

石油タンク施設地盤の周波数選択特性について

伏 見 英*
川 田 孝*

1. ま え が き

東京都の地震に関する地域危険度測定調査によると、東京湾沿いの地盤には、地域的にN値の小さい軟弱地盤があると報告されている。

危険物施設の耐震安全性を検討する方策としては、ボーリングによる地質調査、地盤を質点系モデル、連続体モデルに置換して地震地動を推定する方法、あるいは常時微動、地震動計測による方法等がある。

東京湾隣接地区に設置されている危険物大規模貯蔵タンク地盤に関しては、当庁危険物課においてボーリングによる地盤調査研究が行われているが、当研究室では、今回、常時微動計測による地盤のフィルター特性に関して基礎的な研究を実施したので報告する。

2. 計測に関する諸項目

(1) 計測項目

微動水平加速度成分(WE, NS)

(2) 計測施設及び計測日時

ア 大田区羽田 2-10-1

三愛石油

7月19日 0時17分—2時15分

イ 品川区東品川 5-6-2

東京電力

7月25日 23時09分—0時38分

ウ 江東区塩浜 2-7-5

東京液体化成センター

10月22日 0時03分—1時30分

エ 品川区東品川 2-3-14

東京油槽

10月25日 0時45分—2時15分

(3) 計測地点

ア 地中—30m

イ 地表面

ウ 石油タンク頂部

(4) 解析項目

ア パワースペクトラム

イ 周期頻度曲線

(5) 計測機器の構成

ア 感震器

圧電素子型(チタン酸ジルコン鉛)

加速度検出

感度 5 PKV / PKG

直線性 0.3Hz以上

周波数帯域 0.3-100Hz

固有振動数 130Hz

イ 増幅器

増幅度 70db

平坦特性 1Hz以上±1db

微分特性 30Hz未満—6db/oct

積分特性 1Hz以上—12db/oct

ウ 記録計

TEAC-R211

エ 解析器

12キロワードリアルタイム解析装置

ゼロクロス周期分析装置

XYリコーダー

3. 解析方法

(1) パワースペクトル

テープに記録された信号をオシロスコープで再生すると、図1に示すように、不規則波である。この波形を定常ランダム波と仮定して解析する。解析の目的とするところは、この定常ランダム波を調和分析して、周波数選択特性を得ようとするものである。

定常ランダム過程における時間関数を $x(t)$ とすれ

* 第二研究室

ば、

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots(1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} dt \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。ここで、 $X(j\omega)$ を $x(t)$ のフーリエ順変換、 $x(t)$ を $X(j\omega)$ のフーリエ逆変換とよんでいる。また、 $X(j\omega)$ は ω の連続関数で、フーリエスペクトルを与える。

次に、 $x(t)$ の時間平均は、

$$\overline{x(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt$$

$$\overline{x(t)^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x(t)^2 dt$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{|X(j\omega)|^2}{T} \dots\dots\dots(3)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega \dots\dots\dots(4)$$

$S_x(\omega)$ は、 $x(t)$ のパワースペクトルとよばれるもので、フーリエスペクトル $X(j\omega)$ の絶対値の2乗関数である。

したがって、信号 $x(t)$ のパワーの周波数成分の構成は $S_x(\omega)$ をみればよいことになり、パワースペクトルのピークに相当する振動数を読めば、周波数選択特性が得られる。したがって、この任意のテープ信号を、12kWリアルタイム解析器(1kW=1024 points, 測定間隔・0.02秒)により、2分間、演算し、パワースペクトルを得る。

(2) 周期頻度曲線

1時間の微動記録の中から任意の2分間をとり、その時間内の全ての波形について、零線を切る相隣の点の間の時間を読みとる。その時間を2倍したものを、その波の周期とする。すなわち、ある範囲の周期 ΔT_i

内の各周期の波数を集計して、周期 T_i の波数とし、各 ΔT_i に属する波数の周期別分布のことを、周期-1頻度曲線という。図1の下段に示すように、任意の2分間について、零クロス周期分析を行い、XYレコーダーには縦軸に波数(n)、横軸に周期(T)とした周期頻度曲線を得る。

4. 解析結果

解析結果を第1表、第2表に、解析図の一部を、図2、図3に示した。パワースペクトルに関しては、縦軸を $[L]^2$ 、横軸を $[sec]^{-1}$ とし、周期頻度曲線に関しては、縦軸を頻度(n)、横軸を(sec)とした。

