海底変位の計算方法が津波評価に与える影響～3次元海底地殻変動解析～

The Effect Generated by Calculation Method of the Sea Bottom Displacement on Tsunami Estimation - Three-dimensional Sea Bottom Crustal Movement Analysis -

土屋 悟¹・佐藤嘉則¹・松山昌史²・田中良仁³

Satoru TSUCHIYA, Yoshinori SATOU, Masafumi MATSUYAMA and Yoshihito TANAKA

The sea bottom displacement is computed by seismic ground motion analysis and the effect generated by ground displacement on tsunami estimation is examined, taking into account the time history of sea bottom displacement and Three-dimensional ground configuration. It is shown that the difference of final sea bottom displacement is up to 15% and the effect on maximum tsunami wave height is up to 20% when the heterogeneous ground configuration is considered. The effect of the time history of sea bottom displacement on maximum tsunami height remains in up to 10%.

1. はじめに

津波解析における断層運動による海底変位の取り扱い方法はMansinha・Smylie (1971) やOkada (1985) による鉛直地盤変位を海底変位として与える方法が一般的である。これらの方法は地盤構造を均質地盤として扱うことになる。また、算定される地盤変位は永久変位のみであり、図-1左側のように鉛直地盤変位を瞬時または線形で海底変位を与えることになり、地震による海底変位の経時変化を考慮することができない。

本研究では、図-1右側に示す地震動解析を用いた方法によって海底変位を計算し、地盤の地下構造の違いが海底変位に与える影響について検討した。また、海底変位の経時変化や3次元不均質地盤構造を考慮した場合の地盤変位が津波評価に与える影響について検討した。

2. 3次元海底地殻変動解析

図-1右側の計算手法の一つとして、3次元有限差分法による地震動解析ツールである（独）防災科学技術研究所のGMS（Ground Motion Simulator）がある。GMSでは、3次元不均質地盤構造を考慮した地震動解析や地盤変位の経時変化が算定可能とされている。そこで、本研究では試行的にGMSを用いて海底地殻変動解析を実施し、地盤の地下構造の違いが海底変位に与える影響について検討した。

（1）波源モデル

対象地震は1923年関東地震とし、波源モデルは表-1に示す津波再現モデルである相田（1993）モデルとした。断層面は計732の点震源（2.5km間隔で配置）で表現し、破壊開始点は35.3°N, 139.1°E, 深さ11.7km（理科年表

（2008））、破壊伝播速度は3.0km/s、震源時間関数はTriangle型、各点震源の破壊時間は4秒と設定した。

（2）地下構造モデル

本研究では、一様物性モデル、水平成層モデル、3次元地下構造モデルの3種類の地下構造モデルを作成した。一様物性モデルの物性値について、 ρ は中央防災会議（2002）、 Q 値はSatoら（1999）より設定、 V_s は剛性率 $\mu=4.00 \times 10^{10}$ N/m²として $\mu=\rho V_s^2$ より設定、 V_p は $V_p=\sqrt{3}V_s$ より設定した。また、水平成層モデルの物性値はSatoら（1999）を参考に設定、3次元地下構造モデルの物性値は地表面から3層の境界面深度分布データは、鈴木（2002）と山田・山中（2003）を合成して作成、これより下層はSatoら（1999）を参考に設定した。各地下構造モデルの物性値を表-2～表-4に示す。

（3）計算条件

解析領域は図-2に示す東西240km、南北240kmの範囲とし、深さは0～104kmとした。このうち、側方24km下方24kmは吸収境界としている。格子間隔は深さ0～

図-1 海底変位の与え方の相違

表-1 相田（1993）における断層パラメータ

断層	Strike [°]	Dip [°]	Rake [°]	すべり 量 [m]	断層 長さ [km]	断層幅 [km]	断層深さ範囲 [km]
A	301	25	151	5.44	60	55	5.0-28.2
B	301	25	153	12.00	25	45	10.0-29.0
N	170	80	65	5.00	10	7	2.0-8.9
S	170	80	65	5.00	10	7	1.0-7.9

1 工修 (株)ユニック
2 正会員 博(工) (一財)電力中央研究所地球工学研究所
3 正会員 工修 中部電力(株) 土木建築部

図-2 GMSの解析領域 (図中の○は点震源を表す)

44kmまで $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 400\text{m}$, これ以深は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1200\text{m}$, 計算時間間隔は0.02秒, 現象時間は地震発生後180秒までとした。

(4) 計算結果

図-3に着目地点位置とGMS計算結果から得られた最終鉛直変位量の比較を, 図-4に東京湾～相模湾沿岸の着目地点における最終鉛直変位量の比較を示す。最終鉛直変位量はMansinha・Smylie (1971)の方法と比較して波源から遠い下田地点を除いて最大で15%程度の違いであった。また, 手法及び場所の違いについて, 明確な傾向は見られなかった。

