめ

本研究では、実地震および上下動地震衝撃力として衝撃力と衝撃的加速度による鉄筋コンクリート煙突の動的応答と引張破壊の可能性について考察した。

得られた結果は以下のように要約される。

(1)神戸海洋気象台で観測された地震波を入力した場合、引張破壊に対して上下動による軸応力応答は

無視でき、水平動による曲げ応力が卓越するが、煙突上方の断面が引張破壊される可能性は低い。

(2)煙突の断面積の変化により、伝播波動が分散するが、本研究で対象とした煙突に対しては縦波動応答は断面積変化率に対応すると考えてよく、中実弾面で解析できる。

(3)入力条件や入力した力積の大きさに関わらず煙突内を伝播する縦波動による応答は、粒子速度が支配的である。

(4)周期10ms程度、振動数100Hz程度で振幅3,000Gal以上の加速度が入力された場合に、煙突が引張破壊を起こす可能性がある。

(5)直下型地震を対象にする場合、地震応答を確実に知るには100Hz以上の地震動が観測できる強震計の必要性が高い。

参考文献

- 1)土木学会編集委員会, 震災フォーラム, 第1回「地震動」, 土木学会誌, Vol. 80, pp. 37-45, 1995.
- 2)泉博允, 衝撃的地震動についての考察, 土木学会第50回年次学術講演概要集, 1-B, pp. 1130-1131, 1995. 9.
- 3)小野紘一, 河西寛, 佐野祐一, 土木構造物の震害, 鴻池組阪神大震災被害調査報告書(第2報), pp. 33-57, 1995. 6.
- 4)園田恵一郎, 小林治俊, 地震によるRC柱の衝撃破壊についての一考察, 土木学会第50回年次学術講演概要集, 1-B, pp. 1118-1119, 1995. 9.
- 5)日本マーク(株), 非線形構造解析FEMプログラムMARC K-4, Vol. B, 1992.
- 6)K.F.Graff, Wave motion in elastic solids, Clarendon Press, pp.75-94, 1975.

On the Failure Mechanism of RC Chimney and Earthquake Force

Makoto Satoh, Eiichi Tazawa and Naoya Kawakami

This paper presents an analysis for dynamic response of a RC chimney. A possibility of axial tension failure is examined for various short period sinusoidal axial loads incident to the base of chimney. The results obtained from these analysis have the possibility of axial tension failure of the chimney for axial acceleration amplitude exceeding 3000Gal.