

# R. C. 超高煙突の弾塑性応答に関する研究 (第3報)

——実大煙突の応答性状——

表 佑太郎  
武田 寿一

## Non-linear Earthquake Response Study on Tall Reinforced Concrete Chimney (Part 3) —Analytical Study of Full-Size Chimneys—

Yutaro Omote  
Toshikazu Takeda

### Abstract

The authors have already presented an analytical method for non-linear earthquake response of reinforced concrete chimneys (Part 1) and have reported the results of simulation analyses of models of reinforced concrete chimneys under strong earthquake-like base motions (Part 2). This report discusses the response characteristics of some full-size chimneys under typical earthquakes with modified intensity levels of acceleration. Finally, the authors show that the displacement response of a chimney can be estimated simply by use of non-linear response spectra of the one-mass system.

### 概 要

本報告は同題第1報、第2報の結果を参考にして6種類の実大煙突に対する強震応答性状を、主に入力波と入力レベルの観点から考察し、更に変位応答については、煙突の弾塑性応答変位が、1質点系の弾塑性応答によってある程度推定できることを述べたものである。

### 1. 序

激震を受けたときの煙突の被害状況は、根元から転倒したり、中間部が飛散したりすることが、過去の被害報告に記されている。このような被害形式は煙突自体の被害だけでなく、近隣におよぼす影響も大であり、その意味からも十分な耐震安全性が望まれる。特に鉄筋コンクリート造（以下R.C.造と略記）煙突の場合には比較的小さな地震入力でもコンクリートにひびわれが入り、剛性が低下するのでこれをいかにして設計に反映していくかが問題であろう。

本研究の目的とした所は、R.C.造煙突が強震を受けた時にどのような応答挙動を示し、これを如何にして解析と結びつけるかを旨としたもので、同題第1報<sup>1)</sup>では弾塑性応答解析法について述べ、第2報<sup>2)</sup>ではR.C.造模型煙突を用いて行なった静加力実験、振動破壊実験結果をシミュレーション解析した結果、第1報での解析法に若干の修正を加えることによってその妥当性を確認した。

本報告では既報の研究結果<sup>1), 2), 3)</sup>から、R.C.造煙突の弾塑性応答を行なう場合に問題となる、弾塑性剛性

の評価方法、履歴特性の検討、減衰の扱い方、などは一応実験的にも確かめられたものと仮定して、6種類の実大煙突に対する応答性状を主に入力レベルとの対応に主眼をおいて検討した。更に変位応答についてはかなり大胆ではあるが、煙突全体を1質点系に置換して、1質点系の弾塑性応答から煙突の弾塑性応答変位を推定する略算式を提案した。

尚、本報告で示した地震応答はすべて基礎固定として計算してある。実際の煙突では杭基礎で設計される場合が多く地盤との相互作用を如何に扱うかが問題となる。解析手法としては杭をバネ—マス系に置換したり<sup>3), 4)</sup>、F. E. M. を用いて上下一体の解析を行なう方法<sup>5)</sup>などが発表されているが、現実にはいずれの解析手法を用いるにしても、地盤の一般的性質が十分に明らかではない。更に地震応答に対しては、地盤の減衰や、土の塑性化の問題など、未解決な問題が山積しているのが現状である。そこで今回は、主旨が筒体部の弾塑性応答性状に重点を置いていることから、出来るだけ不確定要素を取り除く意味で基礎固定を条件とした。

また、本計算では煙突の熱応力、腐蝕などによる剛

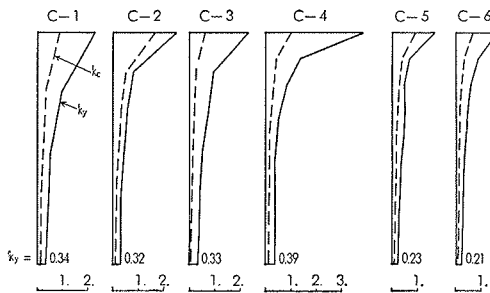
性低下は全く考慮していない。

## 2. 例題煙突

計算に採用した煙突は全高23Mから200Mまでの6基で、表一に概要を示した。これらの煙突は現在までに設計、施工された約30基のなかからほぼ標準的と思われるものを選んだ。図一に、各々の煙突のひびわれ、降伏モーメントから算定されるひびわれ、降伏の震度分布を示した。