図-5には, 図-3の着目地点における各地下構造モデルの鉛直変位量の時系列変化を示す。変位の最大振幅は最終変位の2倍程度となる地域も現れ, さらに水平成層モデルや3次元地下構造モデルでは一様物性モデルに比べてピークでの振幅が増大している。着目地点Dの最大変位を比較すると, 3次元地下構造モデルは一様物性モデルの約1.5倍となっているが, 変位波形の周期は10秒弱であり, こうした変位による津波への影響はごく近傍の地域のみと思われる。なお, ここで発生する変位波形の周期は, 震源時間関数(各点震源の破壊時間)に大きく依存するものと考えられるため, 対象地震に応じて適切な設定を行う必要がある。

図-6には, 地震発生8～80秒後まで8秒毎の各地下構造モデルの鉛直変位量空間分布の時間変化を示す。いずれのモデルも地震発生直後から振幅3～5mの上昇側変位が相模湾沿岸を伝播していく様子が確認できる。この付近では, 3次元地下構造モデルによる結果が最も大きく, 5m程度の変位振幅が西から東へ伝播している。ただし, 前述の着目地点D点での変位波形に見られるように周期10秒弱であり, 影響は限定的なものと思われる。

3. 海底変位の経時変化を考慮した津波解析

各物性モデルによるGMS計算結果を用いて, 平面2次

表-2 一様物性モデルの物性値

Vp[m/s]	Vs[m/s]	$\rho[\text{kg/m}^3]$	Q値
6547	3780	2800	1000

表-3 水平成層モデルの物性値

層番号	Vp[m/s]	Vs[m/s]	$\rho[\text{kg/m}^3]$	Q値	備考
1	1800	600	1800	100	深さ0.0–0.2km
2	2300	1200	2000	150	深さ0.2–1.0km
3	2700	1300	2100	150	深さ1.0–1.8km
4	3300	1400	2300	150	深さ1.8–2.6km
5	4700	2720	2500	300	深さ2.6–3.0km
6	5700	3330	2600	500	深さ3.0–11.8km
7	6600	3710	2800	1000	深さ11.8–19.8km
8	6700	3740	2800	1000	深さ19.8–24.6km
9	7000	3930	3000	1000	深さ24.6–33.8km
10	7900	4440	3200	2000	33.8km以深一様

表-4 3次元地下構造モデルの物性値

層番号	Vp[m/s]	Vs[m/s]	$\rho[\text{kg/m}^3]$	Q値	備考
1	1800	600	1800	100	表層—第1堆積層境界
2	2060	840	1900	100	第1堆積層境界—第2堆積層境界
3	2767	1300	2300	150	第2堆積層境界—第3堆積層境界
4	5000	2817	2500	300	第3堆積層境界—深さ11.8km
5	6600	3710	2800	1000	水平成層 (深さ11.8–19.8km)
6	6700	3740	2800	1000	水平成層 (深さ19.8–24.6km)
7	7000	3930	3000	1000	水平成層 (深さ24.6–33.8km)
8	7900	4440	3200	2000	33.8km以深一様

図-3 GMS計算結果から得られた最終鉛直変位の比較 (着目地点A～I)

図-4 GMS計算結果から得られた最終鉛直変位の比較
(東京湾～相模湾沿岸の着目地点)

図-5 着目地点における鉛直変位量の時系列変化

元非線形長波方程式による津波解析を実施し、海底変位の経時変化が津波に与える影響や地盤の地下構造の違いが津波に与える影響について検討した。

(1) 海底変位の与え方

津波解析（平面2次元モデル）における海底変位の与え方は以下の通りである。

連続式：

$$\frac{\partial(\eta-\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 x, y ：水平座標、 t ：時間座標、 h ：静水面からの水位上昇量、 M, N ：線流量、 ζ ：海底の鉛直変位である。

式 (1) を離散化すると以下になる。

図-6 鉛直変位量空間分布の時間変化

$$\begin{aligned}
 \eta_{i,j}^{k+1} &= \eta_{i,j}^k + (\zeta^{k+1} - \zeta^k) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \\
 &= \eta_{i,j}^k + \Delta \zeta^{k+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) \\
 &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \quad \dots (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 k : 計算ステップ数である。

よって、海底変位の経時変化を考慮する場合はGMS計算結果より時々刻々の鉛直変位増分量 $\Delta\zeta$ を求め、これを与えることになる。

(2) 計算条件

解析領域は図-7に示す範囲とし、計算格子間隔は沖合1600m→800m→400m→200m→100mへ順次細分化、千葉県～愛知県沿岸は格子間隔50mの陸上遡上モデルとした。また、沖側の境界条件は吸収境界とした。計算時間間隔は0.5秒、現象時間は地震発生後6時間までとした。

(3) 計算ケース

津波解析は表-5に示すように、Mansinha・Smylie (1971) の方法で鉛直変位量を瞬時に与えたケース1、一様物性モデルによるGMS計算結果の最終鉛直変位量を瞬時に与えたケース2sおよび鉛直変位量の経時変化を用いたケース2d、水平成層モデルによるGMS計算結果の鉛直変位量の経時変化を用いたケース3d、3次元地下構造モデルによるGMS計算結果の鉛直変位量の経時変化を用いたケース4dの計5ケースについて実施した。

