

鉄筋コンクリート造煙突の取りこわし倒壊時の地盤振動

角 田 智 彦
寺 村 彰
瀬 尾 和 大

概 要

建設後およそ30年経たRC造23M, 50M煙突が解体されることになった。本論文はその時の¹⁾倒壊方法²⁾フィルムに納められた倒壊の様子および³⁾倒壊によって発生した地盤振動, などを整理して公害予防の見地から振動量の予測を振動エネルギーと振巾減衰の面から論じた。この結果, ある程度量的な推定が出来て現場作業上の安全性の指導および振動公害の有無の確認が可能になった。

1. 序

1.1. まえがき

当研究室では数年前より波動の減衰量を定量的にとらえる方法を研究してきた。一般に杭打振動その他公害問題で処理している振動量の推定は距離減衰をそれぞれの測定の前振巾値でとりあつかうことが多く, 地盤の動特性, 波群, 減衰項などを含めてふれることは少ない。軟弱地盤の杭打時地盤振動が振源においてP波, Sv波成分をより多く発生させある距離以遠では地表面においてレーリイ波成分が卓越することは予想されることであり, 今回の倒壊実験測定計画もそれに近い現象が発生することを考慮に入れてなされた。また倒壊時の落下エネルギーは地盤上でその構造体の破壊, クッション材の破壊や変形, 地盤の破壊や変形につきやされるはずであるがそれらのうち振動エネルギーに変換される割合を実験的に求めようと試みた。

1.2. 実験目的

当初この実験を行うことの意義は50M煙突を一挙に倒壊した時, 附近の民衆におよぼす振動障害の有無についての判断の資料を事前に集めておくことにあった。そこで同一敷地内にある23M煙突を試験的に倒壊させその際の接地速度, 直下地盤の衝撃加速度, および距離減衰に関する測定を行い解体工事の安全性を確認しようとした。また50M煙突倒壊時には波動伝播の様子を詳細に検討出来るよう計画し地盤の動特性と衝撃波動の関係を論じようとした。

2. 煙突倒壊実験

2.1. 煙突形状

倒壊実験の対象になった煙突は表—2.1に示される23M煙突と50M煙突との2本のRC煙突である。

2.2. 倒壊方法

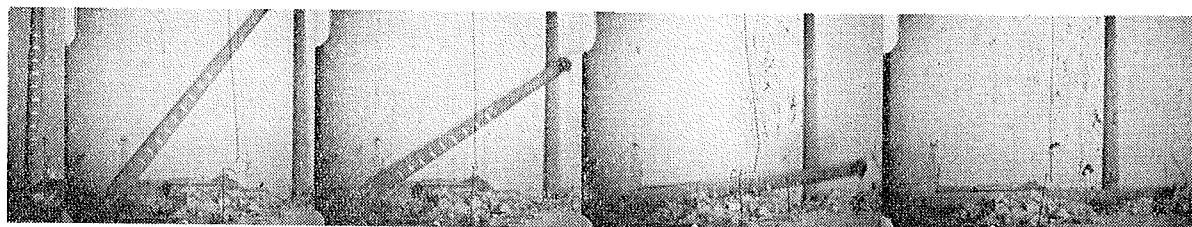
倒壊方法は, 社内工事資料に示される方法であり, これは図2.1に示した。すなわち作業順序, (1)煙突の根元を斫り落し鉄筋をカットする。同(2)引張鉄筋をセンターより切断していく。同(3)重心に生ずる自重により自然落下させる。

2.3. 倒壊様子

倒壊の様子は8%カメラの撮影によりとらえこの一部を写真2.1に示した。後日, この拡大写真から接地時の速度, 接地後のくずれ方等の検討をした。図2.2は23M煙突の落下過程の位置, 速度を追跡した図である。この結果, 接地時の速度は約22.5m/sであり, 自然落下の計算速度 $V = \sqrt{2gH} = 21.32\text{m/s}$ と比較して遅