項目	煙突名称	単位	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
全高		m	23	42	70	100	150	200
質点数			5	7	7	10	10	10
底部外直径		cm	142	342	495	750	1200	1600
底部肉厚		cm	21	33	35	52	58	70
頂部外直径		cm	81.2	216	270	380	600	800
頂部肉厚		cm	13.6	12	15	17	20	25
筒身勾配比		1/4	1/6	1/6	1/4	1/6	1/6	1/6
底部鉄筋比		%	0.806	1.330	2.131	2.898	1.264	1.583
コンクリート強度		kg/cm <sup>2</sup>	180	180	180	240	240	240
鉄筋許容応力度		kg/cm <sup>2</sup>	2 400	2 400	3 000	3 000	3 500	3 500
1次固有周期		sec	0.6285	0.7650	1.5955	1.9541	2.4531	3.4932
2次固有周期		sec	0.1438	0.1846	0.3804	0.4918	0.6168	0.8649
3次固有周期		sec	0.0593	0.0772	0.1569	0.2061	0.2561	0.3574

表一 計算例煙突概要



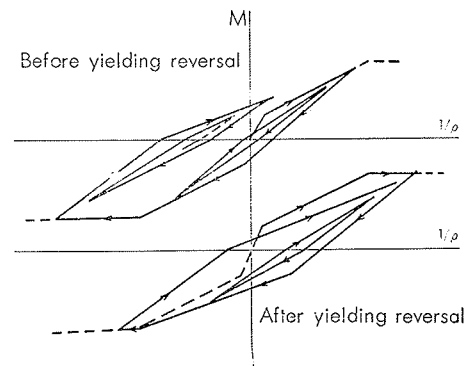
図一 ひびわれ・降伏震度分布

## 3. 計算上の仮定

計算上の仮定は既報の実験結果を参考にして以下の通りとした。

- 1) 基礎は固定とした。
- 2) 材料の力学的性質は表一の通りとし、弾性係数は全て、コンクリート 210(t/cm<sup>2</sup>)、鉄筋 2100(t/cm<sup>2</sup>) とした。
- 3) 弾塑性々状を決定する各断面でのひびわれ、降伏、圧壊時モーメント～曲率の算定方法は第1報に従うが、ひびわれモーメント算定式中の係数は次式の通りとした。  $M_C = (1.2\sqrt{F_C} + N/A) \cdot Z$
- 4) モーメント～曲率関係の繰返し履歴形状は模型実験に対して良いシミュレーションが得られた図二のループ<sup>6)</sup>を用いた。
- 5) 減衰は速度比例型の減衰とし、質量に比例する外部減衰と、塑性後も弾性剛性に比例する内部減衰との和として減衰係数を算出するときの減衰定数は1次、2次共に等しく2%を仮定した。

- 6) 入力波は一般的によく採用される EL CENTRO 1940 NS 波 (8 秒間) と、比較的長周期成分をもつ十勝沖地震 (1968) 八戸港湾記録 (主要動20秒間) を用いた。
- 7) 地震波の入力レベルは地動最大加速度 100gal. から 600gal. とした。
- 8) 応答計算上の時間刻みは  $\Delta t = 0.005\text{sec}$  とした。使用計算機は NEAC-2200-500, IBM-360-195 を用いた。



図二 断面のモーメント～曲率関係

## 4. 応答結果

本報告では紙面の関係で個々の煙突について応答性を詳細に述べることはできないので、ここでは応答結果のうちから、被害の高さ方向分布、煙突頂部の応答変位、煙突脚部の応答モーメントについて、入力レベルとの対応で比較、検討した。

