

海底地盤変動による水面応答とその伝播に関する実験的研究

松 山 昌 史*・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と全く同じ水面変動が起こるものと想定して初期水位条件を設定し、津波を計算するのが一般的である。しかし、この方法で初期条件を設定し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。これは、断層パラメータや地盤変動量の評価に問題があることも考えられるが、海底地盤変動と同一の初期水位変動を与えることも沿岸部での津波の予測値と実測値とが大きく異なる一因があるのではないかと考えられる。

海底地盤の変動に対する海面応答に関する実験的研究には、発生及び伝播について平面水槽を用いて実験を行った高橋ら(1962)のもの、断面二次元水路の底部の一部を瞬間的に上昇・沈下させた実験を行った Hammack (1973) のものがある。いずれの実験も海底地盤の隆起もしくは沈降どちらか一方のみを再現したものである。また前報(松山ら1996)では、地盤変動を断面実験により模擬し、沈降と隆起が同時に発生させて、地盤変動上の水面変動を詳細にとらえ、地盤の変位速度が速いほど水面上昇が大きいこと、隆起と沈降で水面上昇過程に違いのあることなどを示した。

本研究は、海底地盤の変動によって引き起こされる海面変動のメカニズムを解明して津波の初期水位の評価精度の向上を狙ったものである。本報告では、海底地盤の変位速度、地盤変位分布などを変化させ、地盤上から遡上域も含めた水面変動を詳細に測定し、水面応答特性と遡上域も含めた伝播特性について検討した。

2. 水理実験

2.1 実験装置

地震を発生させる断層の形状は一般的に長方形としてモデル化され、それによる地盤の変位分布もその形状を反映した分布となる。本実験は、長方形断層を短軸方向

に2等分する断面を念頭に置いたものである。水路は、長さ20m、幅0.3m、高さ0.55mであり、実験の縮尺は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約7cmの高さにあるヒンジに接続した。さらに、その右端を鋼製の棒でエアシリンダーに接続し、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、板を上もしくは下に変位させて水面変動を発生させた。今回の実験では発生した水面変動の伝播特性を把握するために、可動板の両側から水路端部に至るまでモルタルで地形を制作した。海底地

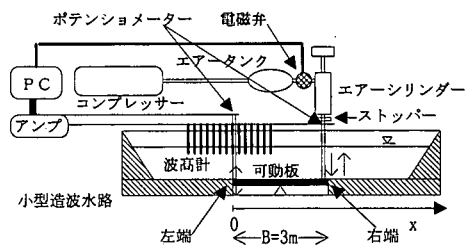


図-1 送験装置の概要

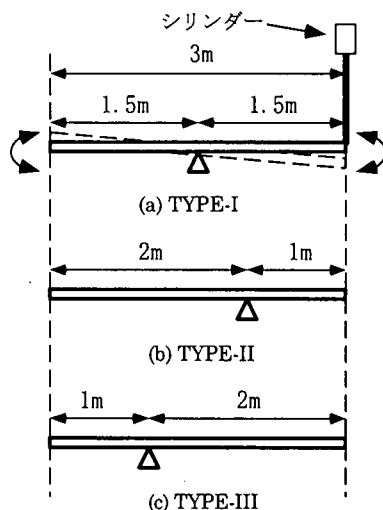


図-2 地盤変動分布の3パターン

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

形は可動板から左端と右端からそれぞれ6 mと5 mの一様水深とし、そこから1/10の勾配を設置した。

可動板の変位速度 V はエアースリンダーに送り込む空気圧を調節することによって変えることができる。実験では、水面変動を波高計を用いて測定し、さらに可動板の両側にはポテンシオメーターを接続してその変位を測定した。

2.2 実験条件

2.2.1 縮 尺

実験(縮尺1/10000)での海底地盤を模擬した可動板の幅(B)が3 m、可動板上の水深は17 cmと22 cmの2ケース行った。実規模では断層幅30 km、水深は2200 mに相当する。地盤変位量は可動板右端(シリンダー接続側)で約2 cm、最大となる可動板の端部で水深の約1/10であり、実際の地震時の地盤変動水深の(1/100 オーダー以下)に比べるとかなり誇張した大きさを想定している。これは水面の応答特性を明確に把握するためである。そのために地盤変位速度は実際の地震時の地盤変位速度に近いものの、その時間は1オーダー以上長いものとなる。

