

海底地盤変動による水面応答特性に関する実験と 数値シミュレーション

松山 昌史*・池野 正明**・田中 寛好**

1. はじめに

津波の主な原因は地震による海底地盤の変動である。現在、地震に関する情報から海底地盤の変動を予測し、その海底地盤の変動を初期水位変動として与えて津波を計算することが一般的である。しかし、この方法を用いて初期条件を与えて計算した津波の遡上高が調査された実際の遡上高と合わないことがある。特に明治三陸地震津波や1992年ニカラグア地震のように地震の揺れが小さいが大きな津波が来襲するいわゆる津波地震と呼ばれるものはこの傾向が顕著である。また津波地震と言われるもの以外でも例えば日本海中部地震では、津波の再現に成功しているといわれる相田(1984)の数値計算において、地震エネルギーを2割程度大きめに見積もった初期条件を与えている。これは、断層パラメータや地盤変動の評価に誤差が含まれることも考えられるが、海底地盤変動をそのまま初期水位変動として与えることにもその一因があるのではないかと考えられる。

波源域の研究に関しては、高橋ら(1962)の平面水槽内に沈めたゴム膜に空気を送り込むことによって水面変動を起こした実験や Joseph (1973) の断面2次元水路の底部の一部を上昇させた実験がある。これらの実験は水底の一部が隆起側に変位するのみであり、隆起域と沈降域の混在する実際の地盤変動を模擬したものではない。また数値計算については Nakayama (1983) が境界要素法を用いて上記の Hammack (1973) の実験結果の再現を行い、妥当な結果を得ている。

本研究は水路において隆起域と沈降域が存在する海底地盤変動を模擬した基礎的な実験を行い、海底地盤の変位速度を変化させた場合の水面変動の応答を調べた。また、強非線形ポテンシャルモデルを用いて境界要素法による数値計算を行い、実験結果と比較すると共に、変位速度、変位及び水深を変化させて水面変動の応答特性を調べた。

2. 実験装置

実験は長さ20m、幅0.3m、高さ0.55mの水路で行い、縮尺は1/10000を想定した。図-1に示すように、水路の中央部分に長さ3m、幅0.3mの鋼製の板(以下、可動板とする)を沈め、その中心を水底からある高さにあるヒンジに接続して可動とした。その端部を鋼製の棒でエアースリンダーに接続し、そこにコンプレッサーによって圧力を急激にかけることにより、板を変位させて水面変動を発生させた。図-2にシステムの概要を示す。板の変位するスピードはエアースリンダーに送り込む空気圧を2~8.8 kgf/cm²まで電磁弁で調節することによって変えることができる。その時の水面変動を波高計(最大14チャンネル)を用いて測定する。また、エアースリンダー内の圧力変化とエアースリンダーの動きも測定した。なお、装置の起動及びデータの取り込みはPCによって制御されている。

圧力を2 kg/cm²、4 kgf/cm²、8 kgf/cm²と変化させ、それぞれのシリンダーの動きを図-3に示す。このように、起動後に若干のラグタイムがあるが、圧力が大きくなるにつれて変位速度が速くなる。図中に示した変位速度 V (cm/s) は立ち上がり部分の勾配(図-3の0.7 s~

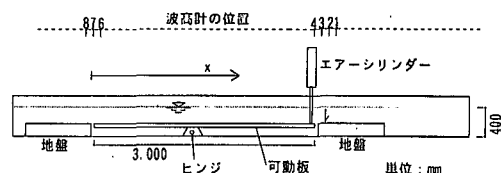


図-1 実験装置の概要

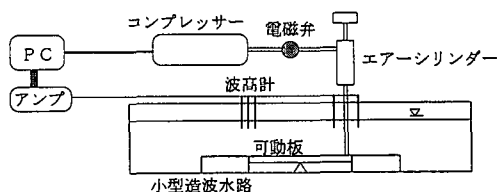


図-2 実験システム

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

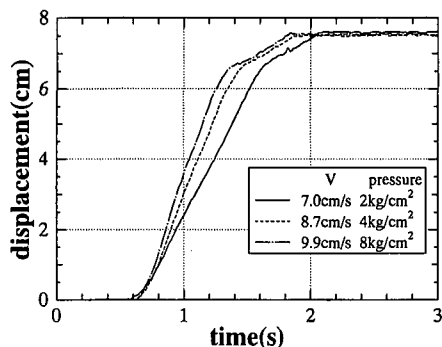


図-3 圧力を変化させた場合の可動板端部の変位

1.3 s) の変位速度を示しており、圧力を変化させることにより 7 cm/s～10 cm/s 程度の範囲で制御することができる。今回の実験では板の端部の変位（以下、ストロークとする）は実験装置都合上、約 7.6 cm と水深の約 1/4 であり、実際の地盤の変動に比べて水深に対する地盤の変位が大きい（津波を発生させるような地盤変動でも 1/100 以下）。

