

# 東海第二発電所

## 耐津波設計方針

第513回審査会合(平成29年9月26日)

指摘事項に対する回答

平成29年10月5日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は  
防護情報の観点から公開できません。

## 指摘事項 ソリトン分裂波の影響について

【指摘事項】2017年9月26日 第513回

ソリトン分裂波の影響についてより詳細な考察をしたうえで資料に反映すること。

### 【回答概要】

- 東海第二発電所に到達する基準津波については、東海沖の海底地形を模擬した水理模型実験および二次元断面シミュレーション解析にて、沖合でソリトン分裂波が生じることを確認したが、陸上に遡上する過程で分裂波が減衰し、防潮堤前面位置の波形は明確に分裂波の影響がみられないことを確認した。
- また、防潮堤に作用する津波荷重も、ソリトン分裂波の影響がないことを確認したことから、単直線型の朝倉式( $3\rho gh$ )を用いた津波荷重の設定を行うこととする。
- 朝倉式に用いる設計用浸水深の設定については、(津波遡上高さ－設置地盤高さ)／2とすることで、水理模型実験結果等から得られた浸水深と比較し、十分に安全側の設定になっていることを確認した。
- なお、水理模型実験や津波数値シミュレーションで得られたフルード数は1.5以下であることから、朝倉式の適用範囲であることを確認した。

# ソリトン分裂波の発生の可能性について

沖合から伝播してくる津波が、サイト前面においてソリトン分裂波を伴うか否かの判定に当たっては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」において以下の2つの条件に合致する場合、ソリトン分裂波が発生するとされている。

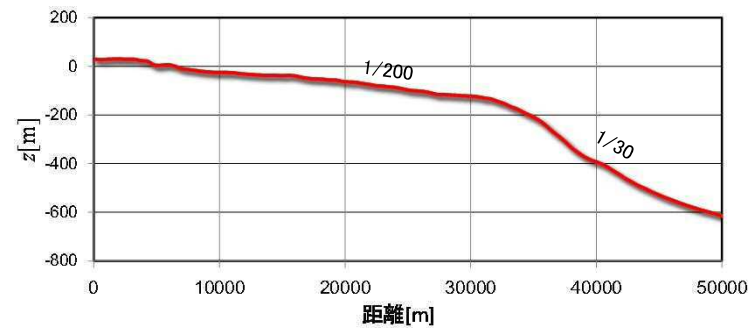
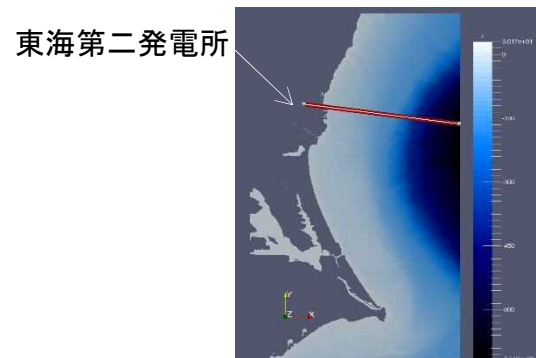
- ① おおむね入射津波高さが水深の30%以上（津波数値解析等による津波高さが水深の60%以上）
- ② 海底勾配が1/100以下程度の遠浅

津波高さと水深の関係

地点	(1)水深	(2)入射津波高さ※	(2)/(1)
東海第二発電所前面	7.5m	4.7m	62%

➡ ①に該当する

※津波数値解析による津波高さを1/2を入射津波高さとして定義(防潮堤の耐津波ガイドライン)



➡ ②に該当する

東海第二発電所前面の海底勾配

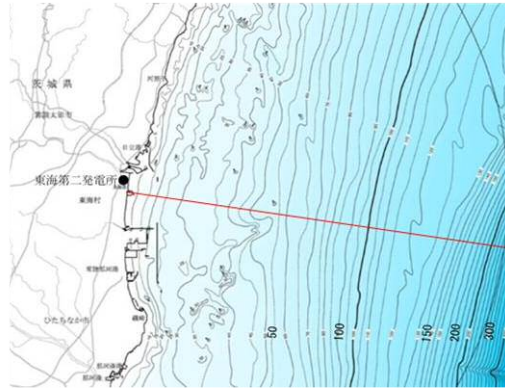
東海第二発電所前面の海底地形は約1/200と遠浅であり、入射波津波高さと水深の関係も入射津波高さが水深の30%以上であることから、①及び②の条件に合致する。

