

RC 超高煙突の風による振動観測

川口 彰久 武田 寿一
角田 智彦 本間 義教

Observations of Wind-induced Vibrations of High-rise RC Chimney

Akihisa Kawaguchi Toshikazu Takeda
Tomohiko Tsunoda Yoshinori Honma

Abstract

The chimney is a flue-type high-rise structure 200 meters in height and consists of one reinforced concrete external flue and two steel internal flues. The authors conducted measurements on the chimney and the results are summarized as follows. The first mode was predominant in wind-induced vibrations of the chimney. The amplitude of acceleration in response in the direction orthogonal to the wind was generally larger than in response in the direction of the wind. The maximum acceleration at the top was 56 gal, and the maximum displacement was predicted to be 11 cm. The wind condition at this time corresponded to the nondimensional frequency $nD/U=0.22$.

概 要

この報告は、SVETHO工法により建設されたRC造200mの超高煙突の風による振動の観測結果について述べたものである。観測は、2回行なった。1回目の観測は煙突の稼働前であったので、煙突頂部に風速計を取り付け、ここでの風速と煙突の振動との対応を連続記録から調べた。2回目の観測の時には煙突が稼働していた。この時には59m高さの風速計と地震時観測用のシステムを利用して、風速と振動との対応を調べた。その結果、煙突の風による振動は1次振動が卓越したこと。風直交方向の振動が風方向より激しく、観測期間中の頂部の最大加速度は56galであり、最大変形は約11cmと予測されたこと。この時の無次元振動数は0.22であったことなどを報告した。

1. はじめに

自然風中にある高層建築物や長大構造物が、風の作用を受けて振動することは良く知られており、これら構造物の耐風設計は重要な研究テーマである。

煙突のような円柱構造物は、風により複雑な振動を示すが、一般的にはバフティング振動や渦励振振動に分けて考えられている。バフティング振動は、風の乱れによる変動空気力の作用によって生ずる現象であり、風速の増大とともに振動振幅も大きくなる傾向にある。これに対して、渦励振振動は、構造物背後の周期的な渦列の発生によるものであり、この渦列の発生周波数が構造物の固有振動数に一致したときは、低風速であっても振幅の大きな振動を示すことがある。

本調査は、特に渦列の発生に伴う風直交方向の振動現象を、実物の超高煙突で観測しようとしたものであり、本報告はその観測結果を報告するものである。

2. 煙突の概要

超高煙突は、昭和52年春に竣工したもので、スリップホーム工法により建設したRC造の外筒と2本の内筒から成る。最高高さは、地上200mである。外筒基部の直径は27m、頂部直径は10mである。煙突の各部寸法は概略図-1に示す。

自由振動実験や強制振動実験の報告¹⁾によれば、当煙突の固有振動数と減衰定数は、表-1である。振動モードは、図-2である。

3. 観測方法

当煙突での風による振動観測の試みは、2回であった。第1回は、煙突の竣工直前の昭和52年3月であり、第2回は煙突が稼働していた昭和55年6月～56年6月までであった。

3.1. 第1回目の観測方法

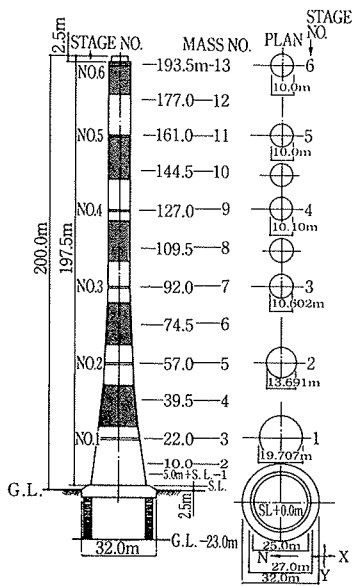


図-1 煙突の概略図

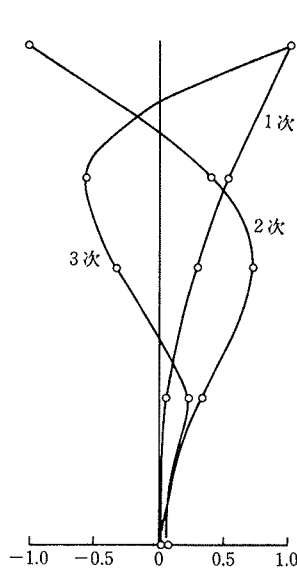


図-2 振動モード

外筒の次数	1	2	3
周期 (sec)	2.56	0.61	0.278
振動数 (Hz)	0.39	1.65	3.60
減衰定数 (%)	0.82	1.33	1.55

