断層領域の連動を考慮した津波解析とその課題

稲垣 聡¹・池谷 毅²・武村 雅之³

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)
E-mail:inagakis@kajima.com

²フェロー会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)
E-mail:t-ikeya@kajima.com

³正会員 名古屋大学 減災連携研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
E-mail:takemura.masayuki@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震・津波の発生を受けて、連動型の地震による津波の予測評価と、そのための津波波源の設定が課題となっている。連動型地震の津波解析における津波波源の設定のうち、断層のすべり量分布と断層間におけるすべり発生時間差の設定が対象地点の津波高に与える影響について、南海トラフ地震による東京湾内の津波高を例に検討した。すべりの時間差に関して、各断層のすべりが同時の場合と、各断層成分の津波最大値が重なる時間差ですべる場合では、後者の最大津波高が前者の2倍以上となり、時間差考慮の影響が大きいことがわかった。また、東京湾内の津波高が最大となるように求めたすべり量分布は、地震学の知見で求まる分布と大きく異なることがわかり、地震学を踏まえた適切な設定が重要となることがわかった。

Key Words : tsunami, numerical simulation, interrelated earthquakes, slip distribution, time lag of slip

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震・津波の発生を受けて、連動型の地震による津波の予測評価と、そのための津波波源の設定が課題となっている。本研究では、津波波源の設定のうち、断層のすべり量分布と断層間における地震発生時間差の設定が対象地点の津波高に与える影響について、我が国の経済活動の中心である東京湾を対象とし、南海トラフの連動型地震による津波を例に検討した。

本研究では、対象地点の津波高を求めるにあたり、断層のすべり量とすべり発生時間差をパラメータとするために、各断層が単独・単位すべり量で動いた際に生じる水位変動（以下、単位津波応答と呼ぶ）を津波伝播解析で求めたのち、すべり量とすべり発生時間差を考慮して足し合わせる手法をとる。まず、解析に用いた津波波源の設定と津波伝播解析の内容について述べる。次に、単位津波応答の特性から、東京湾に襲撃する津波の特性について考察する。さらに、地震発生の時間差が津波高に与える影響を検討したのち、すべり量分布・時間差をいくつかの考え方で設定し、東京湾内における最大津波高の変化について検討した。

図-1 南海トラフ地震の断層設定と解析領域

2. 津波波源設定と解析モデル

(1) 津波波源の設定

本研究では、図-1に示すように、N1～N10の計10枚の断層領域（以下、単に「断層」と呼ぶ）を設定した¹⁾。

各断層の断層パラメータを表-1に示す。断層N1～N5のパラメータについてはFurumura et al.(2011)の宝永地震モデル²⁾を用いる。N6～N10については、それぞれN1～N5に並行してその沖側でトラフ軸までの範囲に設置することから、N1～N5のパラメータを参考にして下記のように

表-1 断層パラメータ

断層番号	長さ L(km)	幅 W(km)	上縁深さ d(km)	走向 $\theta(^{\circ})$	傾斜角 $\delta(^{\circ})$	すべりの 方向 $\lambda(^{\circ})$	剛性率 $\mu(\times 10^{10}\text{N/m}^2)$	すべり量 U(m)
N1	120	50	6.4	193	20	71	5.0	※1
N2	205	100	4.1	246	10	113	5.0	※1
N3	155	100	7.8	251	12	113	5.0	※1
N4	135	120	10.1	250	8	113	5.0	※1
N5	70	80	10.0	250	8	118	5.0	※1
N6	120	10	3.6	193	20	71	3.5	※1
N7	205	12.5	2.9	246	13	113	3.5	※1
N8	155	10	4.5	251	24	113	3.5	※1
N9	135	30	5.8	250	11	113	3.5	※1
N10	70	52.5	5.5	250	6	118	3.5	※1

※1 すべり量は、後述の4・5で設定する

に設定した。

- ・断層長さ L 、走向 θ 、すべりの方向 λ は、南北に接する断層(N1とN6, N2とN7等)で同じとする。
- ・断層上縁深さ d は、上縁がトラフ軸（海底面）に達しているので0とする。
- ・傾斜角 δ は、南北に接する断層に接続し³⁾、トラフ軸で海底面に達する面と海底面のなす角とする。
- ・剛性率 μ は、土木学会⁴⁾のプレート境界浅部における推奨値である $3.5 \times 10^{10}(\text{N/m}^2)$ とする。
- ・すべり量 U は、後述のステップにて様々に設定する。
なお、すべり量が決まると、下記式(1),(2)の関係から地震モーメント M_0 およびモーメントマグニチュード M_w が求まる。

