

# 東北地方太平洋沖地震津波時における防波堤形状と被災の関係

## Relation between Disaster and Configurations of Breakwaters on the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake Tsunami

内海 博<sup>1</sup>・西畑 剛<sup>2</sup>・新明克洋<sup>3</sup>・川俣 奨<sup>4</sup>

Hiroshi UTSUMI, Takeshi NISHIHATA, Katsuhiko SHINMYO and Susumu KAWAMATA

In this study, numerical simulations for the Tohoku-Pacific Ocean earthquake tsunami are executed to reproduce the tsunami disaster in the Haramachi port. The configuration of main breakwaters which consists of trapezoidal caisson with sloping top seemed to suppress a devastating damage due to the tsunami. So not only the trapezoidal caisson but re-designed square type breakwater is assumed and compared through the numerical computing to inspect wave force around the breakwaters and current field on the block mounds. Pushdown force on the sloping top restricts caisson sliding and armor blocks with large void ratio decrease uplift pressure. In addition, height of the trapezoidal coping position taller than that of square coping turns out to weaken the overtopping flow into the block mound not to cause the mound scour.

### 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波時，設計を超過した津波外力により各地で甚大な被害がもたらされた。港湾部においても防波堤ケーソンの滑動など多くの被害が報告されている（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2011年）。被災事例の分析からは，防波堤上を津波が越流する際の波力作用形態や基礎マウンドの洗掘に伴う防波堤ケーソンの不安定化など新たな被災メカニズムが見出されている。

福島県相馬港においても沖防波堤の延長の約9割が滑動・転倒し，基礎マウンド部の顕著な洗掘も見られた。一方，相馬港から約18km南に位置する東北電力原町火力発電所専用港湾（以下，原町港と呼ぶ；図-1）では，主防波堤に被災はなかった。相馬港は矩形ケーソン堤（以下，矩形堤と呼ぶ），原町港は台形ケーソンに上部斜面堤を組み合わせた形状特性（同，台形堤）を有する。斉藤・内海（2012）は相馬港の解析津波高を原町港に準用して設計レベルで防波堤の滑動照査を行い，台形堤形状が滑動に有効と推定しているが，実際に襲来した津波による照査は実施されていない。こうした超過津波外力作用下における防波堤形状と被災メカニズムの詳細を把握することは，今後，津波に対して粘り強い港湾を構築していく上で重要になると考えられる。

本研究では，最初に原町港の被災調査結果を再現する東北地方太平洋沖地震津波の浸水解析を実施し，襲来し

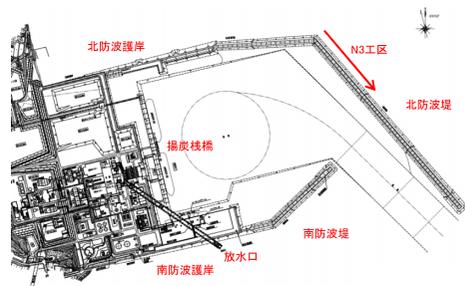


図-1 原町火力発電所港湾

た津波を把握する。解析された津波を入射条件として防波堤に作用した津波波力や流動場を別途詳細に解析・検証する。そして原町港と相馬港の防波堤の設計条件，形状等の違いと防波堤や基礎マウンドの安定性を考察し，防波堤形状と被災メカニズムの関係を明らかにすることを目的とする。

### 2. 被災状況

東日本大震災当時，各火力発電所港湾が受けた地震・津波による被害状況は，斉藤ら（2012）がまとめている。ここでは，原町港の津波被害を記す。津波は沖合東から襲来し，北防波堤および南防波堤・護岸を乗り越えて港内および埋立部の敷地内に侵入し，敷地内の発電設備には甚大な被害があった。揚炭棧橋では揚炭機が倒壊し，船舶の漂流・衝突により防舷材等に損傷がみられた。また背後敷地で津波痕跡（浸水深・遡上高）も多く残されている。津波高は，SP+13～18m程度であり（SPは相馬港工用基準面），これは周辺港湾の痕跡津波高と同等かそれ以上の大きさである。北・南の主防波堤は，泥岩を基

1 正会員 工修 東北電力（株）土木建築部（火力原子力土木）  
2 正会員 博（工） 五洋建設（株）技術研究所  
3 正会員 剛（工） 五洋建設（株）土木設計部  
4 正会員 修（工） 五洋建設（株）原町火力工事事務所