表-1 固有周期と減衰定数

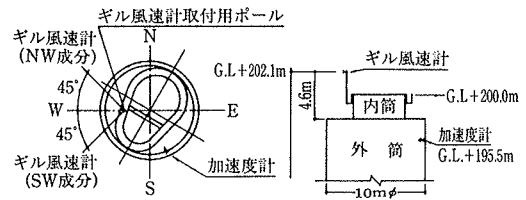


図-3 風速計と加速度計の取付概略図 (第1回目の観測)

風速の測定は、煙突の頂部にポールを建てて、地上202.1mの高さにギル型風速計を取り付け実施した。

煙突の振動は、地上195.5mの位置に加速度計を設置し、ここで直交する2成分を測定した。

これらからの出力は、データレコーダにアナログ記録し、サンプリングタイム0.1秒でデジタル化し、解析を行なった。

風速計と加速計の取付け概要は、図-3に示す。

3.2. 第2回目の観測

2回目の観測の時には、煙突が稼働していたので、1回目の時のように風速計を取り付けることができず、煙突から西方へ約220m離れた建家屋上に設置されているプロペラ型風向風速計により風速を記録した。ただし、ここでの風速記録は、10分間の移動平均である。

煙突の振動観測は、地震観測用に設置されたシステムを利用して行なった。即ち、頂部の197.5m高さ位置と中間部の112m高さ位置に設置されていた加速度計を利用した。中間部では直交する2成分を測定した。振動の記録は無人方式としたので、頂部の加速度が設定した加速度以上になるとスターターが働き、記録器(電磁オシロ)が作動するようにした。しかし、また途中でタイマーを設けて、30分間隔毎に1分間しかデータ信号が伝わらないようにしたので、データを集録するチャンスはかなり限られたものとなった。

なお、データが記録された時には、日付と時刻が記録されるので、風向や風速記録との対応は可能であった。

煙突の振動記録は、タイマーの作動により最大1分間である。そこで、この1分以内のデータから最大振幅を

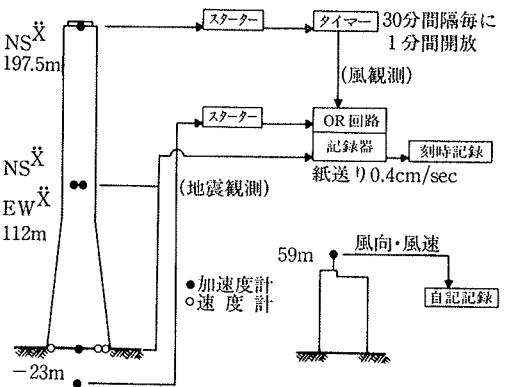


図-4 観測システムブロック図 (第2回目の観測)

読み、中間部の直交する2成分の振幅とその時刻の風向から、風に対する主風向成分と風直交方向成分の振幅を求め、風速との対応を調査することとした。

観測システムのブロック図は、図-4に示す。

4. 観測結果

4.1. 第1回目の観測結果

4.1.1. 風速 10分間の平均風速は、7.6~10.3m/sであった。平均風速の鉛直分布が指数則に従い、かつ地表面の状況から指数1/6であると仮定すれば、煙突の最高高さ(H)の2H/3高さでのレイノルズ数(R_e)は5.0~6.7×10⁶に相当する。また、乱れの強さは11.8~24.6%であり、ガストファクターは1.34~1.79であった。

ガストファクターを評価時間の関係で示すと、図-5となり、石崎・光田の式²⁾に準拠させると、10秒より長い評価時間に対しては、

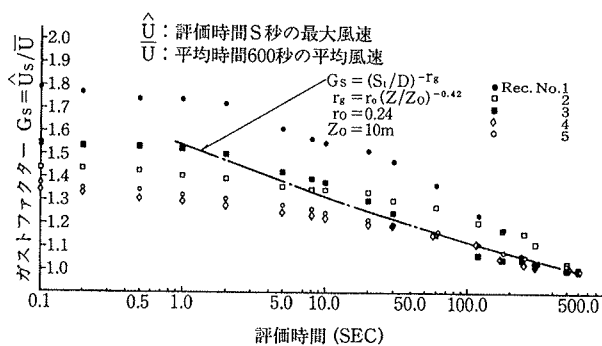


図-5 ガストファクターと評価時間の関係 (第1回目の観測)

$$G_s = \left(\frac{S_t}{D}\right)^{-r_g}, \quad r_g = r_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{-0.42}$$

