

(115) 仮想南関東地震による震源直上でのスロッシング波高の推定

日本鋼管(株) 正員 岡本 隆
 京都大学 正員 山田 善一
 京都大学 正員 野田 茂

1. はじめに

液体貯槽において、スロッシング挙動の解明は、設計・保全上の重要課題の一つである。高圧ガス設備等耐震設計基準の運用に関する通達においては、時刻歴地震応答解析を行う場合の第2設計地震動(スロッシングに関する設計地震動)の一つとして、断層モデルを用いた人工地震波をあげている。

本研究では、この人工地震波によるスロッシング応答解析の試みとして、1923年の関東大地震(M=7.9)が再び同一場所で発生するものと想定し、震源直上地点でのやや長周期(2.5~20sec)の地震動を推定し、大型貯槽のスロッシング挙動を求める。

2. 地震波の推定方法 ~DWF E法~

本研究では、理論地震動を計算するにあたり、Olson¹⁾が提案した離散型波数有限要素法(Discrete Wavenumber Finite Element Method、略してDWF E法)を応用することにより、水平多層地盤におけるGreen関数を解析的に求めることを基礎としている。この方法は、水平方向にFourier-Bessel級数展開により変数分離された波動方程式を、鉛直方向には有限要素法を、時間に関しては差分法を適用して数值的に解く方法である。このDWF E法は、一定振動数以下の実体波(P波・S波)と表面波(Love波・Rayleigh波)を含む波動を求めることができ、震源近傍での波形を計算するのに適している。また、波線理論や波数積分法に比べて、計算時間をあまり要しないことが特長である。なお、方法論の詳細・有用性については、文献1)~3)等を参照されたい。

3. 想定南関東地震による地震動の推定

(1) 断層モデルと地盤構造

関東大地震の断層モデルは、安藤^{4),5)}、金森⁶⁾らによって提案されているが、本研究では、松浦⁷⁾が測地学的データからinversion法によって求めた断層モデルを用いた。本研究で用いた断層パラメータの値を表1に、断層面の位置を図1に示した。また、震央は、図1に+印で示した34.41°N, 139.22°Eの位置にあり、深さは13.5kmである。地盤構造は爆破探査により求められた結果⁸⁾をもとに作成し、震源域から観測点まで一様な平行層を仮定した。表2にその地盤構造の諸定数を示す。

表1 断層パラメーター

Dislocation	D	4.8 m
Dip-Angle	δ	25° NE
Slip-Angle	λ	140°
Fault Width	W	54 km
Fault Length	L	95 km
Depth to upper fault margin	d	1.9 km
Strike direction	ϕ	N66° W
Seismic Moment	M_0	8.4×10^{27} dyne-cm
Rapture Velocity	V_s	2.0 km/sec
Rise Time	τ	5.0 sec

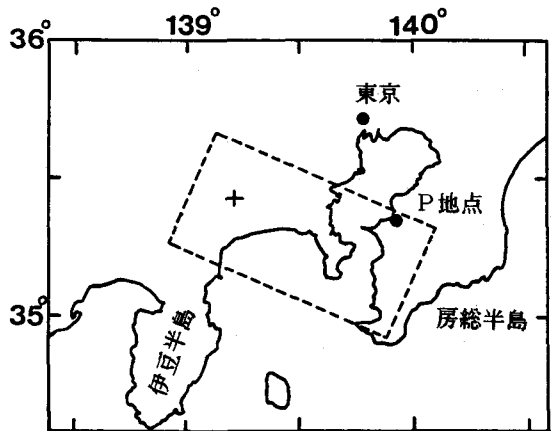


図1 断層面の位置と震央

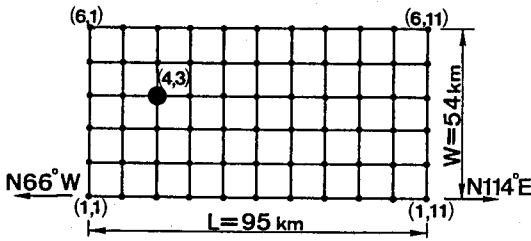


図2 断層面の分割

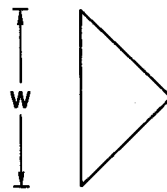


図3 深さ方向の地震モーメント分布

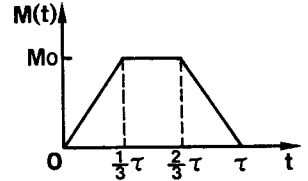


図4 震源の食い違い速度関数

(2) DWFE法

ここでは、断層面を図2に示すように、長さ方向に10等分、幅方向に5等分し、11×6個の点震源の集合体を仮定した。本研究では、図2の(4,3)の点震源を破壊開始点とし、放射状に進行する移動震源モデルを考えて地震波を推定した。