このため、ソリトン分裂波が津波波圧に与える影響を定量的に把握するため、東海第二発電所のサイト特性を考慮した水理模型実験を行い、防潮堤前面の津波波圧を測定した。

# 水理模型実験内容

## 1. 検討断面

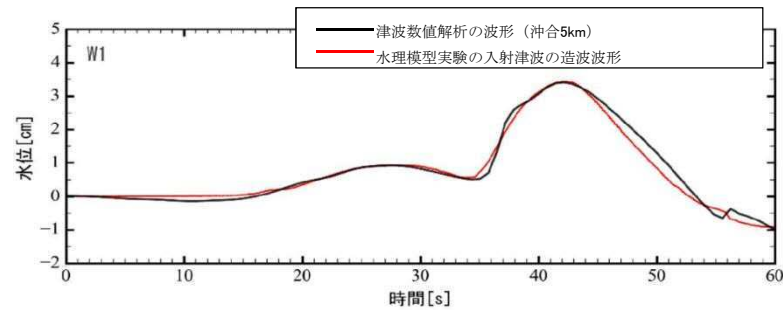
水理模型実験においては、ソリトン分裂波が生じない沖合5.0kmにおける津波波形を入力し、ソリトン分裂波の発生の有無、フルード数の把握、防潮堤位置での津波波圧を把握することを目的に実施した。本実験では、津波水位が最大となる地点を基に、津波の伝播特性を踏まえ、等深線図に直交する断面を選定した。



検討断面位置図

## 2. 入射津波の造波

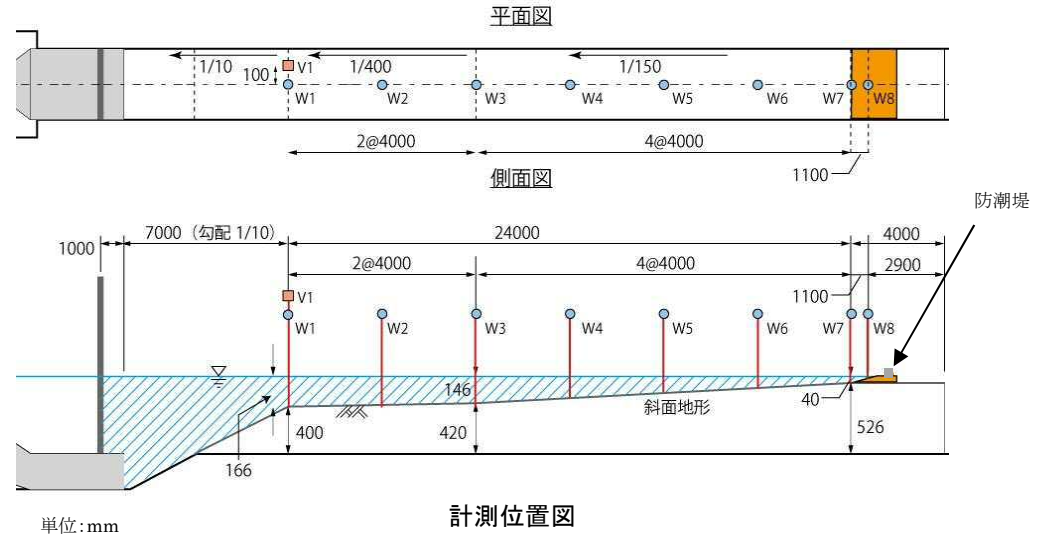
水理模型実験における再現範囲の最沖地点はソリトン分裂波が発生しない沖合5.0kmの位置とし、基準津波の波源モデルを用いた数値解析から求めた同地点における津波波形を入力した。また、この津波波形を防潮堤位置で津波数値解析と同様の高さになるよう振幅を調整した。



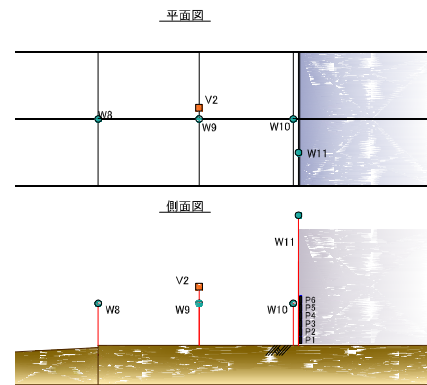
入射津波の造波波形図(沖合5km地点)

## 3. 実験条件

断面二次元実験施設の水路は、長さ60m×幅1.2m(貯水部は1.8m)×高さ1.5mとし、沖合5kmから陸側の範囲を再現するために、実験縮尺(幾何縮尺)は $\lambda=1/200$ とした。



計測位置図



防潮堤位置拡大図



実験施設写真

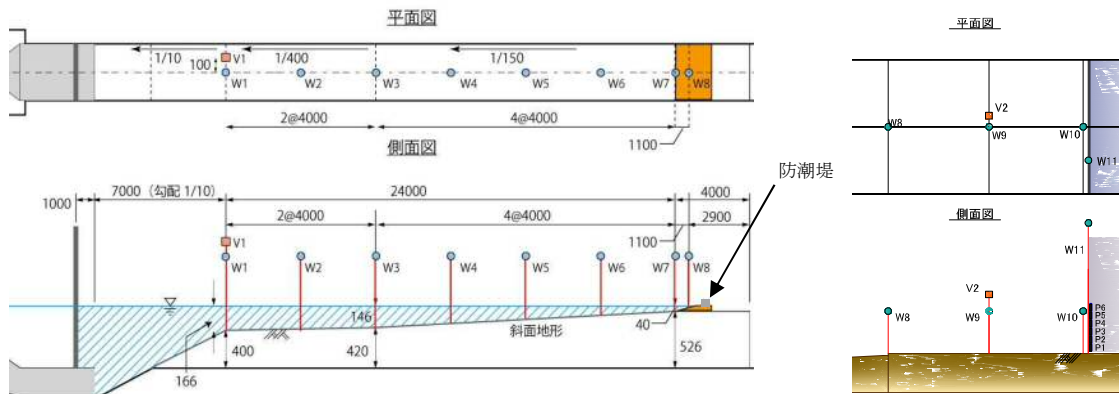
# 水理模型実験結果(1)