2.2.2 実験における海底地盤の変位速度

ヒンジの位置を図-2に示すようにTYPE-I~IIIと変えることにより、隆起域と沈降域の比率を変化させた。TYPE-I, II, IIIのそれぞれの隆起域と沈降域の比率は、シリンダーの押し下げ時には1:1, 2:1, 1:2に、押し上げ時にはその逆となる。

表-1に各実験条件での可動板端部の変位速度を示す。縮尺が1/10000であるので実際の地盤変動速度に換算するには100倍することになる。換算変動速度は約1 m/s~15 m/sとなるため、数m程度の地盤変位が1~2秒以下で生ずる通常の地震の5倍程度と割合に近いが、

変位量を誇張しているために、変動時間は実際の10倍以上も長い時間となっている。

2.2.3 左端が隆起する場合の地盤変位過程

図-3(a)~(c)に示したように、地盤変位特性には左端と右端で違いがみられる。左端では急激な変位を示した後に変位が一旦小さくなり、その後にある変位量に収束する。一方、右端では変動は急激にある変位量まで変位し、そのまま停止する。ここでは急激な変動時での最大変位を「動的最大変位」、その後の静止した地盤変位を

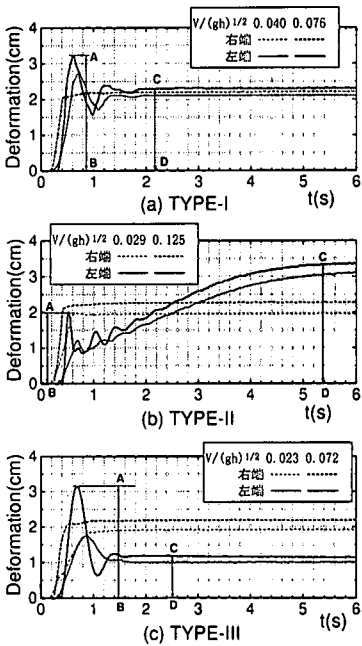


図-3 左端隆起時の可動板両端の変動

表-1 地盤板の変位速度 (m/s)

左端隆起 (水深 22 cm)						左端隆起 (水深 17 cm)					
TYPE-I		TYPE-II		TYPE-III		TYPE-I		TYPE-II		TYPE-III	
右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端
0.037	0.059	0.046	0.042	0.023	0.034	0.038	0.057	0.045	0.036	0.023	0.033
0.042	0.074	0.059	0.073	0.028	0.055						
0.066	0.091	0.068	0.120	0.033	0.077	0.047	0.094	0.069	0.106	0.044	0.083
0.087	0.112	0.076	0.183	0.037	0.106	0.057	0.119	0.069	0.150	0.070	0.112
左端沈降 (水深 22 cm)						左端沈降 (水深 17 cm)					
TYPE-I		TYPE-II		TYPE-III		TYPE-I		TYPE-II		TYPE-III	
右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端	右端	左端
0.041	0.053	0.047	0.038	0.012	0.012	0.030	0.038	0.049	0.035	0.012	0.007
0.054	0.065	0.060	0.062	0.026	0.033						
0.071	0.081	0.075	0.092	0.042	0.064	0.057	0.084	0.078	0.080	0.045	0.054
0.091	0.102	0.104	0.141	0.071	0.102	0.084	0.107	0.103	0.117	0.072	0.086

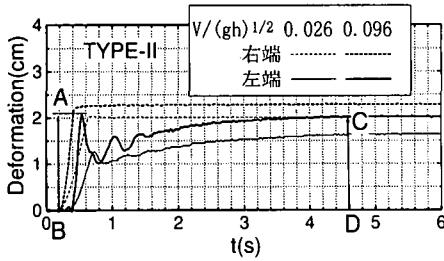


図-4 左端沈降時の可動板両端の変動 (TYPE-II)

「最終変位」と定義する。よって、図-3(a)~(c)のそれぞれABが動的最大変位、CDが最終変位となる。

また、TYPE-I及びTYPE-IIIのケースにおいては動的最大変位は最終変位よりも大きい、TYPE-IIのケースでは最終変位の方が動的最大変位よりも大きい。これは地盤板のヒンジから左側部分が長い、水圧などにより変動時の地盤板のしなりが大きいためである。このために急激な変位の後にそれと比較して速度の遅くまた大きな変位が認められる。