写真-1 津波越流状況

礎地盤としたケーソン式混成堤(設置水深SP-10~-17.2m)であり、津波は防波堤を越流したものの(写真-1)、防波堤法線の変化はなく、また、深浅測量結果からは基礎マウンドの洗掘は確認されなかった。

### 3. 非線形長波モデルによる浸水解析

原町港を襲った津波を再現するため、線形および非線形長波方程式による平面浸水解析を実施した。以下に詳細を述べる。

#### (1) 解析領域・モデル

解析は、津波波源全体を含む広領域から港内地盤・海岸防護施設効果を再現できる解像度を有する狭領域まで5領域用意し、各領域をネスティングすることで実施した。図-2に解析領域と適用した基礎方程式を示す。

津波波源は、GPS波高計観測や対象地点周辺地域の浸水状況の再現性が高い(独)原子力安全基盤機構(2011)による断層モデルから設定した。同モデルの複数の断層セグメントに対して、Mansinha・Smylie(1971)の方法で津波水位変動を計算し、時間差をつけて与えた。解析された津波波源の累積水位変動量の平面分布は図-2に併記している。狭領域DおよびEでは、震災直前の原町港および周辺地盤を再現し、小谷ら(1998)の手法で津波遡上解析をおこなった。なお、防波堤や堤防等施設部の越流に対しては、本間の越流公式を適用している。

#### (2) 浸水計算結果

被害調査による津波浸水高・遡上高と解析結果を図-3に比較する。解析値は調査結果の約2割以内の誤差であるが、解析結果の適合性を評価する相田(1977)の指標のK値、κ値とともに、図-3に示した通り基準範囲内に収まり、解析と観測の整合性は良好である。また国土地理院による周辺の浸水範囲調査結果とも整合しており、原町港周辺に襲来した津波を妥当に再現したと言える。

N3防波堤前面に最大波(第2波)が押し寄せている53分後の解析水位分布を図-4に示す。津波はほぼ東から襲来しており、防波堤前面で重複波を形成しつつ港内へも越流する。図-5にN3-14号防波堤沖合P1および堤前P2の解析水位を示す。津波の押波第1波は地震発生後40分以

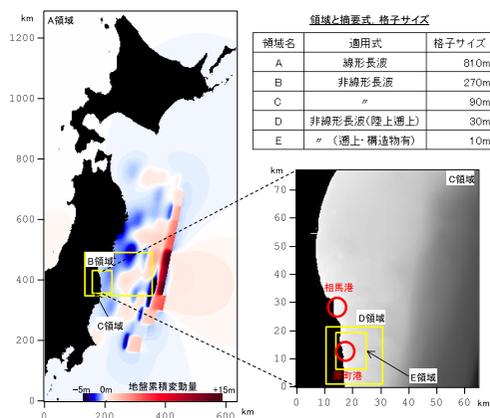


図-2 浸水解析領域と適用式

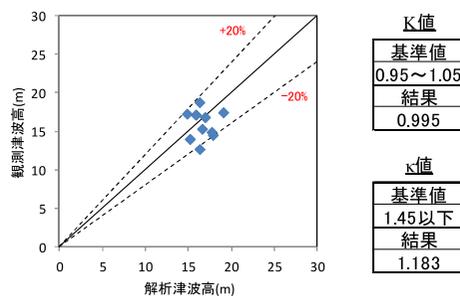


図-3 津波浸水高・遡上高比較

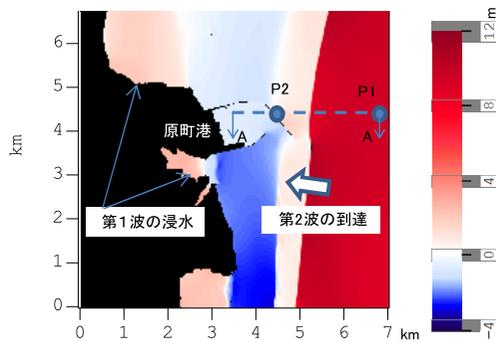


図-4 最大波の襲来(53分後)