DWFE法により、Green関数を計算する際、2.5 sec~20 secの周期成分を考慮し、時間ステップは $\Delta t = 0.15$ secとした。また、地震波は300 secまで計算した。断層面上の各点震源での地震モーメントは、深さ方向には図3に示すように三角形分布を、断層長手方向には一様分布を仮定した。ライズタイム τ および破壊伝播速度 V_r は断層上各点震源において同一とした。震源の食い違い速度の関数としては図4に示す関数を仮定した。

なお、得られた各合成波形には、永久変位を除去するために、チェビシェフ型のフィルターによる補正⁹⁾を行った。

(3) 東京での地震動の推定

推定地震動の妥当性を検討するため、東京での地震動を推定し、東京・本郷で得られた実地震波との比較を行った。図5に本研究で推定した東京での地震波(SW-N E成分)を示す。また、図6は、森岡¹⁰⁾により再現された実地震波である。本研究で推定した地震動では、高い周波数成分が含まれていないため、加速度においては、一致はみられないが、速度、変位の最大値においては良い一致を示す。また、図7には、推定した地震動の最大変位の生じる方向(N78°E)の水平成分の変位波形を示した。

(4) P地点での地震動の推定

図8にP地点の推定地震動の水平成分の変位と加速度波形を示す。P地点は、図1にその位置を示した。図8に示す地震波は、最大変位の生じる方向の波形である。P地点においては、N128°Wの方向で最

表2 地盤構造の諸定数

深さ (km)	単位体積重量 (t/m ³)	S波速度 (m/sec)	P波速度 (m/sec)
0 ~ 1.3	2.0	680	1800
1.3 ~ 2.3	2.3	1500	2700
2.3 ~ 6.0	2.7	3000	5500
6.0 ~ 20.0	2.8	3400	6200

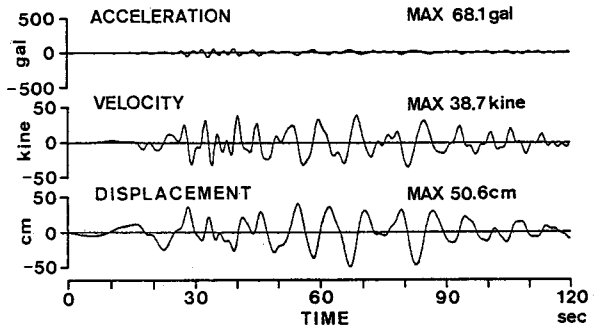


図5 東京での推定地震動 (SW-N E成分)

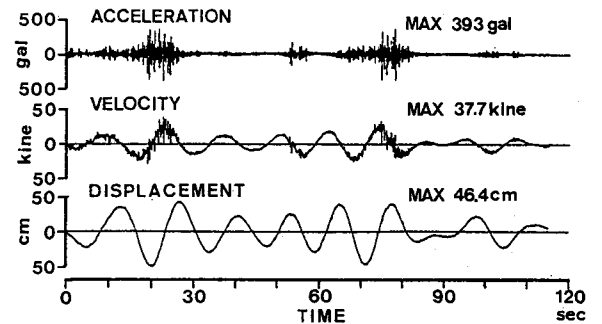


図6 東京での観測記録

大変位が生じている。P地点における最大変位は、約70cm、最大加速度は、約130galである。

(5) 速度応答スペクトル

各地点の変位が最大になる方向の地震波に対する速度応答スペクトルSvを図9に示す。減衰定数は、 $h=0.5\%$ とした。東京に於ける最大Sv値は、約380kine、震源直上のP地点の最大Sv値は約590kineである。

東京での実地震波の速度応答スペクトルのピークが周期1.2sec前後にあるのに対して、本解析で求めた地震波では、ピークは約8~9secに存在する。また、P地点に於いては、四つの大きなピークが存在し、周期によりSv値は大きく変化する。