これは縮尺が 1/10000 と小さいため、実現象よりも地盤変位を強調した実験を行ったからである。

3. 実験結果

図-4 に圧力 4 kgf/cm² における板の左端付近の水位変動（隆起）と可動板端部の変位を示す。なお、 x 軸は図-1 に示すように可動板の左端を 0 として、右方向を正とする。可動板の変位開始とともに水面が上昇し始め、初期変位速度が保持されている間水面上昇は続くが、変位速度が遅くなると水面はほとんどそれ以上上昇しなくなり、やがて可動板は上昇していても水面は下降するという現象が生じるが、こうした現象は海水面変位が海底地盤の変位のみならず、変位加速度にも影響を受けることが示唆される。本実験では水面変動が最大となるのは $x=20$ cm の地点である。これは可動板左端部の変位ベクトルの方向に水面の最大盛り上がりが生じたためである。図-5 に同じ条件で変位した板の右端付近の水位変動（沈降）と可動板端部の変位を示す。板の下降と共に最初は少し水面が上昇し、その後に水面低下が起こる。最初に少し水面が上昇するのは、可動板端部の止水のために設けた板と地盤の間のゴム板が、可動板の起動する瞬間に反動のために上向きにたわむ影響が水面に伝わるためであり、実験装置の都合上で生じた現象である。この場合も可動板初期変位速度が保持されている間は水面下降は続くが、変位速度が遅くなると水面はほとんどそれ以上下降しなくなり、やがて板は下降していても水面は上昇に転ずるという現象がみられる。また、水面変動が最大となるのは端部から外側に 20 cm 出たところで

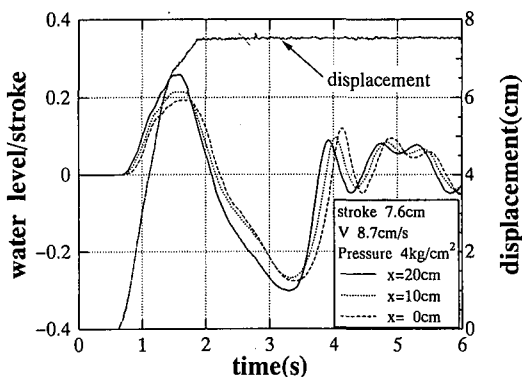


図-4 可動板端部の変位とその左端付近の水位変動

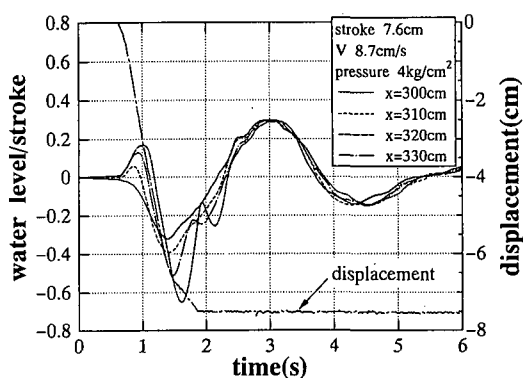


図-5 可動板端部の変位とその右端付近の水位変動

ある。これも可動板右端部の変位ベクトルの方向に水面の最大低下が生じたためである。

図-6 に起動時の圧力を 2 kgf/cm², 4 kgf/cm², 8 kgf/cm² と変化させることによって可動板の速度を変化させた場合の $x=20$ cm における水位変動を示す。8 kgf/cm² の圧力のケースが最も地盤の変位速度は大きく 10 cm/s となり、この地点では地盤の変位の 27 % 程度の水面上昇となっている。また、圧力 2 kgf/cm² のケースでは地盤変位速度は 7.0 cm/s となるが、海面変位応答は 22 % 程度である。本実験結果より津波波源での初期水位分布が海底地盤変位分布と等しいとする従来の仮定に問題があると結論づけるのは早すぎると考えるが、可動板の変位に比べて最大水面変位は小さいという実験結果を得た。また、生じた水面変動の周期は 3 秒強である。可動板の長さを半波長、発生した水面変動の波速が長波の波速として近似できると考えて周期を算定すると 3.3 秒程度となり、直接測定された値と矛盾ないことがわかる。本水面変動周期を原型換算すると 5 分程度となり現実の近地性津波の周期と大きな相違はない。