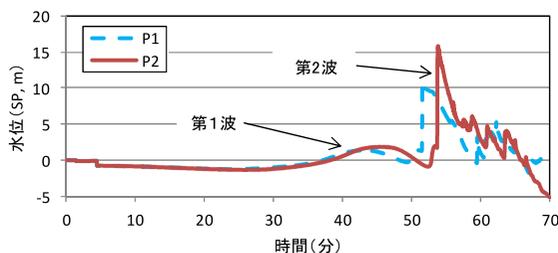


図-5 沖合および堤前解析水位

降に堤前へ到達しており、最大波はおおよそ54分以降に襲来し、15m超の高さとなって防波堤を越流している。

4. 数値波動水路による波力・流動場解析

前章で検討した津波水位・流速の時系列データを用いて、N3防波堤の安定検討を実施した。解析はCADMAS-SURF (沿岸技術研究センター, 2001年) で図-4のA-A断面を計算し、ケーソンに作用する津波波力, 越波, 流動場およびマウンド透水等を検討した。詳細を以下に記す。

(1) 解析防波堤形状・モデル

解析には原町港北防波堤のN3-14号函と同じ台形堤断面のほか, 比較のため矩形堤も念頭に入れて形状を設定する。原町港, 相馬港とも防波堤は風波で設計していたが, 防波堤建設に際しては, 相馬港の沖波周期14sに対し, 原町港では沖波周期を16sに長くするとともに摩擦増大マットを敷設して設計に裕度を与えた経緯がある。解析防波堤断面 (Case1,3~6) は, 設計波周期14sと16sの台形堤および矩形堤とし, 合田式により算定した風波による滑動安全率を1.2程度に一致させるよう設定した。その他, マウンド基礎捨石およびマウンド被覆ブロック (アクロポッド) は, ポーラスモデルで再現し, 透水性を考慮する。アクロポッドは空隙の大きい構造なので, その影響を見るため, 空隙率を小さくした検討 (Case5,6) も一部実施した。検討条件を表-1, 検討断面を図-6に示す。Case2が原町港の台形堤 (N3-14号函) と一致している。原町港の台形堤は, 上部斜面部からの越波を低減させる観点から, 矩形堤に比べて上部工高は2倍としている。また, 上部工斜面部では水平波力を半分とする設計を計画当時の基準に基づき設定しており, 更に水平波力の鉛直下向き成分を考慮できるため, 同じ設計波に対しては堤体幅が狭く, 重量が小さい経済断面となる。設計風波に対しては伝達率・透過率が水理実験よりほぼ同等となることが報告されている (奥野ら, 1994)。

解析はNavie-Stokes方程式を直接解き, 自由表面境界にVOF法を適用するCadmas-Surfによる断面計算を行い, 透水層に対しては, Dupuit-Forchheimer則を適用した。解析は沖合P1地点における非線形長波解析水位・流速から芝ら (1993) の方法で進行波成分を抽出し, 最大波が計算できる時間帯について解析境界から造波ソースで入射させた。なお, 津波は防波堤法線に対して斜めに入射しているが, ここでは防波堤 (N3-14号函) 正面から入射する単純化した断面設定にしている。解析に用いたモデル断面例を図-7, 入射に用いた進行波水位時系列を図-8に示す。計算は第1波および最大波が十分解析できる地震発生後35分-68分とした。なお, 東北地方太平洋沖地震後の時点における累積地盤変動量を勘案して, 防波堤前背面の解析潮位を設定している。

表-1 数値波動水路検討条件

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
形状	台形堤		矩形堤		台形堤	
設計波周期	14s	16s	14s	16s	16s	16s
形状(m)	B1=13.10	B1=14.85	B3=19.50	B3=22.2	B1=14.85	B1=14.85
*図-6参照	B2=18.74	B2=20.49			B2=20.49	B2=20.49
重量[kN/m]	6369.2	7148.9	7148.2	8368.4	7148.9	7148.9
アクロポッド空隙率	0.57(14.5t) / 0.54(9.2t)				0.28/0.27	0.01/0.01

入射境界 : 造波ソース岸側・沖側境界 : 透過境界  
 透過層設定 : Dupuit-Forchheimer則, Cd=1.0 (※捨石の空隙率は0.44とした)  
 解析格子 : dx=1.0m, dz=0.5m (防波堤周辺)

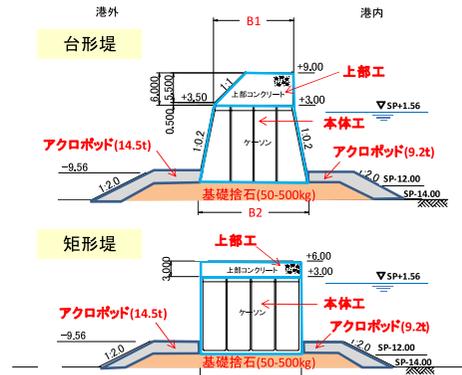


図-6 検討断面

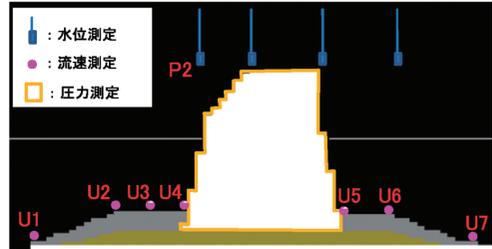


図-7 解析モデル断面例 (Case2)