2.2.4 左端が沈降する場合の地盤変位過程

左端と右端の変動特性は隆起のケースと同じように動的最大変位と最終変位が認められた。しかし、図-4に示すようにTYPE-IIにおいて、最終変位は左端が上昇する場合のように動的最大変位の2倍以上にならず、変位速度が速いケースでは両者はほぼ一致する。

2.3 実験結果

2.3.1 可動板上での水面変動の特性

(1) 水面応答特性

水面変動の測定間隔は2.5~5 cmであり、図-1に示すように可動板の左端を0として、水平にx軸をとり、右方向を正とする。以下、水面変動量を動的最大変位(地盤板のstroke)で無次元化して、それを水面応答とする。

図-5に可動板変位速度11.2 cm/s ($V/(gh)^{1/2}=0.04$)での板の左端付近($x/B=0.1$)の水面応答(水面変位/地盤の動的最大変位)を、図-6に水面応答の空間分布の時間変化($t=0.00\sim0.64$ 秒)を示す。前報(松山ら, 1996)と同じように隆起時の水面応答過程は3段階に分けることができ、急激な地盤変動にともなう水面の上昇(第1段階 $t=0.00\sim0.32$)、水面上昇後の可動板端部直上の水面の停止(第2段階 $t=0.32\sim0.48$)、波動として伝播する過程(第3段階 $t=0.48\sim$)の3つである。一方、左端沈降時の可動板の左端付近の水面応答過程は水面の停止がなく、2段階に分けることができる。

(2) 初期水位の伝播特性

図-6に示すように地盤の変動とともに急激に上昇する水面応答は第3段階の過程において、双山に別れて両

方向に伝播していく。これは沈降域付近の水面低下の伝播についても同様の結果となった。この結果は発生した波動が可動板中央に強い指向性があるとした前報(松山ら, 1996)の実験結果とは異なる。前報との実験条件におけるもっとも大きな違いは、可動板両側の地盤の模擬方法の違いである。前報では簡易的にベニヤ板を用いて筒上の箱を作成し、可動板の両側約2 mづつにわたって固定した。このため可動板下の水は可動板両側で水路の水と通じており、地盤変動時に可動板下の圧力変動が模擬した地盤内の空洞を通じて伝播し、可動板上の水面変動の伝播に影響を与えた可能性がある。今回の実験では可動板の両側はモルタルで固めており、可動板下の水の圧力変化はほとんど水路内の水に影響を及ぼさない構造

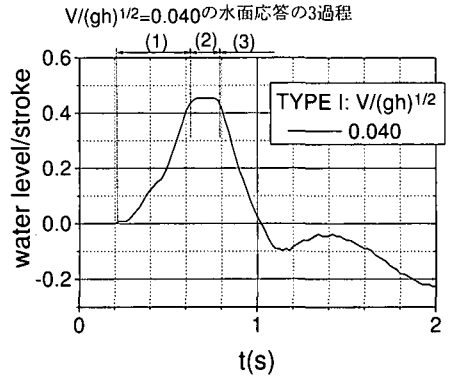


図-5 可動板直上の水面変動応答

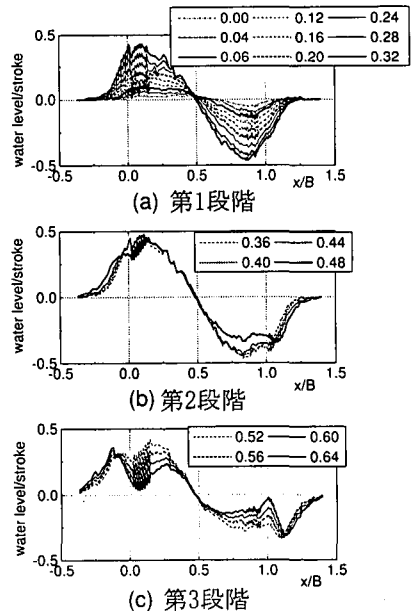
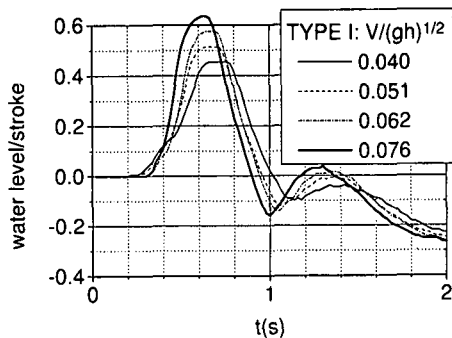
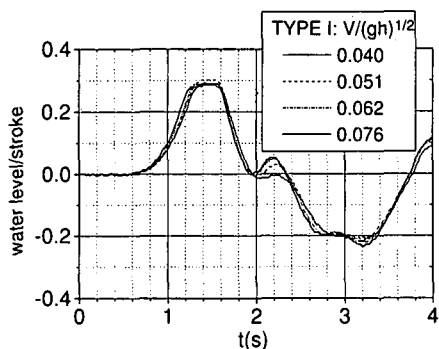