## 4. 水理模型実験の結果

### (1) 水理模型実験におけるソリトン分裂波の確認

水理模型実験を行った結果、目視観察と波高計による計測により沖合約220m地点 (W7) においてソリトン分裂波が生じることを確認した。

津波はソリトン分裂波を生じるものの、陸上に遡上する過程で分裂波が減衰し、防潮堤前面位置 (W11) では分裂波が消失していることを確認した。



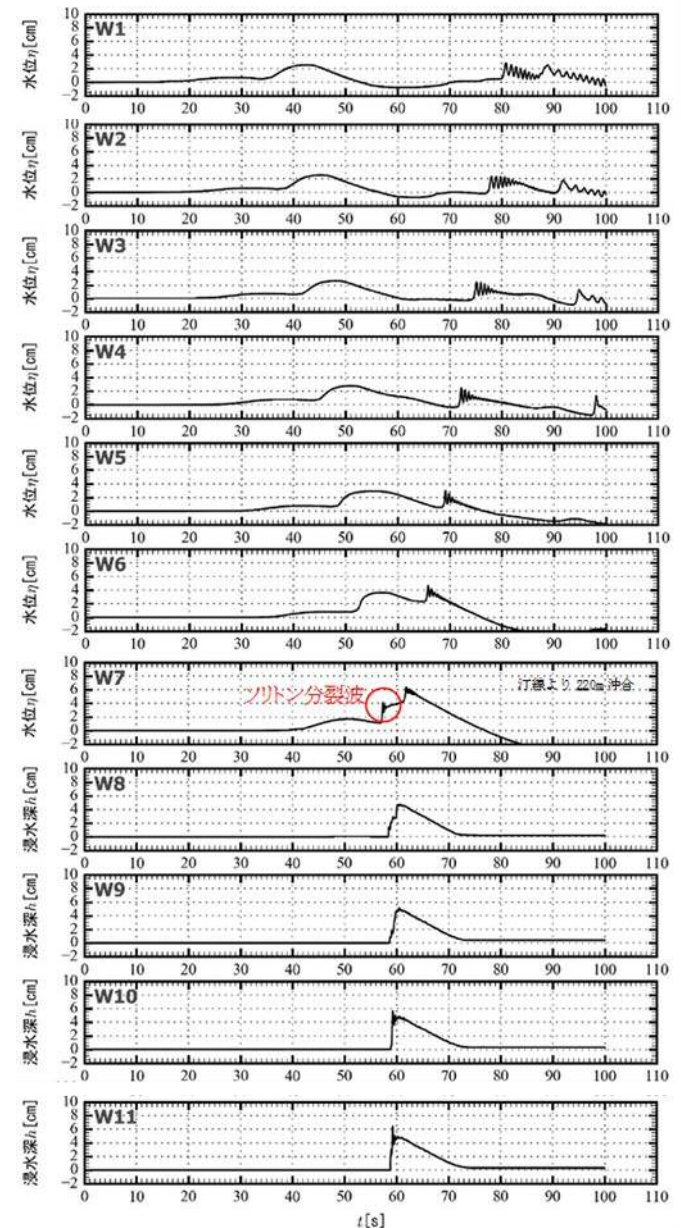
単位: mm

### (2) フルード数

防潮堤がないモデルで、防潮堤位置の最大浸水深を計測し、同時刻における流速からフルード数を算定した。

その結果、通過波のフルード数は平均で0.8 (< 1.5)であったことから、水深係数3で津波波圧分布を評価し、防潮堤の設計に適用できることを確認した。

	フルード数 (最大浸水深時)
1回目	0.9
2回目	0.9
3回目	0.6
4回目	0.8
5回目	0.7
6回目	0.9
平均値	0.8

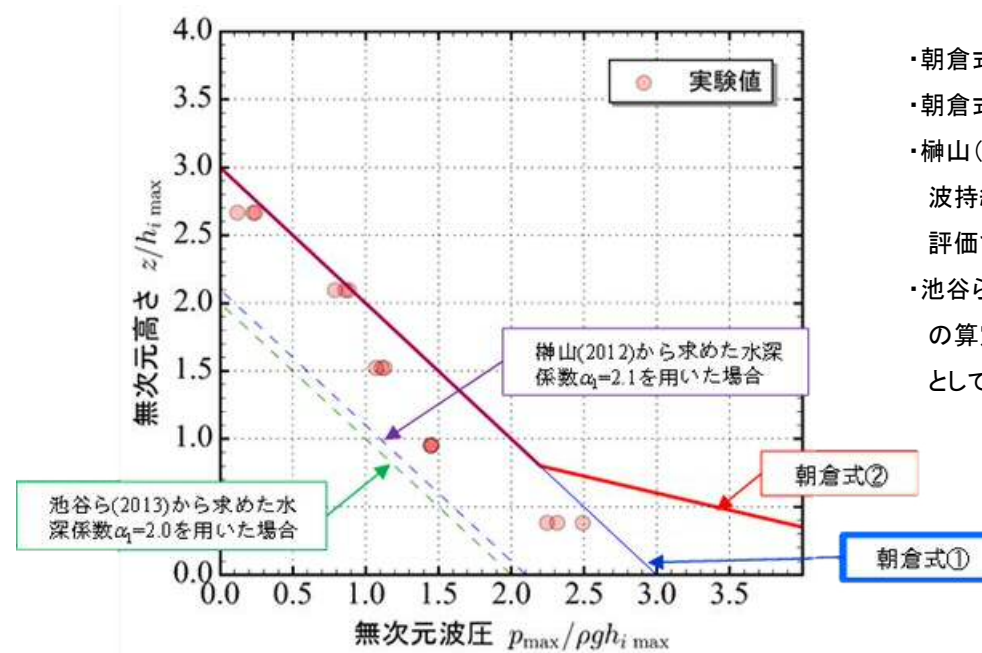


## 水理模型実験結果(2)

### (3) 防潮堤壁面におけるソリトン分裂波の最大津波波圧

防潮堤壁面における津波波圧計測結果を通過波の最大浸水深で除して無次元化した結果を以下に示す。