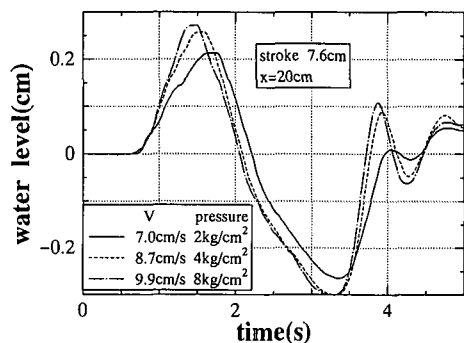


図-6 圧力の違いによる水位変動の比較 (x=20 cm, stroke 7.6 cm)

4. 数値シミュレーション

(1) 数値計算法

図-7に示すような2次元波動場において、その水底の一部が動き、それによって水面変動が発生する場合を考える。流体が非粘性、非圧縮で非回転現象と仮定した場合、速度ポテンシャル $\phi(x, y, t)$ は以下の Laplace 方程式を満たす。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega) \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) に Green 関数 G を用いると、境界 S 上の任意点 P での速度ポテンシャル ϕ は Green の公式により以下の境界積分方程式によって与えられる。

$$\alpha \cdot \phi + \int_S \left\{ \phi \frac{\partial G}{\partial n} - \phi_n G \right\} dS = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$G = \ln \frac{1}{r}, \quad \phi_n = \frac{\partial \phi}{\partial n} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 α は任意の境界点の内角、 n, s はそれぞれ境界面での法線方向及び接線方向であり、 r は要素間の距離である。式 (2) の境界積分方程式を解くためには、境界条件を与える必要がある。固定境界 S_v と可動板境界 S_p での速度ポテンシャルは以下のように与えられる。

$$\phi_n = 0 \quad (\text{on } S_v) \dots\dots\dots (4)$$

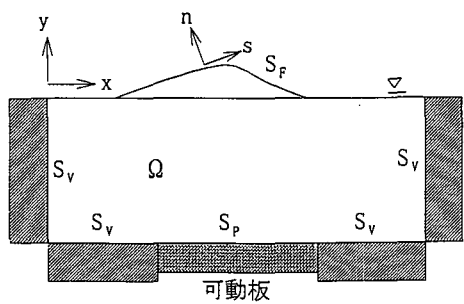


図-7 計算領域の模式図

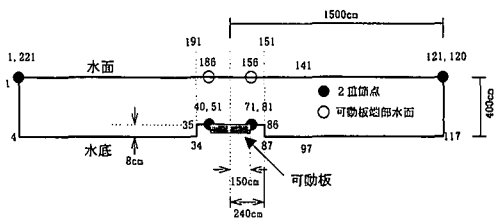


図-8 要素点の定義

$$\phi_n = \vec{U} \quad (\text{on } S_p) \dots\dots\dots (5)$$

$\vec{U}$ は可動板の変位速度であり、可動板表面の水粒子の速度 ϕ_n と等しいと仮定する。実験では板が動くために水底の境界が変化するが、計算でも境界点を移動させて、各点上に変位速度を与えた。自由水面の境界条件については節点と要素長さを時間ステップ毎に更新する Euler-Lagrange 手法(中村ら, 1991)を用いる。この方法では、時刻 $t + \Delta t$ 秒後の自由水面上の速度ポテンシャル ϕ と水粒子座標を2次のオーダーの Taylor 展開で近似し、1次と2次の微分係数を自由表面の力学的境界条件、速度場と加速度場の計算結果から算出する。計算領域は端部の影響を小さくするために、長さ 30 m と長めに設定した。初期水面変位は水路中央付近で発生するので、図-8に示すように境界要素の定義点を断層付近は要素長さを 10 cm から 18 cm と細かく、それ以外の境界では最大 50 cm と粗く設定し、現象を再現可能な分解能を持ちつつ効率的に計算できるように、全部で 221 個に分割した。図中の数字は要素番号を示す。時間刻みは 0.0001 秒を基準として、さらに地盤変位と変位速度を設定し、境界条件として与えた。