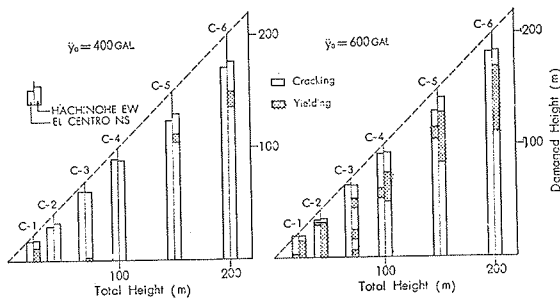
### 4.1. 被害高さ位置について

図三には入力レベルが 400gal. と 600gal. の場合について、最終的なひびわれ発生位置、鉄筋降伏位置を模式的に示した。図の横軸は煙突全高で C-1 煙突から C-6 煙突を示し、縦軸に各煙突の被害高さ位置を白抜き部分がひびわれ発生、黒部分が鉄筋降伏位置で示した。尚各煙突の中心線より左側が EL CENTRO 入力に対するもの、右側が八戸入力に対するものである。被害高さについては以下の傾向がある。

- 1) ひびわれ発生は筒体のかなり上部まで起り、同図には示していないが 200gal. 応答に対しても筒体の中間部より上部まで発生していることから考えて、200gal. 以下の入力レベルでも相当なひびわれ発生による剛性低下を覚悟しなければならぬであろう。
- 2) 鉄筋の降伏は低い煙突では脚部に起るが、高い煙突では筒身上部に起る。このことは、降伏震度分布

がC-5, C-6煙突では他の煙突に較べて上部でやや小さいこともあるが、むしろ高次振動による影響と考えられる。

- 3) ひびわれ、降伏の進行は、低煙突では下部から上部へ移行するが、高煙突では上部で発生した破壊がその上下へ波及していく。
- 4) 鉄筋の降伏は、長周期成分をもつ八戸入力波に対する応答の方が激しい。



図一三 被害高さ位置

#### 4.2. 頂部変位応答について

図一四に頂部最大応変位を入力レベルごとに弾性応答と比較して示した。同図はそれぞれの煙突について横軸に入力レベルを、縦軸に頂部変位をとり、実線が弾塑性応答、点線が弾性応答で示してある。図一四より以下の傾向がみられる。

- 1) 弾性、弾塑性応答ともに八戸入力波の方が、エルセントロ入力波よりも大きな応答を与える。

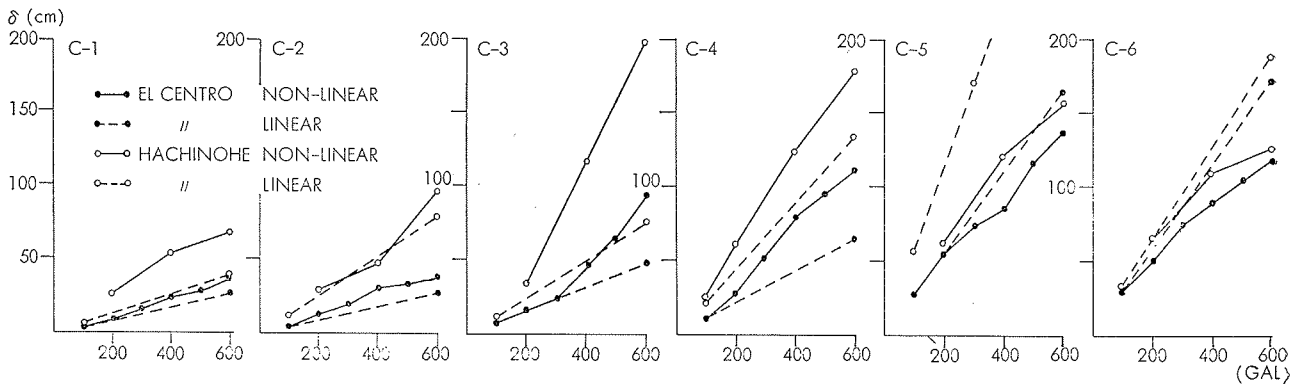
- 2) C-4煙突(100M)までは弾塑性応変位が弾性応答を上まわすが、C-5煙突(150M)以上では逆に弾塑性応変位の方が弾性応答に較べてこの入力レベルの範囲では小さい。