		23m煙突	50m煙突
構 造		R C 造	
高 さ (m)		23.2	50.0
全 重 量 (トン)		50.	500.
上端寸法 (m)	外 径	1.20	3.20
	厚 さ	0.10	0.15
下端寸法 (m)	外 径	1.80	4.80
	厚 さ	0.18	0.35

表—2.1 煙突の形状



写真—2.1 倒壊追跡写真

くないので大差ないと思われる。

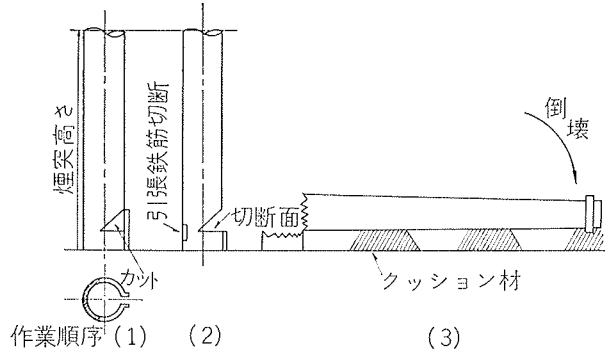


図-2.1 倒壊方法

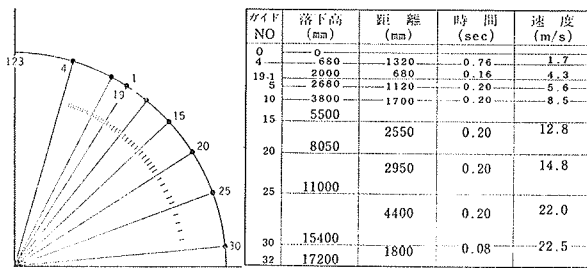


図-2.2 23M煙突の落下過程

3. 測定計画

3.1. 測定内容

先の実験目的に応じて次の3項目の計画を行った。

- 1) 実験地盤の動特性を知るための常時微動測定。
- 2) 波動伝播時の地盤減衰を求めるための測定。
- 3) 煙突の運動エネルギーと地盤変位によるエネルギーとの比率(J)を求めるための測定。

3.2. 測定計画

当敷地は東西約300M、南北約150Mの広さがある。北側は道路をへだてて護岸堤防があり、西側は境界線に接して木造2階建住宅が密集している。又地盤はいわゆる水面下の軟弱地盤である。

測定項目	計器の種類	測定場所	成分・測点数	記号
常時微動	速度計(動コイル型)	130M測点	H・V・1	□
地盤減衰	速度計(動コイル型)	23M煙突: 測点70M	H・V・5	○
		50M煙突: 50~130M	H・V・5	
地盤減衰	変位計(動コイル型)	23M煙突: 50~130M	H・V・5	⊙
		50M煙突: 110~210M	H・V・5	
エネルギーの伝達比・J	加速度計(歪型)	小名木川堤	23M煙突H・V・1	△
			50M煙突H・V・1	
		落下地点直下	23M煙突H・V・2	
エネルギーの伝達比・J	変位計(動コイル型)	測線上	H・V・5	⊙

表-3.1 使用計器

このような状況のもとで、近隣物への安全性を検討して煙突倒壊方向の決定、および測定計画を行なった。この計画は図3.1に示した。使用計器は計器種類の記号と共に表3.1に示した。速度計、変位計は測線に沿い地表面上に配置し、落下地点直下の加速度計は倒壊線に沿い煙突中央部と先端部に相当する地表面下1.0Mに埋めこんだ。