図-6 空間波形の時間変化 (TYPE-I)

図-7 可動板左端付近 ($x/B=0.1$) の水面変動図-8 可動板から離れた地点 ($x/B=-1.0$) の水面変動

となっており、実際の津波波源のモデルに近いものと考えられる。

2.3.2 地盤の変位速度の異なるケースの比較

TYPE-I について、地盤変位速度の違いによる $x/B=0.1$ と $x/B=-0.3$ での水面変動の時間変化を図-7 と図-8 にそれぞれ示す。 $x/B=0.1$ の地点は地盤変動上で最も水面応答の高いところであり、 $x/B=-0.3$ の地点では発生した水面変動が波動として十分に発達して伝播する。 $x/B=0.1$ では、地盤変位速度が大きくなるにつれて最大水位は大きくなるが、 $x/B=-0.3$ ではその差はほとんどみられない。また、左端が隆起した場合と沈降した場合の最大水面応答の分布を図-9 と図-10 にそれぞれ示す。TYPE-I~III を通じて、可動板の最大変位を生じる $x/b=0$ 付近の水面応答は変位速度の速い方が大きくなるが、そこから外れるに従ってその差は小さくなる。

図-11 は左端が隆起するケースでの、遡上域 (1/10 斜面) にあたる $x/B=-3$ 付近のでの最大水面応答分布である。遡上域でも変位速度による水面応答の違いは小さい。また、最小水位分布に突いても同様の結果を得た。

図-12 に地盤の変位速度及び TYPE-I~III の違いによる、 $x/B=0.3$ 付近の最大水面応答を示した。このように、本実験の範囲では地盤変位速度の違いは地盤変動地点上の水位変動には影響するものの、波動として伝播す

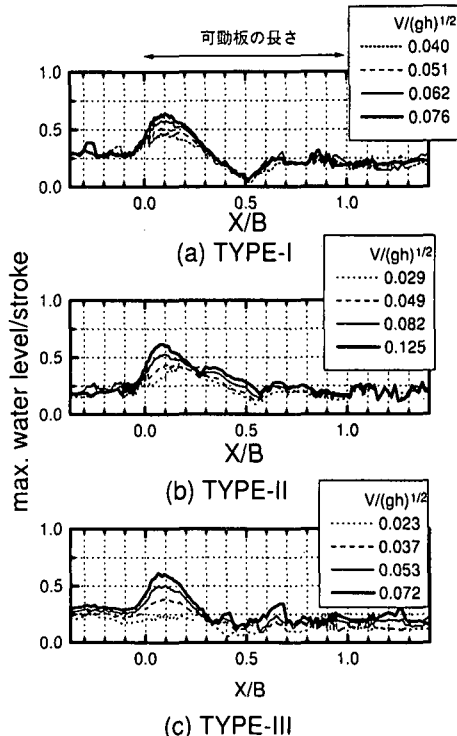


図-9 TYPE-I~III の最大水面応答分布 (左端隆起)

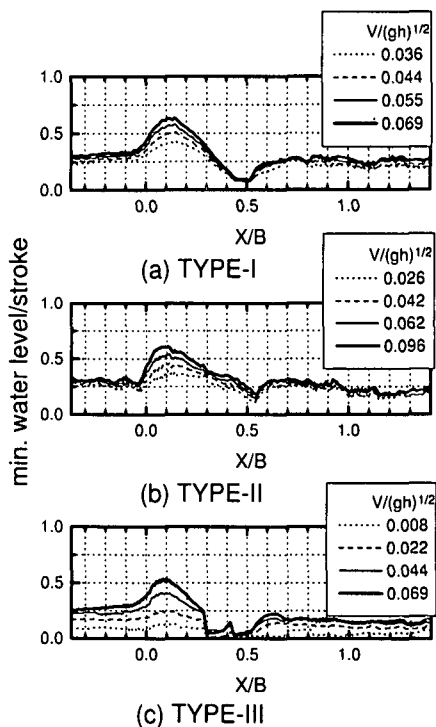


図-10 TYPE-I~III の最大水面応答分布 (左端沈降)