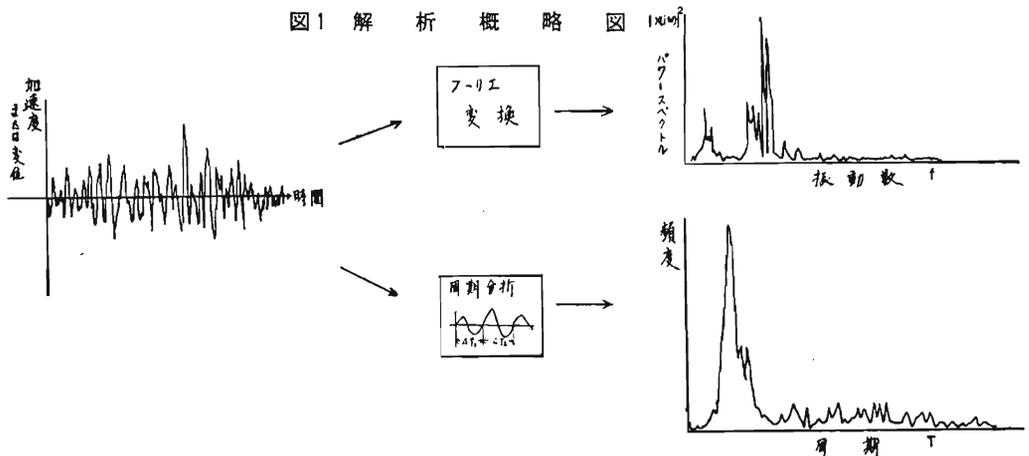
第1表 最大応答変位を与える周期(秒)

施設名		三愛石油	東電	液体化成品	東京油槽
測点	方向			センター	
地下 -30m	WE	0.92	1.5	1.35	1.6
	NS	1.05	1.4	1.23	1.7
地表面	WE	0.45	0.35	1.5	1.5
	NS	0.56	—	1.3	1.5
頂 点	WE	0.2	0.2	—	0.3
	NS	—	0.2	0.35	—

第2表 周期頻度曲線からの卓越周期(秒)

施設名		三愛石油	東電	液体化成品	東京油槽
測点	方向			センター	
地下 -30m	WE	—	—	—	—
	NS	—	—	—	—
地表面	WE	0.53	0.35	0.35	0.3
	NS	0.53	0.32	0.35	0.3
頂 点	WE	0.15	0.16	0.16	0.06
	NS	0.16	0.19	0.06	0.05

図1 解析概略図



第1表、第2表の解析結果から、これらの施設の地盤は、周波数選択度（フィルター特性）を有していると考えられる。短周期成分は、周期頻度曲線にみられるが、パワースペクトルには1秒以上のピークがみられる。また、地中の周期頻度曲線には、周波数選択度がみられない。

(1) 三愛石油のボーリング箇所は、1000KLフローティングルーフタンクで、直径12m、高さ9mである。

東京都の調査報告では、この地域(石油施設を含む)の予想危険度は、震度Ⅲ、地表最大加速度272—295gal 液状化現象3である。

石油タンク頂部に、0.2秒以下の高振動成分に周波数選択特性みられるが、これはシエル自体の固有周期的振動成分と考えられる。

この1000KL浮屋根型タンクがスロッシングを誘発する1次共振周期は3.6秒である。

(2) 東京電力のボーリング箇所は、9842KLコーンルーフタンクで、直径30m高さ13.6mである。

この地域の予想危険度は、震度Ⅲ、地表最大加速度372gal、液状化現象3である。

地中のパワースペクトルに、1.5秒のピークがみられる。

この9842KLコーンルーフタンクの、1次共振周期は5.8秒である。

(3) 東京液体化成品センターのボーリング箇所は200KLコーンルーフタンクで、直径6m、高さ7.9mである。この地域の予想危険度は、震度Ⅲ、地表最大加速度357gal、液状化現象1である。

パワースペクトルから、1.5秒にピークがみられる。

この200KLコーンルーフタンクの、1次共振周期は2.6秒である。

(4) 東京油槽のボーリング箇所は300KLコーンルーフタンクで、直径8m、高さ6mである。この地域の予想危険度は、震度Ⅲ、地表最大加速度383gal、液状化現象3である。

地表面のパワースペクトルから、1.5秒にピークがみられる。

図2 パワースペクトル

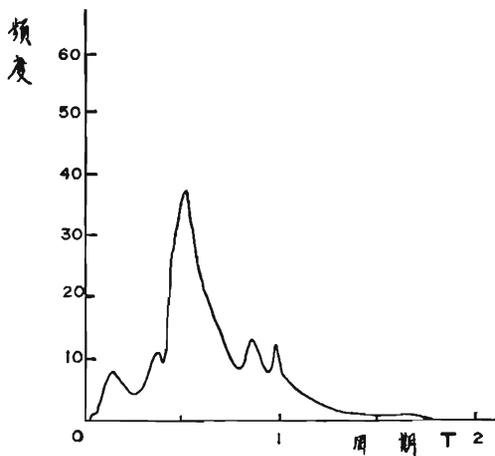
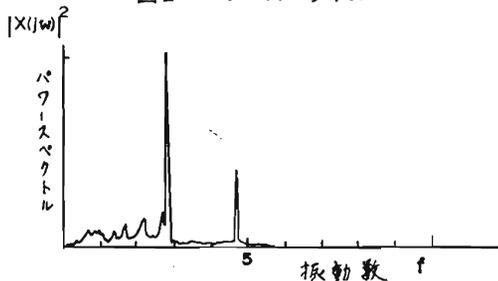