- 3) 二・三の例外を除いては、弾塑性応変位も入力レベルの増加と共にほぼ比例的に増加する。

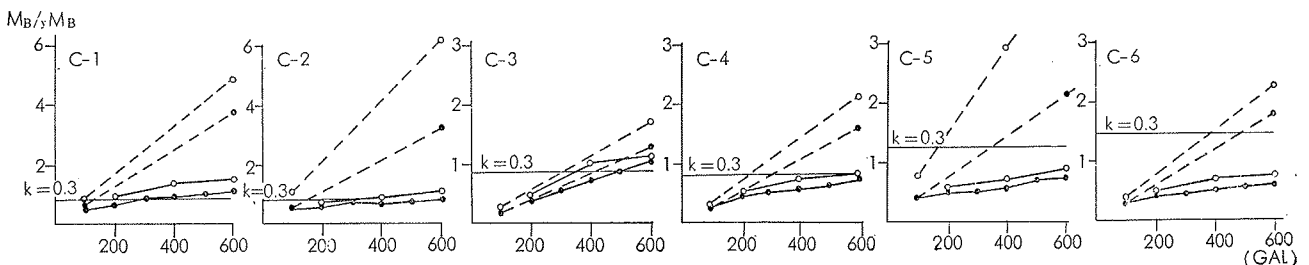
#### 4.3. 脚部応答モーメントについて

図一五は脚部の応答最大モーメントを、脚部の降伏モーメントで除した値( $M_B/M_{By}$ )を応答モーメント係数と定義して縦軸にとり、横軸には前項と同様に、入力レベルをとった。図中の記号は図一四と同一であるが、同時に横線で震度法(0.3)による応力レベルも示した。尚、4.1.項で述べたように鉄筋の降伏は必ずしも脚部に発生するとは限らず、特に高い煙突ほどこの傾向は強いが、脚部モーメントで基礎を設計することも考えて、ここでは脚部モーメントを一つの指標にしてみた。図一五より以下の傾向がみられる。

- 1) 変位応答と同様に、弾性、弾塑性ともに八戸入力による応答の方が大きい。入力波による差は弾塑性応答では降伏耐力でほぼ抑えられるから弾性応答に較べればその差は小さい。
- 2) ひびわれの発生により剛性が低下するので、弾塑性応答モーメントは弾性応答より当然小さい。
- 3) 低い煙突ほど応答モーメント係数は大きく、小さな入力で降伏モーメントに達する。但し先にも述べたように低い煙突では脚部降伏が先行するが、高い



図一四 頂部応答変位と入力レベルの関係



図一五 脚部応答モーメント係数と入力レベルの関係

煙突では中間より上部で降伏耐力に達するので、この図からすぐに高い煙突は大入力でも降伏しないということにはならない。

- 4) 震度0.3の水平一様外力に対する応力レベルを応答レベルと比較すると、低い煙突では例えば200gal.程度の低い入力レベルでも降伏耐力に達する。高い煙突では脚部に関しては十分余裕がある。尚、図一1で示した降伏せん断力係数は  $M_B/M_{By}=1$  に相当する。

## 5. 1 質点系応答による変位略算式

R.C. 造煙突を設計する場合に応答応力によって断面算定を行なう強度設計と共に、与えられた外力に対してどの程度の変形を生じるかを知っておくことが必要であろう。その為には前述のような弾塑性応答計算による精算を行なうことも一つの手段ではあるが、現実には結構大変なことであろうから、もし簡単に1質点系の応答からおおよその変形が推定できれば少なくとも試設計の段階での一助になり得ると考える。

この場合一番問題になるのは煙突筒体を如何にして1質点系にモデル化したらよいかであり、具体的には1質点系の重量、弾性剛性、復元力を決めることにある。この時考えられる方法としては、

- (i) とにかく出来るだけ簡単に計算できるモデルを考える方法
- (ii) 少々めんどうでも、出来るだけ忠実に煙突の応答があらわせる方法

の二通りが考えられる。(ii)の方法の一例としては、多質点系の振動を1質点系の振動に置きかえるために、換算質量、換算剛性を用いて煙突が一次形で振動する時の頂部変位に等しい変位を得る1質点系を考え、この換算復元力としては煙突脚部が降伏する時の筒体全部が保有する全エネルギー量と等しいエネルギーをもつ1質点系を考える方法がある。しかしこの方法は、かなりめんどうであり、紙面の関係で詳述できないので、ここでは最も簡単な方法の例として以下の1質点系モデルを用いて検討した。