(4) 海底変位の経時変化が津波に与える影響

Mansinha・Smylie (1971) の方法を用いたケース1および一様物性モデルによるGMS計算結果を用いたケース2d、ケース2sの津波計算結果の比較を行い、海底変位の経時変化が津波の最大水位に与える影響について検討した。

図-8には、図-3の着目地点B～Dのケース1とケース2dの水位及びGMS計算結果による海底変位の時系列変化を示す。一見ケース2dの水位がケース1より大きく見えるが、地盤自体が上昇しているため、地震発生直後にケース1よりも極端に大きな津波が発生しているわけではない。また、いずれの着目地点においても、ケース2dの水位は、地震発生直後は地盤変動と対応しているが、地盤変動が収束するに従ってケース1と大差が見られなくなる。これは、変位の初期波形は図-5で示した通り10秒程度の周期であり津波へほとんど寄与せず、最終変位分布によって発生する長周期波が津波の主要成分を占めているためである。図-9のケース1とケース2dの水位空間分布の時間変化からも、海底が動いている地震発生後10秒の水位空間分布は異なっているものの、海底変位がほぼ収束する地震発生後2分および3分の水位空間分布はかなり類似していることが確認できる。図-10には、

図-7 津波解析領域と格子分割

表-5 津波計算ケース一覧

ケース名	海底変位 計算方法	物性	海底変位の 与え方
ケース1	Mansinha・Smylie	一様	瞬時
ケース2s	GMS	一様	最終変位を瞬時
ケース2d	GMS	一様	経時変化を考慮
ケース3d	GMS	水平成層	経時変化を考慮
ケース4d	GMS	3次元地下構造	経時変化を考慮

< 着目地点 B >

< 着目地点 C >

< 着目地点 D >

図-8 着目地点B～Dにおける水位・海底変位の時系列変化

東京湾～相模湾沿岸の着目地点における最大水位の比較を示す。ここで、地震継続時間中のケース2d、ケース3d、ケース4dの水位は計算水位－鉛直変位として最大水位を算定している。ケース2dの各地点の最大水位はケース1と比較して最大10%程度、ケース2sと比較しても最大10%程度（平均5%程度）の違いであった。

(5) 地盤の地下構造の違いが津波に与える影響

Mansinha・Smylie (1971) の方法を用いたケース1および3種類の地下構造モデルによるGMS計算結果を用いたケース2d、ケース3d、ケース4dの津波計算結果の比較を行い、地盤の地下構造の違いが津波に与える影響について検討した。

図-10より、3種類の地下構造モデルそれぞれの最大水位はケース1と比較して最大で15%程度（平均5%程度）、3種類の地下構造モデルで比較しても最大で20%程度（平均5%程度）の違いであった。また、図-4の東京湾～相模湾沿岸の着目地点における最終鉛直変位量分布と比

較すると、最終鉛直変位量の傾向と最大水位の傾向が地域的に概ね対応していることも確認できる。

4. まとめ

本研究では、3次元有限差分法による地震動解析ツールであるGMSにより、地盤の地下構造の違いが海底変位に与える影響について検討した。また、GMS計算結果を用いた津波解析を実施し、海底変位の経時変化が津波に与える影響および地盤の地下構造の違いが津波に与える影響について検討した。検討の結果、今回計算したケースより得られた結論は以下の通りである。

- (1) 地盤の地下構造の違いの影響について、海底の変位の波形および最大振幅には地下構造の違いによる明確な相違が確認できたが、海底の最終変位の違いは最大でも15%程度であった。また、地下構造の違いによる津波の最大水位に与える影響は最大20%程度（平均5%程度）であった。
- (2) 海底変位の経時変化が津波の最大水位に与える影響について、地震初期の水位は海底変位を追従するが、地盤変動収束後はMansinha・Smylie (1971) の方法と大差ないことが確認できた。また、最大水位は海底変位の経時変化の影響は小さく、その違いは最大10%程度（平均5%程度）であった。

謝辞：本研究における地震動解析ツールには、(独)防災科学技術研究所のGMSを使用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1993)：相模湾北部に起った歴史津波とその波源数値モデル, 地学雑誌, Vol.102, No.4 (926), pp. 427-436.
- 中央防災会議 (2002)：中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(第6回)資料1, 平成14年11月21日, pp. 1-8.
- 鈴木宏芳 (2002)：関東平野の地下地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 第63号, 19p.
- 山田伸之・山中浩明 (2003)：関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション, 地震2, 56, pp. 111-123.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971)：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp. 1433-1440.
- Okada Y. (1985)：Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, pp. 1135-1154.
- Sato T, Robert W. Graves and P. G. Somerville (1999)：Three-Dimensional Finite-Difference Simulations of Long-Period Strong Motions in the Tokyo Metropolitan Area during the 1990 Odawara Earthquake (Mj5.1) and the Great 1923 Kanto Earthquake (Ms 8.2) in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 3, pp. 579-607.

図-9 水位空間分布の時間変化

図-10 着目地点における最大水位上昇量の比較