図3 周期—頻度曲線

この300KLコーンルーフタンクの、1次共振周期は3秒である。

5. 考 察

微動波形解析結果から、石油施設地盤の周波数選択度（フィルター特性）に関する基礎データを得た。

4施設の地表面の周期頻度曲線からは、1秒以下の周期成分が卓越する傾向がある。また、パワースペクトルからは1秒以上の周期成分がみられるが、スロッシングに関しては、4施設ともに、1次共振周期から、はずれている結果を得た。2次共振以下の高次の共振周期については一致するものもあるが、コーンルーフタンク内の自由表面のスロッシング、あるいは、フローティングルーフタンクのルーフのロッキングを誘発する1次共振周期は、微動のパワースペクトル、周期頻度曲線にみられなかった。

しかしながら、これは一つの計測手法による結果であり、計測法上の問題、例えば、振動源の影響、測定時刻、季節、地中深度、あるいは計測システムの解析結果に対する影響等を考慮しなければならないが、特に、センサーの応答倍率（直線性）とか、微動波形を加速度、速度、変位のいずれで測定するかによっても、前述したことが懸念される。

したがって、地震地動の推定に関しては、文献等により補足して、一般的な考察を試みた。

一般に、常時微動と地震地動に関する金井博士の学説によれば

(1) 常時微動の周期頻度曲線に一つの山ができる地盤上の地震動は、その山にあたる周期の波が卓越する。

(2) 常時微動の周期頻度曲線に二つ以上の山ができる地盤上の地震動は、その中の一つの山にあたる周期の波が卓越する場合と、二つ以上の波が卓越する場合がある。

(3) 常時微動の周期頻度曲線に鋭い山ができず、短周期から、1秒以上の広範囲にわたる分布をしている地盤上の地震動は、常時微動の場合と同様な場合と、ある周期の波が特に卓越する場合がある。後者は、地盤の性質というよりは、もとの地震動の性質がそのまま現れたと考えるのが自然である。

(4) 常時微動の周期頻度曲線から求めた各地盤特有の振動性状が、地震動によく現れる事実は、そのまま強震動にもあてはまる等として要約している。

解析結果から、地中の周期頻度曲線に周波数選択特性がみられないことは、(3)で説明される。また、短周期の卓越成分は、周期頻度曲線にみられるが、1秒以上のものはパワースペクトルに現れており、これは解析装置の普及によって、フーリエスペクトル、パワースペクトルによる解析例も文献等によく見られる。

近年、建造物が大型化するにともない、小規模地震に現れにくい、地震地動の長周期成分が問題になってきたが、強、烈震時に、しばしば長周期成分が現れることから、長周期微動と地震動に関する研究が注目される。長周期微動は、一般的に脈動といわれるが、これは気象火山作用、波等による地、地中の不明の原因による振動と考えられている。

大森博士の研究によれば、遠地地震を観測した結果では、10秒以下の卓越周期成分として、4秒、8秒のものを見出し、これが近地地震にも現れるとしている。これが定常的成分であるとすれば、1,000KL、40,000KLクラスの浮屋根タンクは、スロッシング防止対策を考慮する必要もあるが、金井・笠原・松本等も、地震規模(M)と地動の最大変位を与える周期(Tg)の間に、一定の関係式を見出し、金井博士は4秒—20秒の卓越周期を与えている。

危険物施設の震害は、地震動の短周期成分、長周期

成分の両方で考慮される必要があるが、微動と地震動の多点観測によって、地域的特性を考慮した危険物施設の地震地動の推定が明確化されよう。

6. 参考文献

- (1) 東京都：地震に関する地域危険度測定調査報告 (1975)
- (2) 松本：マグニチュードと卓越周期の関係、震研彙報, 38, 13 (1960)
- (3) K. Kanai: Bull. Earthq. Res. Inst., 38, 13 (1960)
- (4) K. Kanai: Bull. Earthq. Res. Inst., 43, 195 (1965)
- (5) 中島：常時微動の解析法、建研年報 758—757 (1972)
- (6) 村田：常時微動の解析法、建研年報, 758—766 (1972)
- (7) 小坪, 鳥野：常時微動測定による建造物の振動性状解析, 土木学会論文222, 25—36(1974)
- (8) 金井, 山辺, 川村常時微動の性質と震害への関係, 日大生産工学報告, 4, 1 (1971)
- (9) 山原, 広瀬, 伊藤：地盤の振動性状を考慮した地震時の地動の推定, 清水建設研報15 (1970)
- (10) 山原：地盤の周波数特性と建物の地震被害, 清水建設研報, 14, 53—60 (1967)
- (11) 森岡：1923年関東大地震の地動, 建築学会講演 (1976)
- (12) 鏡味：やや長周期微動による深い地盤特性の把握と強震記録の解釈 (1976)
- (13) 山本鎮男：軟弱地盤と基礎構造物の地震応答,
- (14) 梅村：地震と建築物, 高圧力3, 1 (1965)
- (15) 大崎：地震時における地盤内部の歪, 建研
- (16) 金井：地震工学
- (17) 中村：地震学
- (18) 金井, 小堀, 蛭田, 建築学大系, 11 (1974)