$r_0 = 0.17 \sim 0.35$ となり、平均 $\bar{r}_0 = 0.24$ であった。ただし、 G_s : 評価時間 S 秒、平均時間 D 秒のガストファクター、 Z : 地上からの高さ (m)、 Z_0 : 基準高さ (=10 m) である。

変動風速のパワースペクトルは、図-6に示す。一般的に、変動風速のパワースペクトル ($S(n)$) は、高周波数領域において周波数 (n) の $-5/3$ 乗に比例した減少傾向にあるといわれており、実測値はほぼこの傾向にある。図中、Davenport³⁾の提案するスペクトルも示すが、大旨実測結果とよく合っている。

4.1.2. 振動 応答加速度のパワースペクトルは、図-7に示す。煙突の1次固有振動数で著しく卓越している。2次固有振動数での卓越もみられるが、振動実験による固有振動数 ($N_2 = 1.65$ Hz) より多少低く、1.59 Hz である。

風速と振動の関係は、図-8に示す。風速は30秒間の平均風速であり、振動は30秒間の最大加速度である。煙突の1次固有振動数に対する無次元振動数は約0.3~0.8相当であること、および、風直交方向の振動が風方向の振動と同程度であること、などから察すると、煙突の固有振動数と煙突背後に生ずる渦列の発生周期が一致する、いわゆる渦励振現象はなかったものと考えられる。

4.2. 第2回目の観測結果

4.2.1. 風速 2回目の観測期間中の風速は、地上59 m 高さで20~20.5 m/sであった。従って、1回目の時と同様な仮定のもとに、煙突の2H/3高さでの風速を求めると、2.3~23.6 m/sとなり、レイノルズ数は $R_e = 1.6 \sim 17 \times 10^6$ (超臨界から超越臨界レイノルズ数領域)、煙突の1次固有振動数に対する無次元振動数は、 $N_1 \cdot D / \bar{U} = 0.15 \sim 1.57$ の範囲である。

4.2.2. 振動 (1)振動周波数 最大振幅を記録した加速度波形から、1次固有振動数を読み取ると $N_1 = 0.36$

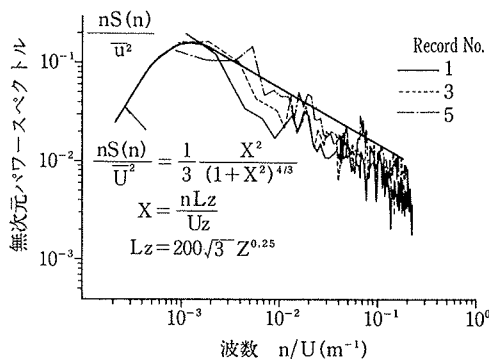


図-6 変動風速のパワースペクトル (第1回目の観測)

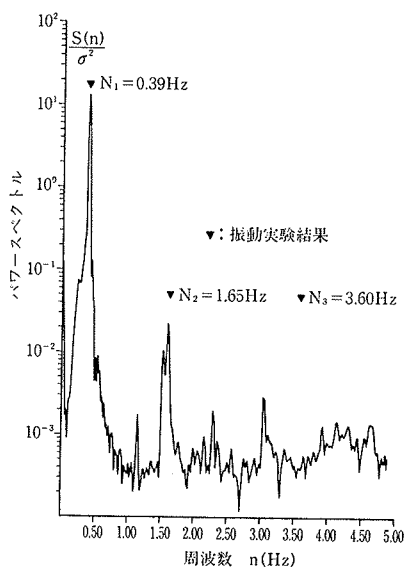


図-7 応答加速度のパワースペクトル (第1回目の観測、半径方向)