$$M_0 = \sum_{i=1}^{10} \mu_i \cdot U_i \cdot L_i \cdot W_i \quad (1)$$

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_0 - 9.1) \quad (2)$$

(2) 解析方法

解析方法は、前述のように、各断層領域が単独・単位すべり量で動いた際の津波水位変動（単位津波応答）を津波伝播解析で求めたのち、各断層のすべり量、断層間のすべり発生の時間差を考慮して足し合わせて対象地点の津波波形を計算した。

j 地点における断層 i による単位津波応答を $\eta_{ji}(t)$ とすれば、全10枚の断層の影響を重ね合わせた津波水位変動 $\eta_j(t)$ は式(3)で表される

$$\eta_j(t) = \sum_{i=1}^{10} \tilde{\eta}_{ji}(t) = \sum_{i=1}^{10} U_i \cdot \eta_{ji}(t - \tau_i) \quad (3)$$

ここに、 U_i : 断層 i のすべり量、 τ_i : 断層 i のすべりの時間差である。また $\tilde{\eta}_{ji}(t)$ を断層成分と呼ぶ。

津波伝播解析は、東北大学で開発された津波伝播解析プログラム「TUNAMI」に改良を加えたもの⁵⁾を用いた。解析の主な条件を表-2に示す。

なお、本検討では、支配方程式としては非線形長波理

表-2 解析条件

項目	内容
基礎方程式	非線形長波理論による運動方程式および連続式
差分法	Staggered Leap-Frog 法
計算時間刻み	差分の計算安定条件（CFL 条件）を満たすように設定
境界条件	陸地のみ完全反射条件
初期条件	Manshinha and Smylie ⁶⁾ の方法で断層モデルを用いて計算される海底地殻変動の鉛直成分を、海面上の水位変動として与える
計算領域	図-1 の領域 A・B・C をネスティング
計算格子間隔	領域 A : 1350m, 領域 B : 450m, 領域 C : 150m
水深	中央防災会議(2003)の公開データを使用

図-2 領域Cの範囲と水位モニター点

図-3 N1断層による単位津波の伝播状況

図-4 N1断層による単位津波の線流量ベクトルと水深

図-5 N1断層による各地点での単位津波応答

論を用いながら、非線形性が無視できる程度まで初期水位を小さくすることで、単位津波応答を計算した。そのため、単位津波応答計算時のすべり量を0.1mとした。

3. 東京湾に來襲する津波の特性

各断層からの津波伝播の特性から、東京湾に來襲する南海トラフ地震による津波の特性をまず考察する。図-3にN1断層による単位津波の35分おきの水位分布を示す。赤が水位上昇域、青が水位低下域を示す。時間は地震発生からの経過時間である。(a)35分に駿河湾の水位が低いときに相模湾の水位が高く、(b)70分では逆に駿河湾水位が高いとき相模湾水位は低くなっている。その後も35分おきに入れ替わるので、駿河湾と相模湾との間で約70分周期の水位の振動が起きる様子がわかる。この振動発生の様子を詳しく見るため、図-4に線流量ベクトルを水深

表-3 A1 地点の単位津波応答と他地点の

単位津波応答の相互相関係数の最大値

断層番号	A1&A2	A1&C1	A1&C2	A1&C3	A1&C4	A1&C5
N1	0.653	0.746	0.765	0.842	0.832	0.756
N2	0.363	0.497	0.654	0.614	0.376	0.535
N3	0.311	0.580	0.392	0.658	0.672	0.567
N4	0.574	0.672	0.651	0.841	0.880	0.737
N5	0.497	0.412	0.535	0.690	0.629	0.587
N6	0.101	0.206	0.194	0.189	0.136	0.210
N7	0.138	0.205	0.195	0.250	0.262	0.188
N8	0.354	0.379	0.359	0.527	0.587	0.320
N9	0.458	0.475	0.646	0.758	0.792	0.417
N10	0.258	0.395	0.479	0.566	0.508	0.519

分布に重ねたものを示す。(a)の52.5分(図-3の(a)と(b)の間の時刻)では、相模湾から伊豆半島沖をまわり駿河湾に向かう流れが生じている。(b)87.5分では逆に駿河湾から相模湾に流れ込んでいる。このように2つの湾の間で屈折しながら海水が行き来する様子がわかる。