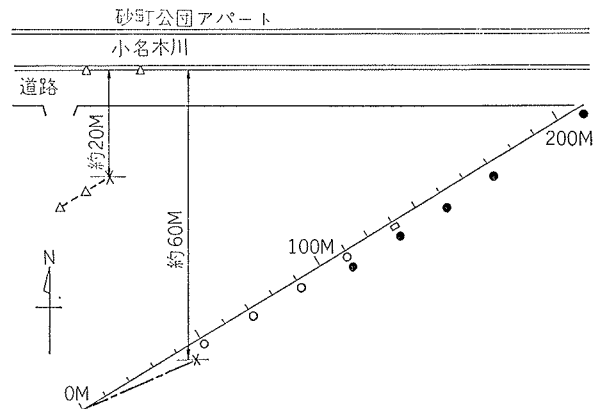


図-3.1 測定計画図

4. 測定結果

23M煙突および50M煙突倒壊時の測定結果を表4.1に示す。表中の各項は測定波形中の最大振幅を示した

測定場所 (m)	測定成分	23 m 煙突			50 m 煙突		
		変位 μ	速度 mm/sec	加速度 cm/sec ²	変位 μ	速度 mm/sec	加速度 cm/sec ²
煙突直下	H	—	—	—	—	—	—
	V	—	—	—	—	—	—
堤防	H	—	—	2.57	—	—	26.2
	V	—	—	2.57	—	—	19.5
20	H	—	△	—	—	—	—
	V	—	△	25.50	—	—	—
50	H	39.2	△	—	—	5.56	△
	V	225.2	△	—	—	7.81	30.0
70	H	30.0	1.19	—	—	3.06	※15.3
	V	74.1	0.80	—	—	6.50	※32.6
90	H	△	—	—	—	1.92	※9.6
	V	53.8	—	—	—	4.49	※22.5
110	H	14.0	—	—	234.	2.55	※3.4
	V	37.1	—	—	532.	4.17	※5.5
130	H	11.7	—	—	185.	1.54	※2.1
	V	22.4	—	—	△	2.11	※2.8
150	H	—	—	—	294.	※3.87	※5.0
	V	—	—	—	216.	※2.84	※3.7
170	H	—	—	—	346.	※4.55	※6.0
	V	—	—	—	182.	※2.44	※3.2
210	H	—	—	—	285.	※3.75	※4.9
	V	—	—	—	70.	※0.92	※1.2

表-4.1 測定結果

ものである。尚、*を付したものは変位、速度の測定結果よりの換算値を示す。また50M煙突倒壊時の測定波形をもとに Paste up の作成を行ない、上下成分、水平(radial)成分を夫々図-4-1, 2に示した。

次に振源に最も近い50M地点の波形の orbit から波群の分類を行ない、その結果図-4-3のごとく、(a) P波、(b)SV波、(c)レーリー波の3種類が分離できた。P波部分に水平成分が生ずるのは振源が地表にあるためであろう。(b)をSV波とする根拠はやや曖昧であるが、レーリー波とはやや様相が異なり、しかもP波とレーリー波の中間に位置することから判断した。

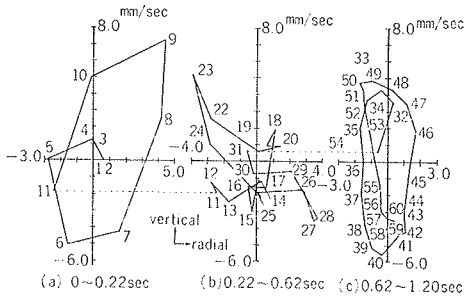


図-4.3 orbit による波群の分類

5. 地盤構造

実験地盤は厚さ約46Mのシルト層(沖積層)とその下の上部東京層(洪積層)から成っている。嶋等は当地盤近くで弾性波試験を行なっているが、その時の試験結果を考慮すると、地表付近の弾性波速度はS波100M/S、P波350M/S(ポアソン比=0.456)程度、また深さと共に弾性波速度は漸増しておりGL-40M前後ではS波270M/S、P波1500M/S程度である。尚