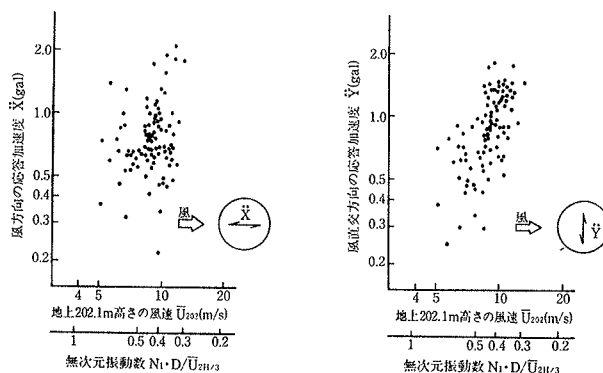


図-8 風速と振動(最大加速度)の関係 (第1回目の観測)

Hzであった。この振動数は、振動実験や地震観測あるいは第1回目の観測で認められた $N_1 = 0.39$ Hzと比べると、多少周期が長くなっていた。高次振動の卓越は、中間部の加速度波形からも認められなかった。

(2) 振動モード 頂部と中間部の同一振動方向の最

大振幅の比は、図一9となる。頂部の加速度振幅が小さいと振幅比は多少散らばるが、振幅が大きくなると1次固有振動のモードに収束した。

(3) 風速と振動の関係 中間部の直交する加速度の2成分とその時の風向から、主風向の成分とそれに直交する成分を求め、さらに振動モードから頂部の最大加速度を計算した。結果は、図一10に示す。

いずれの振動方向も風速の増大とともに振幅を増大させているが、風直交方向の振動は風方向の振動と比べて、急激である。しかし、風直交方向の振動振幅は、風速14 m/s、無次元振動数 $n_r = N_1 D / U = 0.22$ の時に、最大加速度の卓越を示し、これ以上の風速に対しては減少傾向にある。最大加速度は 56 gal であり、最大振幅は約 11 cm と予測される。

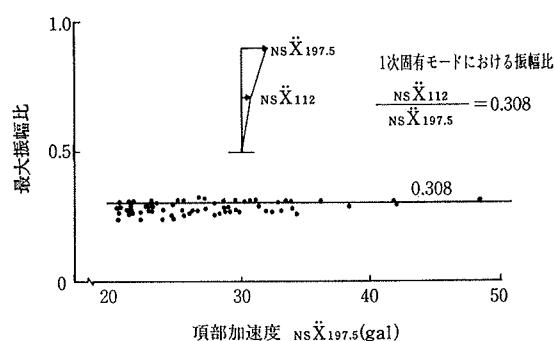
5. 応答解析

煙突の振動応答の解析は、煙突を多質点系にモデル化し、1次振動だけを考慮して行なった。そこでまず、風方向の最大応答加速度は、バフティング振動理論⁴⁾と Davenport⁵⁾ のピークファクターから予測している。なお、解析上の風の性質は、次の様に仮定している。①平均風速の鉛直分布： $\bar{U}_z = \bar{U}_0 (z/z_0)^\alpha$, $\alpha = 1/6$ ②乱れの強さの鉛直分布： $\sqrt{\bar{u}^2} / \bar{U}_z = \sqrt{6\kappa} (10/z)^\alpha$, $\kappa = 0.014$ ③風速のパワースパクトル： $nS(n) / \bar{u}^2 = 2/3 \cdot X^2 / (1 + X^2)^{4/3}$, $X = nL_z / \bar{U}_z$, $L_z = 200 \sqrt{3} Z^{0.25}$ ④空気カアドミッターズ： $|\chi(n)|^2 = 1$ (風力変動は風速変動と線型関係にある