4. スロッシング応答解析

(1) 解析手法・解析対象貯槽

スロッシングの応答波高は、軸対称線形ポテンシャル理論¹¹⁾により求めた。この時、モードは、10次まで重ね合せ、減衰定数は0.5%とした。解析対象は、4万~10万KLの5種類の貯槽とした。貯槽諸元およびスロッシングの固有周期は、表3に示した。入力地震波は、図7および図8に示す各地点の変位が最大になる方向の地震波である。

(2) 解析結果

表4に各地点の各貯槽に対するスロッシング最大波高と、その最大波高の生じた時刻を()に示した。表中の三波共振は、振幅60cmの共振正弦波を三波入力した時の波高である(減衰定数は0.5%)。図10には、貯槽側壁における波高の時刻歴応答の一部を、図11には、波面モードの一部を示した。

図10(a)と(b)の波形は、貯槽1の各地点の応答波高であり、同一貯槽においても波高の発達過程が異なる事が読みとれる。P地点では、一次モードで徐々に発達し、約100秒後に最大波高となり、その後時間と共に減衰する。それに対し、東京においては、一度発達して小さくなり、また発達する過程をたどる。図10の(b)と(c)の波形から、同一地点(P地点)の貯槽諸元の影響による発達過程の違いが読みとれる。貯槽3においては、一次モードに高次モードの波がのって発達する。図11には、この発達状態を示した。

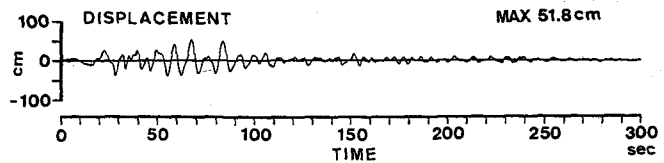


図7 東京での推定地震動(最大変位の生じる方向)

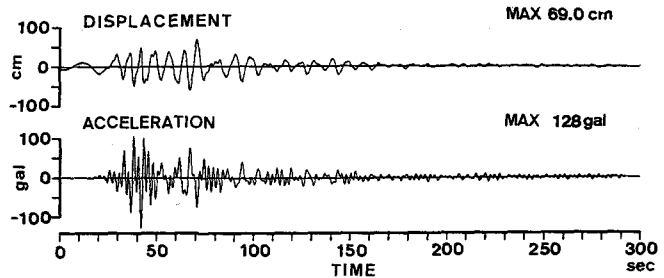


図8 P地点での推定地震動(最大変位の生じる方向)

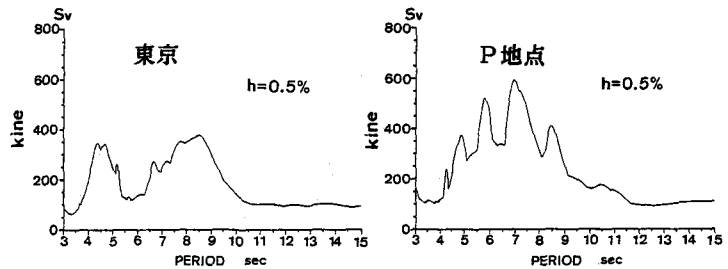


図9 速度応答スペクトル

表3 貯槽の諸元とスロッシングの固有周期

	直径 D(m)	液深 H(m)	固有周期T(sec)	
			1次	2次
貯槽1	42.0	28.9	6.8	4.0
貯槽2	51.5	24.0	7.8	4.4
貯槽3	62.0	21.5	8.9	4.8
貯槽4	62.0	18.3	9.2	4.8
貯槽5	76.0	22.0	10.3	5.4

表4 最大波高とその出現時刻

	東京	P地点	三波共振
貯槽1	4.1 (63)	9.4 (99)	8.2
貯槽2	6.0(107)	6.6 (74)	7.8
貯槽3	6.2 (91)	5.3(119)	8.9
貯槽4	4.7 (79)	3.5(120)	6.6
貯槽5	2.3 (70)	3.4(102)	6.5

m (sec)

5. まとめ

人工地震波によるスロッシング応答解析の一つの試みとして、松浦らが提案した南関東地震の断層モデルにDWF E法を適用して、震源直上地点でのやや長周期の地震波を推定し、さらに4万~10万KLの貯槽にこれら地震波を入力して、スロッシング挙動を求めた。推定地震動の妥当性の検討のため、東京における観測地震波と比較した結果、変位・速度の最大値においては、良い一致をみた。震源直上のP地点(千葉)における推定地震動の水平最大変位は、約70cmである。スロッシングの応答解析の結果、貯槽の諸元により発生波高は異なるが、東京で2.3~6.2m、震源直上のP地点(千葉)では3.4~9.4mのスロッシング最大波高の発生が予測された。