(2) 計算結果と実験結果の比較

図-9, 図-10 に変位速度 7 kgf/cm² (圧力 2 kgf/m²) と変位速度 10 kgf/cm² (圧力 8 kgf/m²) のケースについて実験結果と計算結果を比較した。隆起側の左端の $x=0$ cm では、第一波の最大水位上昇量はどちらのケースでもほぼ一致するが、その時間がどちらも実験結果のものがほんの少し遅い。沈降側の右端 ($x=300$ cm) では、第一波の最大水位低下量については実験結果の方が若干大きくなっているが、ピークになる時間については実験結果と計算結果はほぼ一致している。各点の2波目の波についてはどのケースについても実験での水位変動量の方が大きく、位相が遅れている。結論的に言えば、海底地盤隆起域及び沈降域ともに最初の水面変動に関しては、実験と計算結果がほぼ一致することが確認された。

(3) 数値計算によるパラメータスタディ

(a) 可動板の変位速度を変えたケース

数値計算において可動板変位を実験とほぼ同じ 7.5 cm とし、その変位速度を 15 cm/s, 30 cm/s, 45 cm/s, 60 cm/s

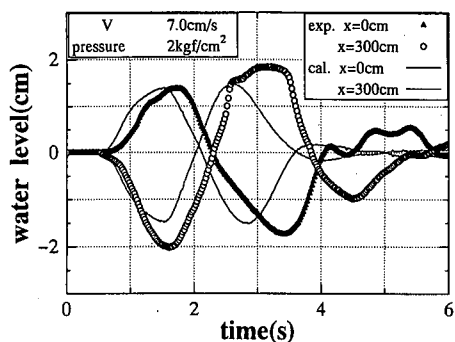


図-9 可動板端部での水位変動に関する実験と計算の比較
(圧力 2 kg/cm^2 , 水深 32 cm)

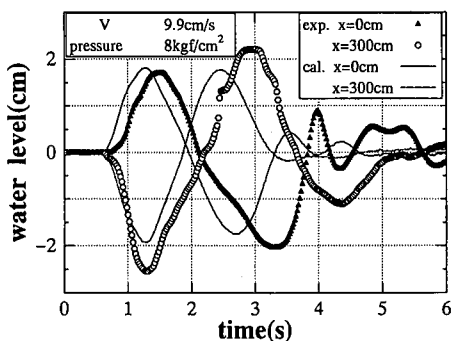


図-10 可動板端部での水位変動に関する実験と計算の比較
(圧力 8 kg/cm^2 , 水深 32 cm)

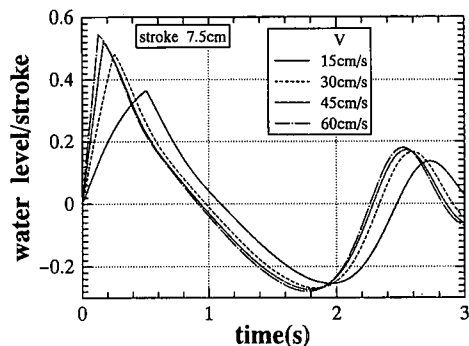


図-11 可動板変位速度の違いによる水位変動の時系列 (数値計算, $x=10 \text{ cm}$ 地点, 水深 32 cm)

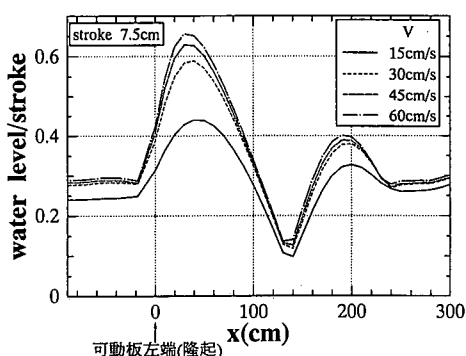


図-12 可動板付近の最大水位分布 (数値計算, ストローク 7.5 cm , 水深 32 cm)

sと変化させて計算した。 $x=10 \text{ cm}$ での水位変動を図-11に、可動板付近の最大水位分布を図-12に示す。どちらも縦軸は可動板端部変位で無次元化した。図-12からは、可動板の変位速度が大きい程水位上昇が大きくなり、変位速度 60 cm/s では、可動板端部変位の約 65% 近くの最大水位上昇となるのが見受けられる。また、 15 cm/s から 30 cm/s の間でかなり水位上昇の応答効率が上がっている。数値計算では可動板の変位速度を上げることで、かなり水位上昇が大きくなる。しかし、可動板変位速度がある値以上になると、水面の応答効率はさほど変わらなくなることも明らかになっている。