### 5.1. 1 質点系のモデル化

ここでは煙突の危険断面が脚部に存在すると仮定して、以下の如く単純にモデル化したものである。

- (i) 1質点系の重量は煙突の全重量を用いる。
- (ii) 1質点系の弾性剛性は、煙突の1次固有周期 $T_1$ と全質量 $m$ とから  $K_1=4\pi^2m/T_1^2$  で計算する。
- (iii) 1質点系の復元力特性は、煙突脚部のひびわれ、降伏せん断力係数(図一1)を用いて、図一2と同様の履歴形を、せん断力-変位の関係で仮定する。スケ

ルトンカーブにおける第2, 第3剛性比は、本報告では煙突の高さ方向に1次モード形の水平増分外力を漸増増荷した場合の頂部変位曲線より仮定したが、更に簡単にするためには、煙突脚部のモーメント-曲率履歴をそのまま用いるのもよい。

### 5.2. 変位略算式

この1質点モデルに対して煙突の場合と同様の入力波、入力レベル、減衰を用いて行なった1質点系の弾塑性応答結果から、煙突の弾塑性応答変位を推定する略算式をつぎのように得た。

$$\text{提案式一1} \quad {}_1S_d = 0.9 \cdot \alpha \cdot D_e$$

$$\text{提案式一2} \quad {}_iS_d = {}_i\beta_1 u_i \cdot d_p$$

- 但し  ${}_1S_d$ ; 煙突の頂部弾塑性変位の略算値  
 $\alpha$ ; 1質点系の弾塑性応答変位と弾性応答変位の比  
 $D_e$ ; 煙突の頂部弾性応答変位精算値  
 ${}_iS_d$ ; 煙突の  $i$  質点弾塑性変位略算値  
 ${}_i\beta_1 u_i$ ; 煙突の  $i$  質点1次刺激係数  
 $d_p$ ; 1質点系の弾塑性応答変位 (但し  $d_p$  = 弾性と考えれば弾性応答にも適用できる)

即ち、提案式一1は実験式で、煙突頂部の弾塑性変位のみを略算するものであり、提案式一2は、ルートミーンスクエアの手法を1次のみ適用したもので各質点の弾性、弾塑性を略算するものである。(勿論これを拡張して高次の影響も加味できないことはないが、その場合に高次周期に対する1質点系の復元力特性について一考する必要がある)

図一6には提案式一1を用いて略算した頂部変位を精算値と比較して、エルセントロ、八戸、両入力波のすべての入力レベルについて示した。

図一7には、提案式一1と提案式一2の比較を精算値との対応で示した。(但し八戸入力の場合のみ)

図一8, 9は、変形モードの1例として、C-1煙突とC-6煙突の八戸入力に対する応答略算値を提案式一2で計算し、精算値と比較した。

図一6から図一9を参考にして1質点系の略算応答に関する考察をまとめると、

- 1) 煙突頂部の弾塑性変位のみを求めるときは、提案式一1によって本例題の場合は比較的良い結果が得られている。
- 2) 提案式一1と提案式一2による差はあまりない。
- 3) 提案式一2の変形モード図をみると、弾性応答ではかなり良い一致を示していることから、曲げ振動が支配的な煙突でもルートミーンの手法は適用でき