東海第二発電所前面海域の地形を模擬した水理模型実験で計測した防潮堤壁面の最大津波波圧は、朝倉式①及び朝倉式②による算定値よりも小さい値となり、朝倉式②のような波圧分布は認められず、朝倉式①と整合する結果となった(朝倉式①の方が津波波圧分布の再現性がよいことを確認した)



- ・朝倉式①: 水理模型実験に基づく実験式。
- ・朝倉式②: 水理模型実験に基づく実験式。
- ・榊山(2012): 榊山(2012): 陸上構造物に作用する津波持続波圧の算定式。水深係数  $\alpha$  が  $\alpha=1+1.4Fr$  で評価できるとした式。
- ・池谷ら(2013): 榊山(2012)と同様な津波持続波圧の算定式。同様に、水深係数が  $Fr$  数の関数であるとして  $\alpha=1+1.3Fr$  で評価できるとした式。

既往の津波波圧算定式との比較 (無次元最大津波波圧分布図)

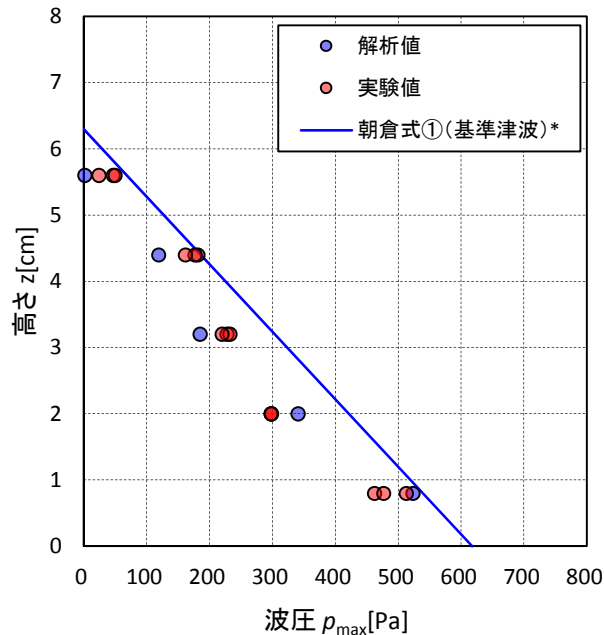
# 数値シミュレーション解析結果（水理模型実験結果の検証）

## 5. 水理模型実験結果の検証（再現性検討）

水理模型実験結果について、数値シミュレーションを実施し、防潮堤位置での津波波圧算定式が朝倉式①で妥当であることを検証した。数値シミュレーションは、分散波理論に基づいた解析手法であり、ソリトン分裂波を表現可能な数値波動水路CADMAS-SURF/2Dを用いた。