(b) 可動板変位の小さいケース

可動板端部変位を 1 cm と小さくし、水深に対する地盤の変位量が約 $1/30$ となる条件で計算を行った。可動板端部の変位速度を 3.5 cm/s から 120 cm/s まで変化した場合の各速度での最大水位分布を図-13に示す。最大水位上昇は、 7.5 cm のケースと同様に変位が速くなるほど大きくなるが、 60 cm/s と 120 cm/s ではその差は小さく、速度がある値以上になると頭打ちになるようである。この時に、最大水位上昇は可動板端部変位の約 8 割となり、可動板変位の大きい図-12のケースに比べて水

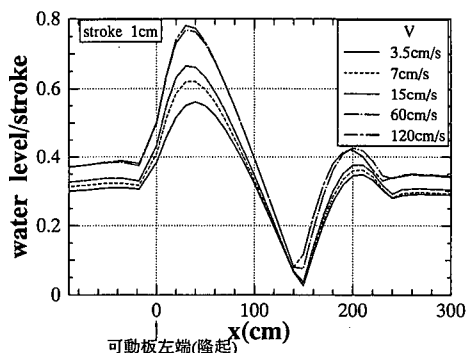
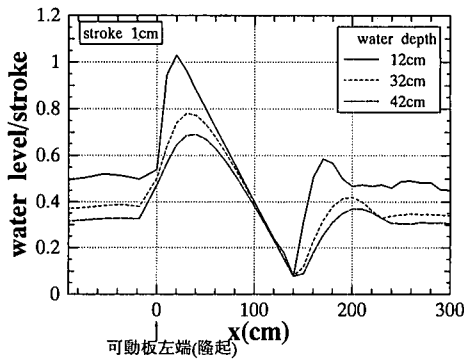


図-13 可動板変位速度の違いによる最大水位分布 (ストローク 1.0 cm , 水深 32 cm)

面応答効率は大きくなる。

(c) 水深を変化させたケース

可動板端部の変位速度を 120 cm/s 、変位量を 1.0 cm とし、可動板上部の水深を 42 cm , 32 cm , 12 cm と変化した場合の最大水位の分布を図-14に示す。これより、水深が浅い方が最大水位が大きく、そのピーク位置は可動板の端部に近づくことがわかる。また、水深 12 cm



図—14 水深が異なるケースでの最大水位分布の比較 (数値計算, ストローク 1.0 cm)

では可動板端部変位より大きな水面変位となっている。

5. おわりに

海底地盤変動による水面の応答特性を把握する実験を行うとともに、実験条件よりも広範囲なパラメータサーベイにより水面応答特性をより詳細に検討するために、強非線形ポテンシャルモデルに基づく境界要素法による数値解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

① 本研究での実験及び数値解析の範囲では、地盤の変位速度が大きくなるほど水面変位が大きい。しかも、水面変位は海底地盤の変位よりほとんどのケースで小さい。従って、津波地震、つまり地震が小さくとも大きな津波が来襲する現象に対する明解な説明には、さらに検討を進める必要があることがわかった。

② 境界要素法による数値シミュレーションを行ったところ、押し波初動、引波初動の場合とも第一波につい

ては実験結果とよく一致することがわかった。

その他、数値シミュレーションにおけるパラメータサーベイから、以下のことが明らかになった。

③ 海底地盤変位が小さいほど、地盤変位に対する水位応答効率は大くなる。

④ 同じ速度で地盤変動が起きる場合には、その地点の水深が小さいほど地盤変位に対する水面の応答効率は大きくなる。

今後は、地盤変動速度を高速化して実験を行うとともに、地盤変動の加速度、さらには、津波を起こすような地震は水深が数 1000 m の地点で起こるため、海水の圧縮性の効果等についても検討を行う必要があると考えられる。

最後に本実験の実施等については(株)土木技術開発の関根満氏及び(株)CRSの千代大介氏の協力を得た。また、数値シミュレーションについては(株)理工ソフトウェアサービスの有留義晃氏に協力していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 相田 勇 (1984): 1983 年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 東京大学地震研究所彙報, 第 56 号, pp. 713-730.
- 高橋竜太郎, 羽鳥徳太郎 (1962): 梶円波源からの津波発生実験, 東京大学地震研究所彙報, 第 40 号, pp. 873-883.
- Hammack J. L. (1973): A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth, J. Fluid Mech., Vol. 60, part 4, pp. 769-799.
- Nakayama T. (1983): Boundary Element Analysis of Non-linear Water Wave Problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, pp. 953-970.
- 中村孝明, 田中良弘 (1991): 吹き出し分布法による非線形波動場の発生と開境界処理, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 11-15.