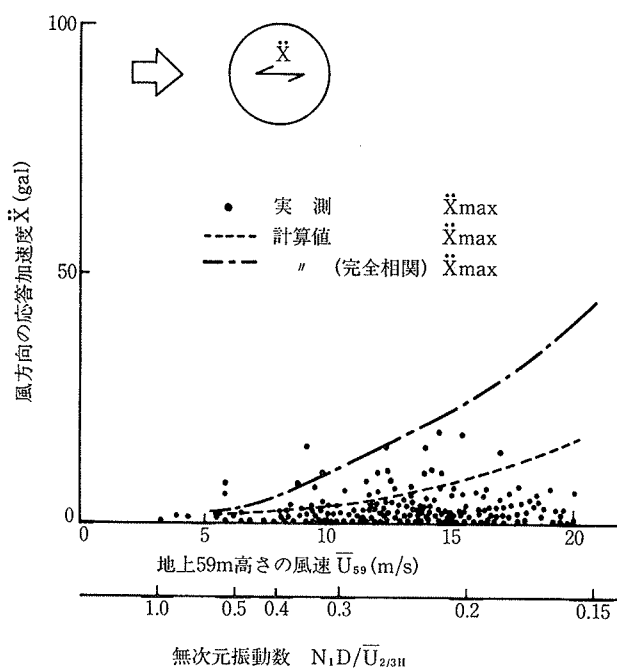
と仮定) ⑤風力の周波数相関関数： $R(Z_1, Z_2, n) = \exp\{-kn|Z_1 - Z_2|/\bar{U}\}$, $k = 8$ の場合と $k = 0$ の場合(完全相関) ⑥抗力係数： $C_D = 0.7$

解析結果は、図一10a) の実測結果と比べて示す。図中、破線は風力の周波数相関関数の係数 $k = 8$ の場合、一点鎖線は $k = 0$ (完全相関) の場合を示す。この結果、風力の周波数相関を完全相関と仮定することは、実測値の最大値を予測することがわかる。

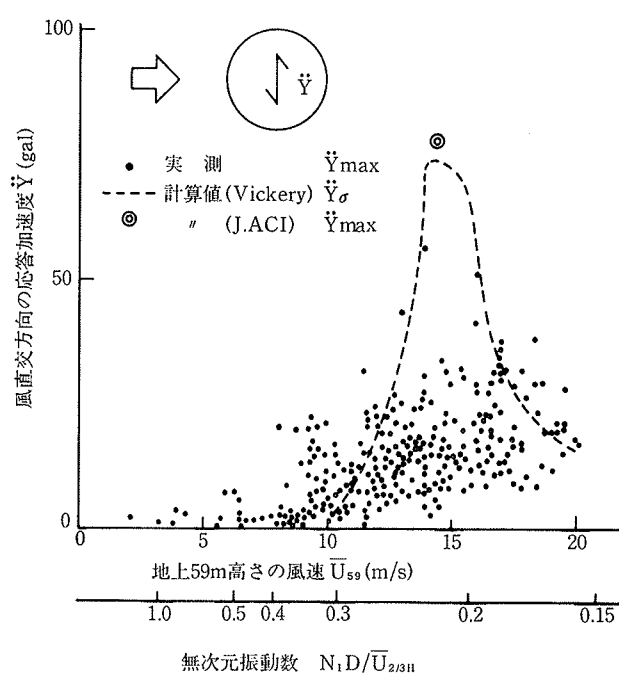
次に風直交方向の振動を予測する。風直交方向の振動は、背後発生渦列によるものであるが、渦列の発生性質が R_e 数の影響を受け⁶⁾ また構造物の振動が渦列の発生をコントロールする⁷⁾ こともあるために、振動の予測方法もバフティング振動ほどに確立されていない。本件においては、Vickery⁸⁾ による横力の性質を仮定した場合と日本建築学会指針⁹⁾ に紹介されている ACI



図一9 振動モード (第2回目の観測)



a) 風方向の振動



b) 風直交方向の振動

図一10 風速と振動(最大加速度)の関係 (第2回目の観測)

Journal⁹⁾の方法を適用している。Vickery の示す渦列による横力の性質は、次の様に仮定した。

①横力のパワースペクトル： $nS(n)/\bar{c}_L^2 = n(\sqrt{\pi} B n s)^{-1} \exp[-\{(1-n/ns)/B\}^2]$, $\sqrt{\bar{c}_L^2} = \sqrt{q^3} (0.5 \rho D_z \bar{U}_z^2)^{-1}$, $B = 0.1$ ②横力の周波数相関： $R(Z_1, Z_2, n) = \cos(2r/3) \exp\{-(r/3)^2\}$, $r = 2|Z_1 - Z_2|/(D_{z1} + D_{z2})$ ③横力係数： $\sqrt{\bar{c}_L^2} = 0.2$ ④ストローハル数： $S = 0.22$