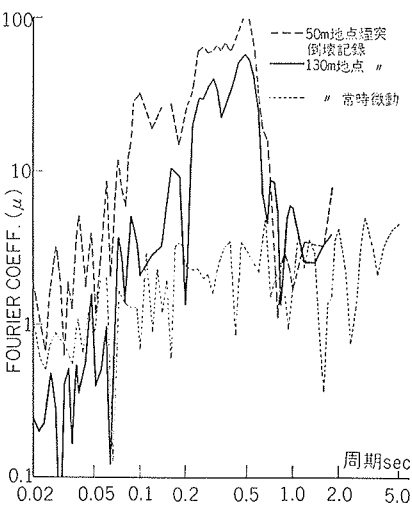


図-5.1 50M煙突倒壊時の地盤動特性(上下成分)

P波 1180M/S (●印), S波216M/S (■印), レーリー波 120M/S (▲印)であり、シルト層のかなり深い部分を反映した値であると推察される。

次に50M煙突倒壊時の測定と常時微動波形の

周期特性をフーリエ・スペクトルと比較すると図-5-1, 2のごとくである。煙突倒壊によって引き起こされる地盤振動の周期域は上下、水平成分ともに0.1~0.5秒の範囲において著しく、振源に近い程短周期部分が優勢となる。シ

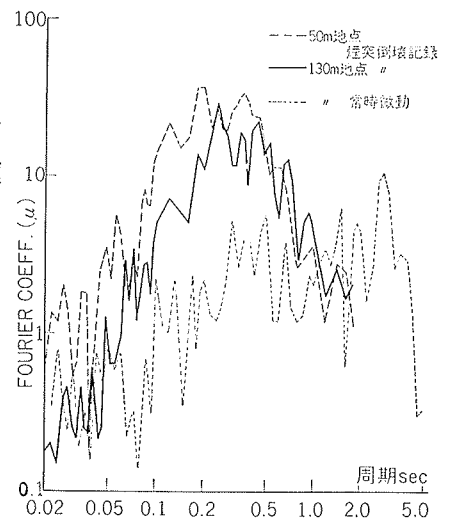


図-5.2 50M煙突倒壊時の地盤動特性(水平成分)

ルト層の地盤固有周期は上記のS波速度より推定して少なくとも0.7秒以上であることと、前述の周期域を合せ考えると、煙突倒壊によって引き起こされた地盤の振動域は下部層には達していないと考えられる。

6. 地盤減衰

以上の結果当敷地の地盤構造の様子が判った。次に測定された波形(図-4.1)及び倒壊様子を検討しながら地表面上の地盤減衰について述べる。

6.1. 50M煙突直下の加速度

23M煙突のガラの下GL-1.0m地点に埋め込んだ加速度計の測定値を表-6.1に示す。50M煙突の場合は直下に加速度計を埋め込まなかった

煙突先端	加速度×980cm/sec ²
上下成分	5.0~6.0
水平成分	4.0~5.0
振動数	11.0~12.5Hz

が図-6.1の23M煙突の場合と比較して、加速度の推定を行なった。この結果約10倍すなわち約50Gの加速度が生じたであろうと推定する。

6.2. 波動伝播

煙突倒壊時に発生する波動は地表面上に与えられた衝撃力による地盤振動に基くものであ

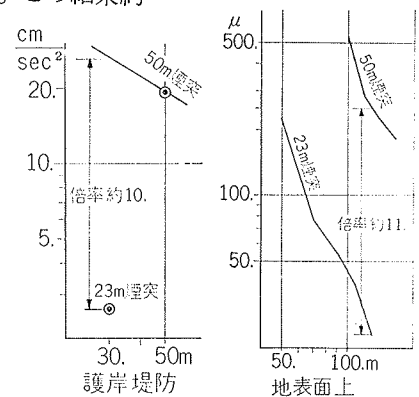


図-6.1 測定値比較

る。観測した波動はP波、SV波、レーリー波であっ

た。そこで今回、公害の見地から1)振源附近で大きな振巾をもつP波、2)振源から離れた地点で発達するレーリー波との2つの波動に注目した。

6.3. P波の地盤減衰

振源附近ではP波振巾が卓越する。粗密波のP波は球面状に伝播する。伝播過程のエネルギー減少要因は1)拡散によるものと2)媒質通過中に生じるエネルギーロスとである。拡散によるものは幾可学的に減少する。故に任意距離Xの振巾Yの式はエネルギーロスの項を考慮して(1)式で示す。