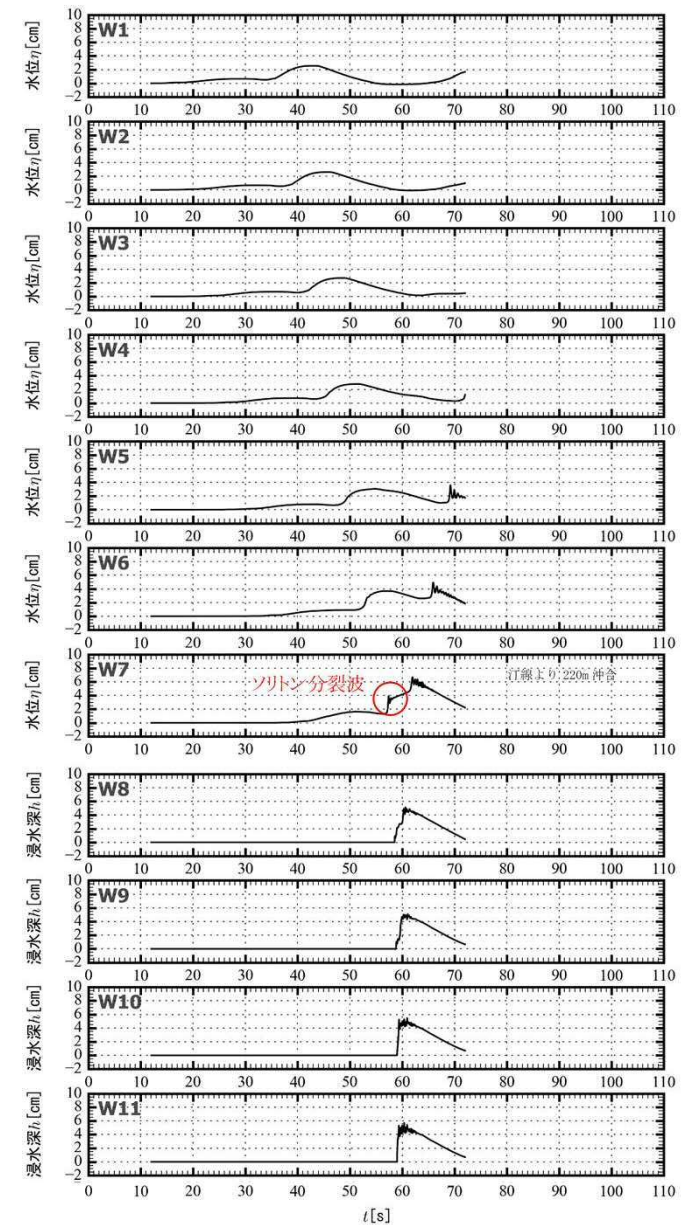
水理模型実験でモデル化した区間と同じ区間を解析領域とし、入射波は水理模型実験の入力波形に合わせて作成した。

数値シミュレーションの結果、水理模型実験結果と同様、沖合約220m地点（w7）においてソリトン分裂波が確認された。ただし、陸上に遡上する過程で分裂波は減衰し、防潮堤前面地点（w11）では分裂波が消失していることを確認した。また、防潮堤壁面に作用する津波波圧は実験値とほぼ同等のものとなり、朝倉式①による波圧分布を下回るとともに、朝倉式②のような波圧分布は認められず、朝倉式①と整合する結果となった。



※水理模型実験に基づいた朝倉式①（基準津波（防波堤なし））

数値シミュレーション結果図(最大波圧分布図)



# 数値シミュレーション解析結果

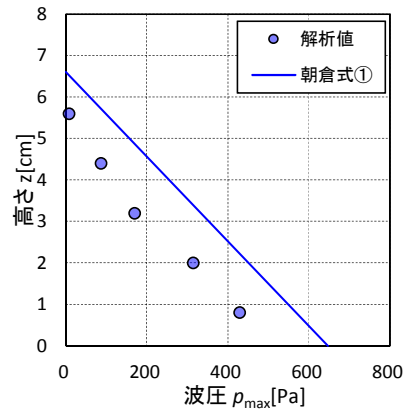
## (防潮堤と海岸線との離隔距離の違いが津波波圧に与える影響検討)

### 6. 防潮堤と海岸線との離隔距離の違いが津波波圧に与える影響検討

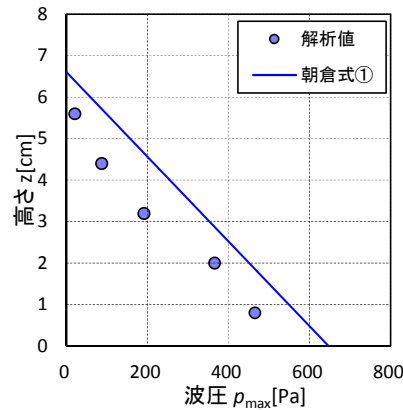
防潮堤の設置位置は、海岸線から最も近いところで約30mであり、水理模型実験では海岸線と防潮堤の離隔距離が約60m地点の断面（津波水位が最も高くなる地点）をモデル化した。

海岸線と防潮堤の離隔距離を30m, 45m, 60m, 75mと変化させた場合のソリトン分裂波の影響について検討を行った。入力波形は基準津波を用いて実施した。

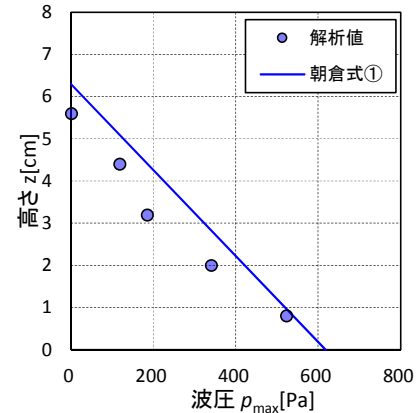
その結果、防潮堤と海岸線との離隔距離が津波波圧に与える影響は認められず、朝倉式①による波圧分布を下回るとともに、分布形は朝倉式①と整合する結果となった。