本研究では、DWF E法を用いて震源直上地点でのやや長周期の地震波が推定可能な事を示した。今後は、断層パラメータが地震波に及ぼす影響などを明らかにし、地震波の推定精度を高めたい。

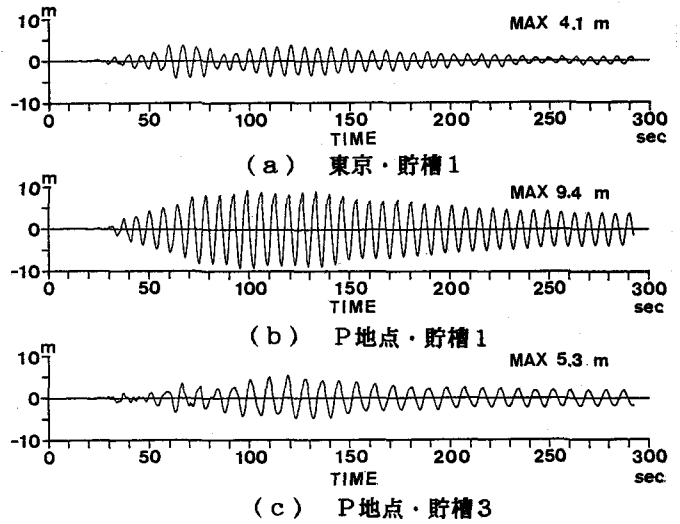


図10 スロッシング応答解析結果

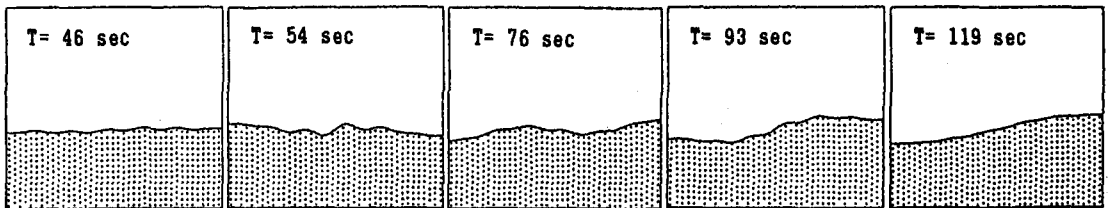


図11 スロッシング波の発達状態 (P地点・貯槽3)

[参考文献]

- 1) Olson, A.H., Orcutt, J.A. and Frazier, G.A.: The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 77, pp. 421~460, 1984.
- 2) 山田善一・野田茂: 離散型波数有限要素法を用いた地震動のシミュレーション, 自然災害科学, Vol. 5, No. 2, pp. 35~60, 1986.
- 3) Imagawa, K., Mikami, N. and Mikumo, T.: Analytical and semi-empirical synthesis of near-field seismic waveforms for investigating the rupture mechanism of major earthquakes, J. Phys. Earth, Vol. 32, pp. 317~338, 1984.
- 4) Ando, M., A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 49, 19~32, 1971.
- 5) Ando, M., Seismo-tectonics of the 1923 Kanto earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 22, pp. 263~277, 1974.
- 6) Kanawori, H., Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 49, pp. 13~18, 1971.
- 7) Matsu'ura, M. et al.: Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 Kanto earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 28, pp. 119~143, 1980.
- 8) 嶋悦三ほか: 東京の基盤構造 その3 第4回、第5回夢の島爆破実験による地下深部探査, 地震研究所彙報, Vol. 53, pp. 305~318, 1978.
- 9) 斎藤正徳: 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探査, 第31巻, 第4号, pp. 112~135, 1978年8月.
- 10) Morioka, T.: The ground motion of the Great Kwanto earthquake of 1923, Trans. of A. I. J., No. 289, March, pp. 79~91, 1980.
- 11) 曾我部深, 柴田碧: 円筒液体貯槽の液面動揺の応答第1報-基礎式と正弦波解-生産研究, 第26巻, 第3号, pp. 119~122, 1974年3月