$$y = y_0 \cdot e^{-\alpha x} / (x/x_0) \tag{1}$$

ここでαはP波が単位距離通過する間に生じるエネルギーロス量を示す係数である。またαは表-6.2に示される実測例がある¹⁾。今回の測定値から計算するとα≒0.055m⁻¹であった。

土	吸収係数・m ⁻¹
水分を含んだ良質な砂	0.100
氷状の水分を含んだ良質な砂	0.060
泥炭と有機的シルトの薄層のある水分を含んだ砂	0.040
シルトとわずかな砂を含んだ水分を十分含んだ粘土	0.040~0.120

表-6.2 土の波動エネルギー吸収係数

6.4. レーリー波の地盤減衰

レーリー波は表面波で媒質表面上を伝播する。深さ方向の伝播は急激に減少する性質をもっている。エネルギー減少の要因は平面状の拡散とエネルギーロスとが主である。エネルギーロスは観測されたレーリー波の特性すなわち1)周期成分は遠距離になるほど長周期に変化する。(0.28秒→0.5秒) 0.5秒はフーリエ解析の結果卓越周期であった。さらにまた2)波形互の走時を画くとレーリー波伝播速度V_Rも多少変化している。これらを検討すると周期変動とV_R変動とを波形互に波長入に換算して一波長当りの波形減衰を決める方向にもっていくことが可能である。(図-6.2)

故に、任意距離xの振巾yの式は一定距離x₀の最大振幅y₀を基準にして次式で示した。

$$y = y_0 e^{-hwt} / \sqrt{x/x_0} \sqrt{1-h^2} = y_0 e^{-h(x-x_0)/\lambda} / \sqrt{x/x_0} \sqrt{1-h^2} \tag{2}$$

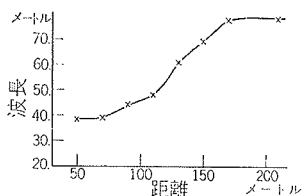


図-6.2 レーリー波が最大振幅を示すときの波長 (2)式の振幅y₀の単位を速度とすると、変位y振巾は(4)式で示される。

但しλ = V_R/w (3)
 h : 対数減衰率 (実測値h=0.24)
 w : 波形の振動数 (Hz)
 t : 所用時間

$$y = y_0 e^{-h(x-x_0)/\lambda} / 2\pi w \sqrt{x/x_0} \sqrt{1-h^2} \tag{4}$$

6.5. 距離と振巾との計算結果

6.5.1. P波 以上の計算式から50M煙突倒壊時の距離振巾を計算した。但し50M煙突倒壊時の直下 (GL-1.0m) の加速度を振源から水平距離1.0mの加速度とする。この加速度は約50G (50×980cm/sec²)である。

実測振動数(9.0 Hz)から速度は866.95cm/secである。この速度を基準にP波の計算結果を図-6.3 (実線)に示す。測定値は○印で示し走時との関係を点線で示す。

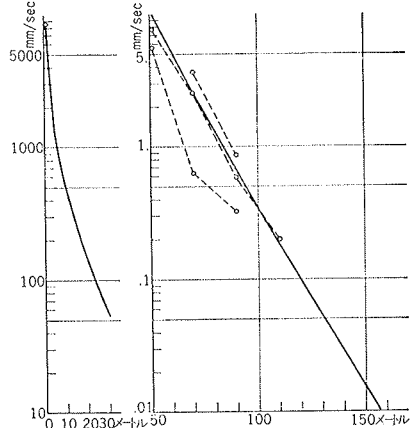


図-6.3 P波の距離振巾

6.5.2. レーリー波 図-6.4 はレーリー波実測振巾の振巾減衰を示したものである。図中R点はレーリー波の最大振幅を示す。●印■印はP波SV波でR点を含めて先のオービットの結果とよく一致する。