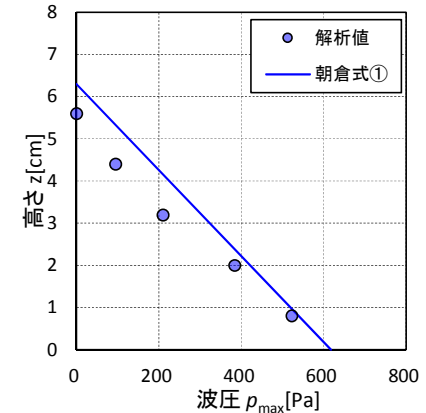
離隔距離30m



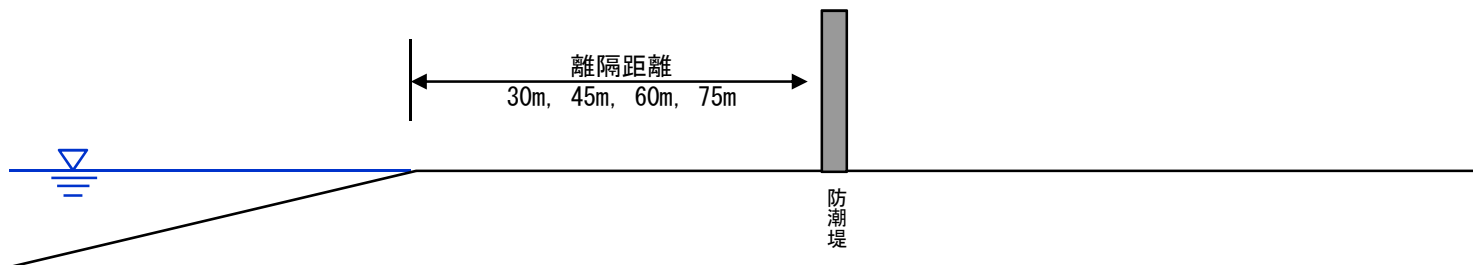
離隔距離45m



離隔距離60m



離隔距離75m





# 数値シミュレーション解析結果 (津波遡上高さが異なる津波が防潮堤に与える影響について)

## 7. 津波遡上高さが異なる津波が防潮堤に与える影響について

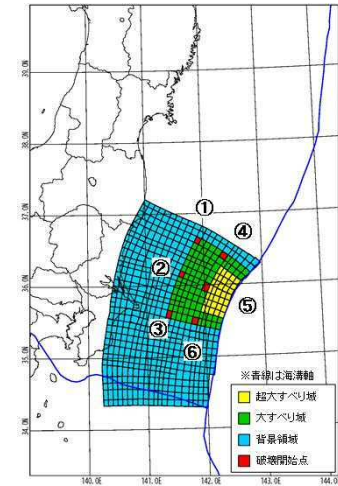
基準津波の決定に当たっては、平面二次元津波シミュレーションにおいて、断層の破壊開始点位置や破壊伝播速度等をパラメータスタディした中で、防潮堤位置での津波遡上高さが最も高くなる波を抽出している。

防潮堤位置での津波遡上高さが大きい上位10波の沖合波形（沖合5km地点）を用いて、防潮堤壁面の津波波圧を確認した。

ケース	津波遡上高さ (T.P.(m))	水位上昇時間[min]	破壊伝播速度 [km/s]	破壊開始点	立ち上がり時間 [s]
1(基準津波)	17.2	1.5	3.0	⑥	30.0
2	17.0	1.5	2.5	⑥	30.0
3	16.8	1.5	3.0	⑥	60.0
4	16.2	1.7	2.0	⑥	30.0
5	16.1	1.5	3.0	④	30.0
6	15.9	1.7	3.0	③	30.0
7	15.8	1.7	3.0	⑤	30.0
8	15.6	1.7	2.5	④	30.0
9	15.5	1.8	1.5	⑥	30.0
10	15.5	1.7	3.0	①	30.0