しかも、一次のみ考えてもほぼ良い結果が得られる。

- 4) 煙突脚部の降伏を前提にしているから低い煙突ほど略算的精度は良い。

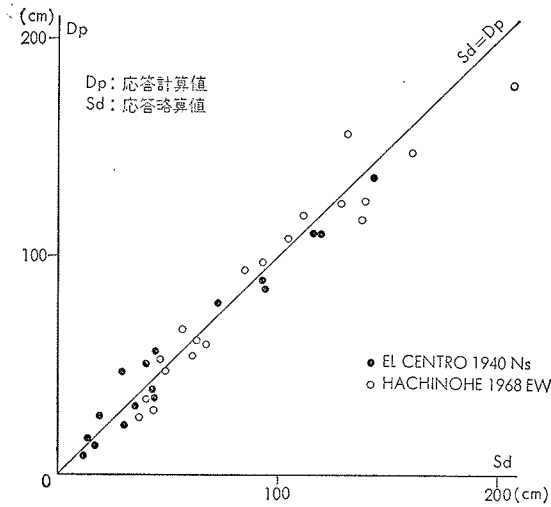


図-6 精算値と提案式-1の比較

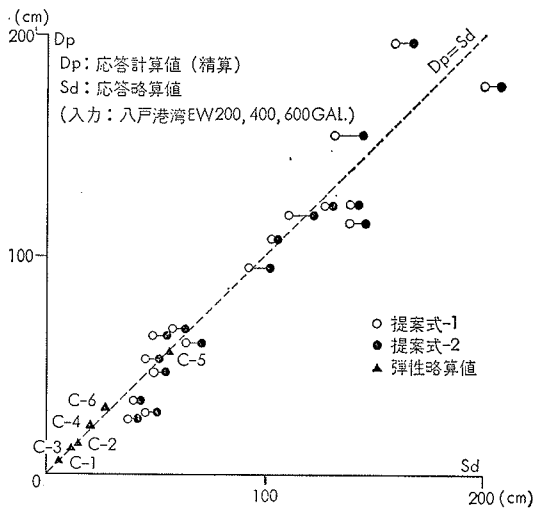


図-7 精算値と提案式-1, 2の比較

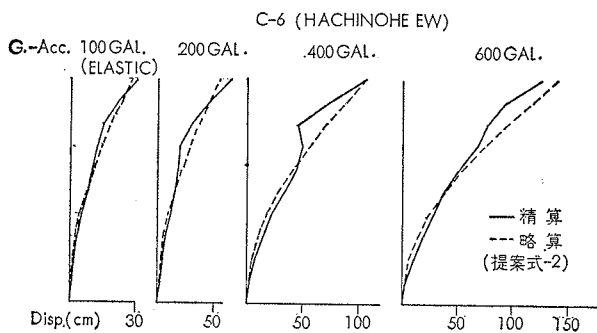


図-8 略算変形モードの例 (C-1 煙突)

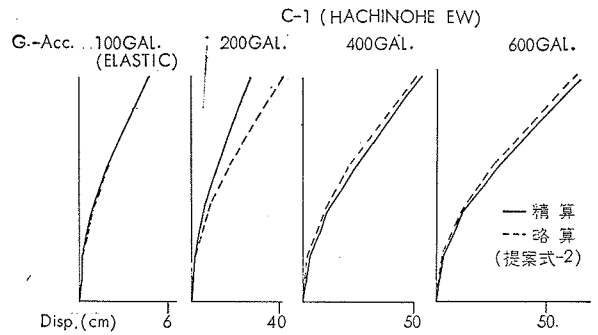


図-9 略算変形モードの例 (C-6 煙突)

## 6. 結び

本報告では6種類の実大煙突に対する弾塑性応答結果の一部を示し、変位応答については、これを1質点系の応答である程度推定できることを示した。R. C. 構造物の弾塑性応答は、断面の性質、入力波、入力レベルなどによって必ずしも規則的ではないが、このような資料の蓄積が耐震設計への一助となれば幸いである。

## 謝辞

本研究を進めるに当り、貴重な御助言をいただきました東京大学梅村魁教授、青山博之助教授に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 表・武田 同題第1報 大林組技術研究所報 No. 6 (1972)
- 2) 表・武田 同題第2報 大林組技術研究所報 No. 7 (1973)
- 3) 表・武田「鉄筋コンクリート造煙突の弾塑性応答に関する研究(その1)」建築学会論文報告集第 215号 (昭49・1)
- 4) 武藤・内田・小林他「超高煙突と地盤との相互作用を考慮した地震応答解析」建築学会大会号 (昭44・8)
- 5) 伊藤・中川・武田「超高煙突一地盤系の有限要素法による振動解析」建築学会大会号 (昭48・10)
- 6) T. Takeda 他「Reinforced Concrete response to simulated earthquakes」A. S. C. E. (S. T.) (1970. 12)