そこでレーリー波の基準振幅をR点 (距離50m, 速度振巾5.146mm/sec)

にしてR点を通る走時 (図-4.1)の振巾を(2)式, (4)式から計算して図-6.5に速度振巾と変位振巾を測定値と共に示した。

次に各測点におけるレーリー波の最大振幅のみに注目すると、最大振巾を示す時期はかならずしも上記のように一走時上についでない。そこで図-6.2に示されるように波長が距離と共に増加することを考慮して(2)式の計算を行なうと一致する傾向が見られた。この結果を図-6.6に示した。以上の結果、振源から距離が増加すると波長の伸びを考慮しなければならないことが判った。

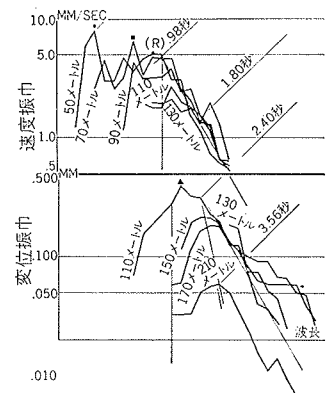


図-6.4 レーリー波振巾減衰

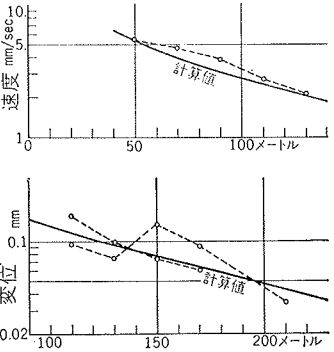


図-6.5 レーリー波走時上の距離減衰

また図-6.6にP波の最大振幅も図示した。P波とレーリー波の最大振幅曲線が交叉する距離は約60mであることが判った。

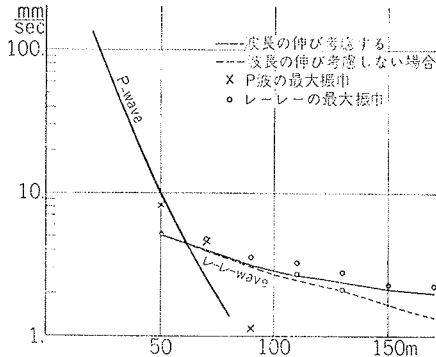


図-6.6 波動の地盤減衰

煙突種類 (m)	落下速度 (vm/sec)	煙突のエネルギー (Ek·kgcm)	地盤係数 (kg/cm³)	地盤振動エネルギー (Ep·kgcm)
23	17.34	2.790×10 ⁹	3.66	7.699×10 ⁷
50	25.56	7.914×10 ¹¹	1.35	1.667×10 ⁹