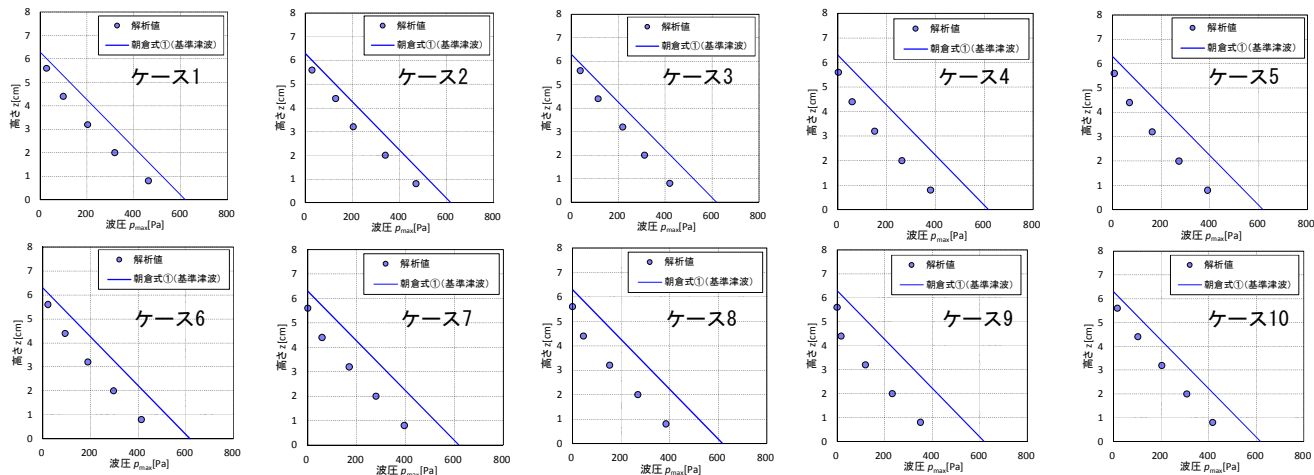
※破壊伝播速度：破壊開始点から断層破壊が進行する速度

※立ち上がり時間：断層のある点において破壊開始から終了するまでの時間



いずれのケースにおいても、津波はソリトン分裂波を生じるものの、陸上に遡上する過程で分裂波が減衰しており、防潮堤前面位置の波形をみると明確に分裂波の影響はみられない。また、防潮堤壁面における最大波圧分布は、朝倉式①による波圧分布を下回る結果となった。

津波は、周期が短いほど分裂波（段波）が発生しやすくなるとともに、分裂波が成長しやすくなるとされている。上位10波において最も周期が短いものはケース1（基準津波）であることから、基準津波が最もソリトン分裂波の影響を受けると考えられるが、いずれのケースにおいても、朝倉式①による波圧分布を下回るとともに、分布形は朝倉式①と整合する結果となった。



## まとめ

### （水理模型実験）

- 水理模型実験を行った結果，目視観察と波高計による計測により沖合約220m地点（W7）においてソリトン分裂波が生じることを確認したが，陸上に遡上する過程で分裂波が減衰し，防潮堤前面位置（W11）の波形をみると明確に分裂波は消失していることを確認した。
- 防潮堤壁面の最大津波波圧は，単直線型の朝倉式①に包絡され，朝倉式①による津波波圧分布の再現性がよいことを確認した。

### （断面二次元数値シミュレーション解析）

- 数値シミュレーションの結果，水理模型実験結果と同様，沖合約220m地点（W7）においてソリトン分裂波を生じるものの，陸上に遡上する過程で分裂波が減衰し，防潮堤前面位置（W11）では分裂波が消失していることを確認した。
- 防潮堤壁面に作用する津波波圧は水理模型実験結果とほぼ同等のものとなり，朝倉式①による波圧分布を下回るとともに，整合する結果となった。
- 海岸線と防潮堤の離隔距離を30m，45m，60m，75mと変化させた場合のソリトン分裂波の影響について検討を行った結果，防潮堤と海岸線との離隔距離が津波波圧に与える影響は認められず，朝倉式①による波圧分布を下回るとともに，分布形は朝倉式①と整合する結果となった。
- 平面二次元津波シミュレーションにおいて，断層の破壊開始点位置や破壊伝播速度等をパラメータスタディした中で，防潮堤位置での津波遡上高さが最も高くなる波を抽出しているが，防潮堤位置での津波遡上高さが大きい上位10波の沖合波形（沖合5km地点）を用いて，防潮堤壁面の津波波圧を確認した結果，いずれのケースにおいても，朝倉式①による波圧分布を下回るとともに，分布形は朝倉式①と整合する結果となった。



東海発電所に襲来する津波にソリトン分裂波が生じることを水理模型実験等により確認したが，陸上に遡上する過程で分裂波は減衰し，防潮堤前面位置ではその津波波形や波圧分布に分裂波の影響はみられないことから，耐津波設計において算定する津波荷重については，単直線型の朝倉式を用いることとする。

# 津波波圧算定式適用に対する考え方について（防潮堤）

◆ 防潮堤を例にし、基準地震動、基準津波による荷重及び荷重の組合せ並びに設計方針について以下に示す。

## ■ 荷重条件

### (1) 基準地震動 $S_s$ による地震荷重

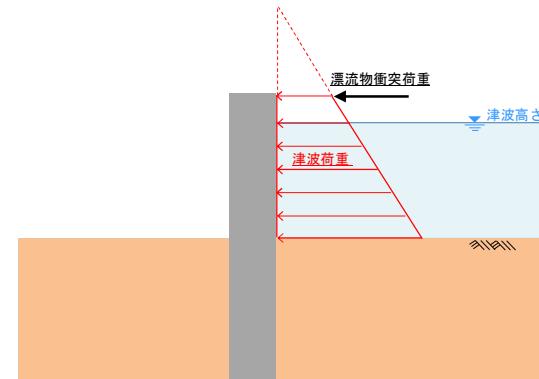
基準地震動 $S_s$ を考慮した設計荷重に対して、短期許容応力度以下であることを確認する。