また、図-5には、図-3のA1・A2地点および図-2のC1～C5地点(東京湾内)におけるN1断層の単位津波応答を示す。駿河湾・相模湾で起きた70分周期の変動は東京湾内に伝わり、湾内でも同じ周期の変動が卓越している。ちなみに、式(4)の湾の固有周期 T_m を求める式²⁾で、

$$T_m = \frac{4L}{(2m-1)\sqrt{gh}} \quad (4)$$

次数 $m=2$ 、湾長 $L=50\text{km}$ 、水深 $h=25\text{m}$ と置いた東京湾の2次モードの固有周期 T_2 が約70分であり、湾外の水位変化の周期と一致している。図-5においてC1とC5が同位相、C3がその逆位相となっており、東京湾内では湾の長手方向に2次モードの水位変化が起こる様子が見れる。これに近い周期の振動はN2以降の単位津波にも見られており、表-3に示したA1地点(駿河湾)と他地点との間の津波津波応答の相互相関係数の最大値は、多くの地点で高い値を示している。また、表-4に示す相互相関係数最大

表-4 相互相関係数が最大となるときの位相差(分)

断層番号	A1&A2	A1&C1	A1&C2	A1&C3	A1&C4	A1&C5
N1	31	51	71	79	90	110
N2	15	44	58	71	81	103
N3	18	41	63	70	79	103
N4	27	43	64	72	83	101
N5	23	43	65	71	78	109
N6	92	39	71	81	27	34
N7	105	40	62	69	83	96
N8	113	41	65	70	81	105
N9	31	40	68	74	80	104
N10	28	46	64	75	79	104

時の位相差は、C1～C5それぞれの地点において、N1～N10のいずれの断層による値も近くなっている。すなわち、東京湾内の各点における単位津波応答は、初期の立ち上がり時刻は異なるものの、周期特性は共通するものとなっている。

4. 断層のすべりの時間差の影響

すべりの発生時間差の影響として、東京湾で最大の津波高を与える時間差について考察する。図-6はN1～N5のすべり量としてFurumura et al.(2011)³⁾の宝永地震モデルの値(表-5)を設定した場合の、(a)各断層のすべりが同時に起こった場合と、(b)各断層成分の津波の最大値が重なる時間差ですべりが起こった場合の、C3地点における各断層成分および重ね合わせ波の時系列である。(a)の場合、断層からの距離により東京湾には津波が時間差を持って到達するので、打ち消し合う成分ができ津波高はあまり大きくならない。(b)の場合は各断層の津波の最大値が重なるので、重ね合わせ波の最大津波高は数学的に最も大きくなり、(a)の2倍以上に大きくなる。この

表-5 宝永地震モデルのすべり量²⁾

断層番号	すべり量 U(m)
N1	5.6
N2	7.0
N3	5.6
N4	9.2
N5	9.2

図-6 N1～N5断層がすべる場合のC3地点における津波の水位変化

ような時間差考慮の影響が大きいことがわかる。

5. すべり量・時間差の設定と津波高の評価

(1) すべり量とすべりの時間差の設定

全10断層の合計マグニチュードをMw9.0で一定とし、すべり量の制約条件を変えて、東京湾への影響が最大となる重ね合わせによる最大津波高の検討を行った。各断層のすべり量とすべり発生の時間差の条件を3通りに設定した。概要を表-6に示し、詳細を以下に記す。すべり量の上限や変動幅のみ規定して、時間差は4.で考察した最も厳しい場合として最大津波を求めたケース（ケース1・2）と、地震学の知見をもとにすべり量とすべりの順番・速度を設定した参考ケース（ケース3）である。

a) ケース1：すべり量の上限のみ考慮

各断層のすべり量の上限値を16mとする。この16mは、フィリピン海プレートの沈み込み速度4cmに宝永地震（1707年）から現在までのおよその長さ(400年)を掛けた値で、一つの目安の量である。このケースにおけるすべりの時間差の設定は、4.で検討したような、各断層成分の津波最大値が重なる場合とする。

b) ケース2：平均すべり量とすべり変動幅を考慮

地震モーメントの合計から計算されるマグニチュードがMw9.0となるような、全断層均一のすべり量（平均すべり量 $\bar{U}$ ）を考える。すなわち、下記の式(5),(6)を満たすすべり量 $\bar{U}$ を考える。

$$M_{0_total} = \bar{U} \cdot \sum_{i=1}^{10} \mu_i \cdot L_i \cdot W_i \quad (5)$$

表-6 各断層すべり量とすべり発生の時間差の条件

ケース	すべり量の設定	すべり発生の時間差	全体 Mw
1	各断層における上限値（16m）のみ設定	各断層成分の津波最大値が重なるとする	9.0
2	全断層が動くとして平均値と変動幅（平均値の50～150%）を設定	各断層成分の津波最大値が重なるとする	9.0
3	宝永地震・古村モデルを基本 N6～N10 は N1～N5 の倍とする	潮岬沖を起点に東西に断層破壊速度(2km/h)で進むとする（図-1）	9.0