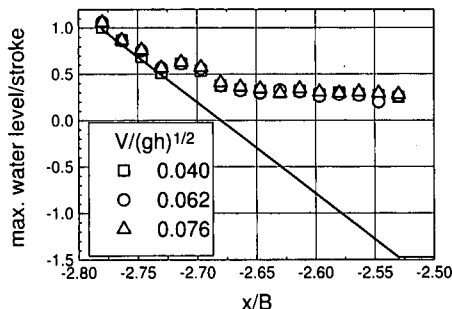
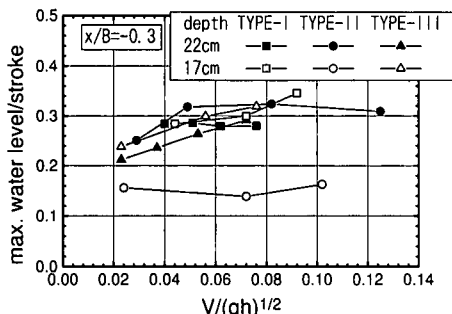


図-11 遡上域での最大応答分布 (TYPE-I)

図-12 $x/B = -0.3$ の最大水面応答

る領域の水位変動や遡上高には影響を与えない結果となった。

2.3.3 隆起と沈降の変位分布が異なる場合の水面応答

図-8より TYPE-I では $x/B = -0.05 \sim 0.35$ の範囲で応答が大きくなっているが、TYPE-II では応答の大きくなる範囲が若干広く $x/B = -0.05 \sim 0.5$ となり、TYPE-III では狭く $x/B = -0.05 \sim 0.3$ なるというように、最大水位分布形状は地盤の隆起範囲を反映したものとなった。

また、 $x < 0$ の領域での最大水位分布を比較すると隆起域が小さくなるほど (TYPE-II, III, I の順)、水面応答は大きくなる。地盤変動の瞬間内部流速場を把握するために $x/B = 0.0$ 付近に中立粒子を水位中に浮遊させて地盤変動中に高速ビデオ (500 コマ/秒) で撮影したところ、可動板端部付近では可動板の隆起すると同時に x の負の範囲の流体全体が負の方向へ流れる様子が確認された。

海底地盤の隆起幅が小さくなるにつれて隆起する水面変動幅が小さくなるので、この瞬間的な流速場の影響が受けやすく、負の方向へエネルギーの指向性を高めたのではないだろうか。

2.3.4 遡上高に影響する地盤変位の特性

図-3の(b)(c)に示すように、TYPE-II と TYPE-III における動的最大変位 (AB) は TYPE-I と比較して、地盤変位速度によって異なり、TYPE-II では変位速度の違いにより 1.8 倍程度異なる。しかし、動的最大変位で無次元化した最大水面応答分布は図-10(a)(b)に示すように可動板外においてその差は小さく、遡上高についても同じ傾向である。これは大町ら (1996) が指摘するように最大水位分布に及ぼす影響が地震による地盤の最終変位よりも動的最大変位の及ぼす影響が大きいことを示唆する。

3. まとめ

- 1) 本実験における地盤変動を模擬した可動板の両端の動きを測定し、その動きの特徴をまとめた。
- 2) 本実験の範囲では、地盤変位速度の影響は波源上では見られるが、波源外での水面変位や遡上高に影響を及ぼさない結果となった。
- 3) 波源外での最大水面応答や遡上高を評価する場合に、地盤の動的な最大変位が最終変位よりも有効である可能性がある。
- 4) 同時に発生する沈降域と隆起域が非対称なケースでは、最大水面応答分布は地盤変動分布を反映したものとなった。

参考文献

- 高橋龍太郎・羽鳥徳太郎 (1962): 梶田浪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.
- 松山昌史・田中寛好 (1996): 海底地盤の隆起と沈降にともなう水面応答とその特性について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 281-285.
- 大町達夫・中山義紀・築山 洋 (1996): 断層運動にともなう動的地盤変動を考慮した 1983 年日本海中部地震の津波伝播シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 306-310.
- Hammack, Joseph 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.