### (2) 基準津波荷重+漂流物衝突荷重

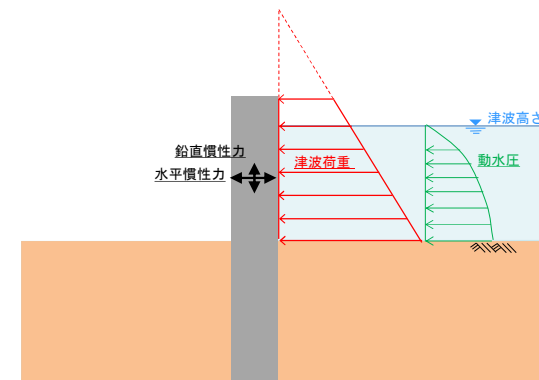
津波荷重+漂流物衝突荷重を考慮した設計荷重に対して、短期許容応力度以下であることを確認する。

### (3) 余震+基準津波荷重

余震による地震力+津波荷重に対して短期許容応力度以下であることを確認する。



(2) 基準津波荷重+漂流物衝突荷重



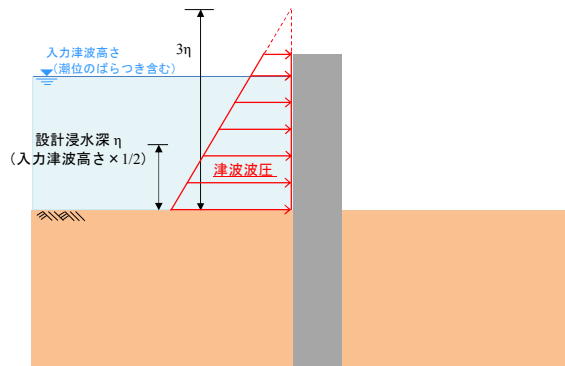
(3) 余震+基準津波荷重

# 津波波圧算定式適用に対する考え方について（浸水深の設定）

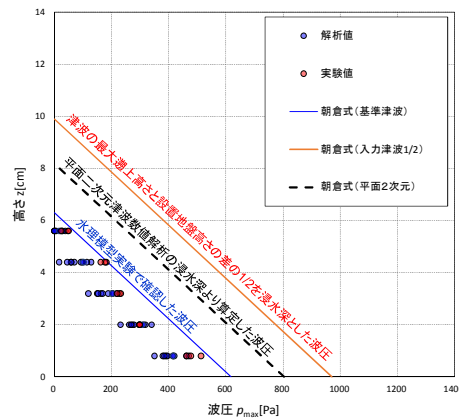
## ■ 浸水深の設定

設計用浸水深は、津波の最大遡上高さと設置地盤高さの差の1/2とする。設定理由は以下のとおり。

- 津波の最大遡上高さと設置地盤高さの差の1/2を浸水深とし朝倉式から算定した津波荷重は、非線形長波理論に基づく津波シミュレーション解析で得られた浸水深を用いて朝倉式により算定した津波荷重よりも大きい。
- 水理模型実験により確認した浸水深を用いて朝倉式から算定した津波荷重は、上記から算定した津波荷重よりも更に小さいことを確認した。
- 津波シミュレーション解析及び水理模型実験で確認したフルード数は、いずれも1.5以下であり、朝倉式の適用が可能である。

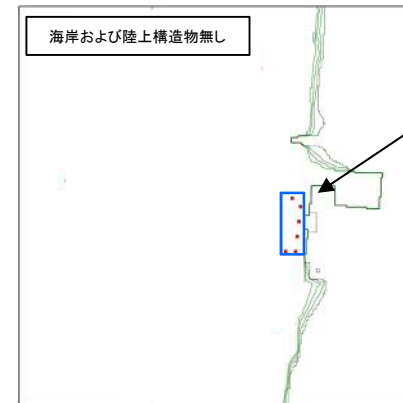


設計浸水深算出概要図(入力津波 × 1/2)



津波波圧の比較

- ・解析値  
分散波理論に基づいた数値シミュレーション解析で得られた波圧
- ・実験値  
水理模型実験で得られた波圧
- ・朝倉式(基準津波)  
分散波理論に基づいた数値シミュレーションでの浸水深を用いて朝倉式により算出した波圧
- ・朝倉式(入力津波1/2)  
浸水深を(入力津波高さ-地盤高さ) × 1/2として朝倉式により算出した波圧
- ・朝倉式(平面二次元)  
非線形長波理論に基づいた津波シミュレーションで得られた浸水深を用いて朝倉式により算出した波圧



津波シミュレーションモデル(非線形長波理論)  
T.P.+3.0mフラット地形モデル

### 水理模型実験のフルード数

	フルード数 (最大浸水深時)
1回目	0.9
2回目	0.9
3回目	0.6
4回目	0.8
5回目	0.7
6回目	0.9
平均値	0.8

### 津波シミュレーション(非線形長波理論)のフルード数

	最大浸水深	フルード数 (最大浸水深時)
1	5.206	0.60
2	5.027	0.49
3	4.671	0.45
4	5.057	0.66
5	5.276	0.59
6	5.188	0.60