表-7.1 煙突のエネルギー計算

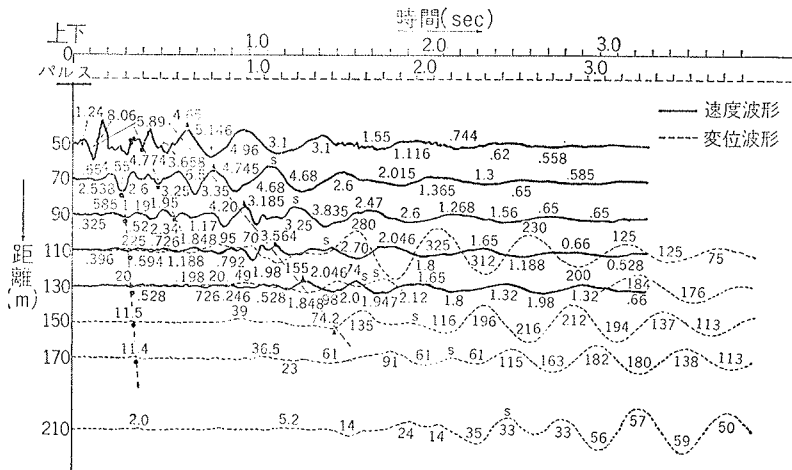


図-4.1 50M煙突の測定波形（上下成分）

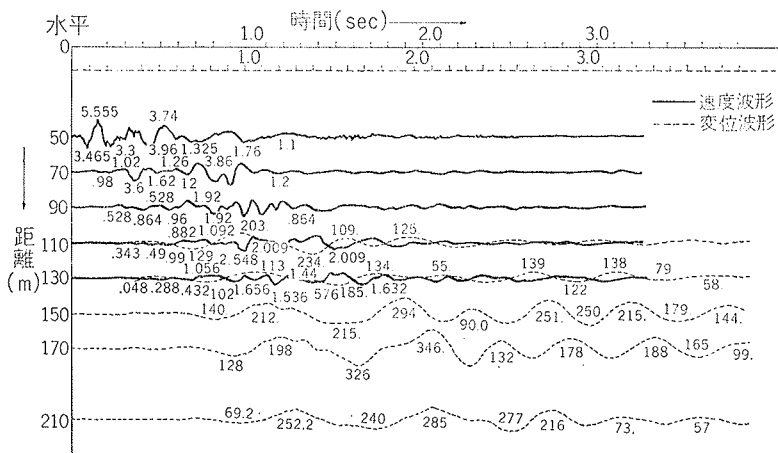


図-4.2 50M煙突の測定波形（水平成分）

7. 煙突落下エネルギーが地盤振動に及ぼしたエネルギー伝達比(J)

最後に今までの数値を用いて煙突が落下するときの運動エネルギー (EK) と倒壊後の地盤振動エネルギー (EP) との伝率 (伝達比 J) を 23M煙突と 50M煙突について計算した。計算式を以下に示す。

$$E_K = (1/2) (2W/3g) \cdot v^2$$

$$E_P = (1/2) kA (\delta/\omega^2)^2$$

$$J = E_K/E_P$$

但し W: 煙突重量 $v^2 = 2g (2/3) H$

$$A = 2r (2/3) H \quad a^2 = A'/\pi$$

A': 地盤係数(k) 算定用面積

$$k = k_V/A' = 4a\rho V_S^2/(1-\sigma)A'$$

尚 S波伝播速度 $V_S = 100m/sec$, 土の密度 $\rho = 1.5$, ポアソン比 $\sigma = 0.456$ である。エネルギー量 (E_K, E_P) の計算結果は表-7.1に示す。故に伝達比(J)は50M煙突の場合が $J = 36.4$ で、23M煙突の場合が $J = 207.4$ である。

50M煙突の J が小さい最大の理由は、23M煙突が山積みされたガラスの真上(図-2.1参照)に落下したのに反してガラスのクッション効果が全くなかった事に起因する。

8. 結び

- 1) 振源の加速度は伝達比 J により推定される。
- 2) 距離振幅の推定に当っては地盤構造を十分把握しなければならない。
- 3) 距離振幅はしばしば“距離の2乗に逆比例する”と言われるが、この方法では実振動を過少評価する。

謝辞

距離振幅の傾向を把握する時に研究室内島口職員(各種距離振巾の実測例)の協力を得ました。

参考文献

- 1) 嶋・大田, 都市各所における S波の測定結果・震研報(第1報) VOL44, 1966. (第2報) VOL47, 1969.
- 2) DYNAMICS OF BASES AND FOUNDATION, BAL KAN.