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_{0_total} - 9.1) = \text{一定値}(9.0) \quad (6)$$

さらに「すべり量の振れ幅」も規定し、平均値+振れ幅の範囲ですべり量は起こるとする。振れ幅は、東北地方太平洋沖地震に対するインバージョン解析により求められた各断層のすべり量のばらつきの程度を参考に⁸⁾、平均すべり量の50～150%の範囲で設定した。結果、平均すべり量 $\bar{U}$ は9.7m、すべり量の範囲は4.8～14.6mとなった。また、このケースのすべりの時間差は、ケース1と同じ考え方とする。

c) ケース3：すべり量と時間差に地震学の知見を使用（参考ケースとして）

すべり量はFurumura et al.²⁾をもとに、N1～N5については表-5の値と同じとし、沖側N1～N6のすべり量は、隣り合う断層の2倍²⁾とした。これにより全体のMwは9.0と

図-7 東京湾内で津波高が最大となるすべり量の分布と図-2 各地点の最大津波高

なった。また、すべりの時間差については、潮岬沖を起点に東西に断層破壊が進む場合（図-1）を考え、断層破壊速度（2km/h）に相当する時間差を与えた。

(2) すべり量分布と最大津波高

上記までの条件で、図-2の東京湾内のC1～C5地点で津波高が最大となる各断層のすべり量の分布と、そのときの各地点の最大津波高（ケース3を基準とした比）を図-7に示す。

すべり量は、ケース1・2ともN1～N3にすべりが集中し、すなわち東京湾に近い大きな断層にすべりが集中する極端な組合せとなった。特に、ケース1ではN1～N4以外は全く動かない場合が最大となった。また、これらのケースの津波高は、参考ケースであるケース3の3～5倍大きくなった。

連動型地震による津波高は、すべり量の分布、すべりの発生時間差により大きく変動することがわかる。ケース1・ケース2ではすべり量と時間差を東京湾の水位変動が最大となるように設定したが、こうした断層の破壊の進行が起り得るかどうかについては、地震学上は疑問が残る。地震学の知見を有効に用いた設定が課題と言える。

6. まとめ

本研究では、連動型地震による津波解析における津波波源の設定のうち、断層のすべり量分布と断層間におけるすべり発生時間差の設定が対象地点の津波波高に与える影響について、東京湾における南海トラフ地震による津波を例に検討した。主な結論は以下の通りである。

- ・駿河湾と相模湾の間で見られる水位振動の周期が東京湾の2次モードの固有周期に近く、東京湾内の津波にその周期の変動が卓越する様子が見られた。

- ・すべりの発生時間差に関して、各断層のすべりが同時の場合と、各断層成分の津波最大値が重なるような時間差ですべる場合では、後者の最大津波高が前者の2倍以上となり、時間差考慮の影響が大きいことがわかった。
- ・断層のすべり量とすべりの時間差を設定する場合、地震学の知見を加えることが重要である。

謝辞：本研究で用いた津波伝播解析プログラムは、東北大学大学院今村文彦教授に提供頂いたものに改良を加えたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 古村孝志・前田拓人：東北地方太平洋沖地震から考える南海トラフ地震「4連動」シナリオ，日本地震学会秋季大会講演予稿集，p.36，2011.
- 2) T. Furumura, K. Imai, and T. Maeda : A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, J. of Geophysical Res., vol. 116, B02308, 17pp., 2011.
- 3) 安中正・稲垣和男・田中寛好・柳沢賢：津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴，土木学会地震工学論文集，vol.27，原稿番号307，2003.
- 4) 土木学会 原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，土木学会，p.2-7，2002.
- 5) 高橋俊彦・平山康典：津波伝播シミュレーション，鹿島技術研究所年報，第56号，pp.101-106，2008.
- 6) Mansinha, L. and D. E. Smylie : The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 7) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，p.31，1993.
- 8) Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan Earthquake, Earth Planets Space, vol. 63, pp. 815-820, 2011.

TSUNAMI SIMULATION CONSIDERING INTERRELATED EARTHQUAKES AND ITS REMAINING PROBLEM

Satoshi INAGAKI, Tsuyoshi IKEYA, and Masayuki TAKEMURA

The tsunami height in Tokyo Bay caused by the interrelated-type earthquake near the Nankai Trough was simulated to examine the influence of the slip distribution among faults and the slip generating time lag between faults. About the time lag of slips, the maximum tsunami height in case that the slips occur having the time lag which the tsunami maximum height by each fault overlaps becomes more than twice of the case that all of the slips occur simultaneously. Moreover, it turned out that slip distribution which makes the tsunami height mathematically maximum is widely different from with the distribution using the knowledge of seismology.