また、ACI Journalの適用においては、単位高さ当りに作用する横力を平均風速の鉛直分布 ($\bar{U}_z = \bar{U}_0(Z/Z_0)^\alpha$) に対応して与えるとともに、煙突の全高の 2H/3 高さにおけるストローハル数は Vickery のそれと等しくしている。

解析結果は図-10 b) の実測結果と比べて示す。Vickery の横力の性質を適用して求めた応答値 (図中破線) は標準偏差値であるから、実測値や ACI Journal (図中◎印) と定量的な比較はかならずしもできないが、地上高さ 59 m での風速 14~16 m/s 付近での卓越傾向はよく類似している。ストローハル数 $S = 0.22$ 付近では、Vickery の横力を適用した結果 (\dot{y}_0) が実測値 (\dot{y}_{max}) より大きくなっているが、これは Vickery の一様流中での仮定を乱れた自然風中に建つ煙突に適用したためではないかと考える。

6. まとめ

2回にわたる RC 超高煙突の風による振動観測結果を要約すると、以下の通りである。

(1) 地上 202.1 m 高さにおける風の乱れの強さは 11.8~24.6%, ガストファクターは 1.34~1.78 であった。

(2) 風速のガストファクターを評価時間との関係で示し、石崎・光田の式をあてはめると、10秒より長い評価時間に対して、 $G_s = (S_s/D)^{-r_s}$, $r_s = r_0(Z/Z_0)^{-0.42}$, $r_0 = 0.24$ により大旨近似された。

(3) 変動風速のパワースペクトルは、Davenport の提案するパワースペクトルとよく合っていた。

(4) 超高煙突の風による振動は、1次振動 (振動数: 0.36 Hz) が卓越し、2次以上の高次振動の卓越は観測されなかった。

(5) 観測期間中の風直交方向の振動は、風方向振動よりも激しく、最大加速度は 56gal であった。最大変位は約 11 cm と予測される。この時の風速は、地上 59 m 高さで 14 m/s であり、煙突の全高の 2H/3 高さにおける 1次固有振動数に対する無次元振動数は $N_1 D / \bar{U} = 0.22$ となる。この値は、Vickery が提案するストローハル数と一致する。

(6) 応答解析結果では、高次振動を無視し 1次振動だ

けの考慮であったが、風方向振動はバフエーティング振動理論により十分対応できると考えた。これに対して、風直交方向の振動は定性的な卓越傾向は合致するものの、定量的には今後問題を残している。

(7) 観測方法や解析方法は十分といえるものではなかったが、自然風中での風による励振振動の一端を観測できたものとする。

謝 辞

この調査研究は、中国電力(株)と当技術研究所との共同研究により実施されたものである。観測にあたっては、中国電力(株)本店土木部建築担当と下関発電所保修課の御協力をいただきました。また、第 1 回目の観測においては、当社特殊工法下関工事事務所、下関共同企業体の方々に御世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺, 角田, 安井, 金子: RC 超高煙突の基礎および筒体の振動実験と地震観測 (その 1~2), 大林組技術研究所報, No. 18, (1979), pp. 23~33
- 2) 石崎, 光田: 強風時における突風の拡がり と突風率について, 京都大学防災研究所年報, 第 5 号 A, (1962), pp. 135~138
- 3) Davenport A. G.: The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters, W. E. B. S., (1967), pp. 19~82
- 4) 岡内, 伊藤, 宮田: 耐風構造, 丸善, pp. 236~251
- 5) Davenport A. G.: Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading, I. C. E., Vol. 28, (1967), pp. 187~195
- 6) 石崎潑雄: 耐風工学, 朝倉建築工学講座 15, pp. 98~104
- 7) 笠口, 田中, 高原, 松井: 振動円柱の非定常空気力に関する研究, 構造物の耐風性に関する第 1 回シンポジウム論文集, (1970), pp. 153~159
- 8) Vickery B. J.: Lift or Across-wind Response of Tapered Stacks, Proc. of ASCE, J. of Structural Div. Vol. 98, No. ST 1, (1972), pp. 1~20
- 9) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針, (昭和51), pp. 94~96
- 10) Maugh L. C., Rumman W. S.: Dynamic Design of Reinforced Concrete Chimneys, J. of American Concrete Institute, Vol. 64, No. 9, (1967), pp. 558~567