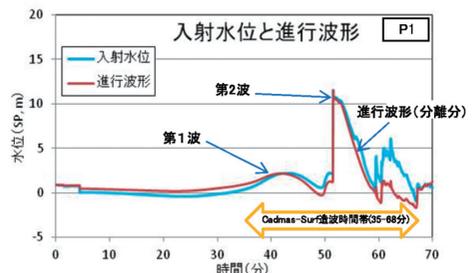


図-8 入射に用いた進行波水位時系列

(2) 解析結果

a) 津波水位

防波堤堤前での解析水位時系列列を図-9に示す。非線形長波による解析結果に対し, 最大波の波峰はやや分裂

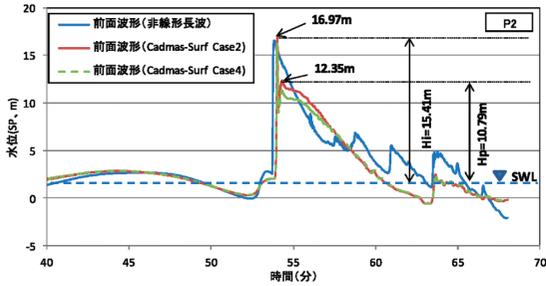


図-9 N3堤前解析水位 (Case2, Case4)

して先鋭化しており、各検討断面を乗り越える規模となった。非線形長波解析で見られる後続波による水位の極大は、先に津波が到達した北防波堤先端方向からの反射波と考えられ、断面解析では再現しえないが、防波堤の安定検討には影響しない大きさである。

b) 津波波力

解析された堤体周面の波圧分布から滑動安定性を照査した。表-2に照査結果をまとめる。また滑動安全率が最小になった最大波到達時から越流、マウンド周辺の流速が最大となる時までの解析スナップ例を図-10に示す。台形堤 (Case2) では最大波が上部工に乗り上げた時点、矩形堤 (Case4) では港外側へ射出した時に安全率が最小となった。

波力最大時の波圧分布を図-11に比較する。参考までにCase2における津波ピーク時および後続波 (図-9参照) の設計波圧を併記した。Case2の台形堤上部斜面は、矩形堤天端より高い位置まで設計されており、矩形堤より水平波力の作用面積が大きい。また堤体断面積も矩形堤より小さいため、水平波力と重量の観点からは滑動合成波力は台形堤が大きくなる。一方、台形堤は、上部斜面および台形部分に押し込み力が作用することと、矩形堤よりも底板幅が小さい設計断面となるため揚圧力が若干小さくなる点からは滑動合成波力が小さくなる方向へ働く。結果として設計波周期14sのケースでは台形堤の安全率が矩形堤を上回り、16sのケースは矩形堤の設計重量が大きく増えたため、逆に矩形堤の安全率が高くなった。

本検討断面において、台形堤斜面部に作用する鉛直下向きへの押し込み力は、水平波力の5割強もの大きさになった (Case1,2;静水圧込)。矩形堤では津波越流時においてもこの押し込み力はほとんど効かず、ほぼ同重量の台形堤 (Case2) と矩形堤 (Case3) を比較した場合、この押し込み力の効果で前者の滑動安全率の方が15%程度高くなった。建設コストの観点からは風波のみならず今回のような設計超過津波に対しても台形堤が有利と考えられる。なお、設計上は考慮されていない摩擦増大マットの効果を検討した滑動安全率も表-2に併記しているが、

表-2 数値波動水路による照査結果

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
形状	台形堤		矩形堤	
設計波周期	14s	16s	14s	16s
重量[kN/m]	6369.2	7148.9	7148.2	8368.4
滑動安全率*	$\mu = 0.6$	1.02	1.13	0.98
	$\mu = 0.8$	1.36	1.51	1.31
最大流速[m/s]	3.02	3.46	5.13	5.35
イスバッシュ式限界流速[m/s]	5.56			

ケース	Case5	Case6
形状	台形堤	
アクロボット空隙率	Case2の1/2	0.01
設計波周期	16s	
重量[kN/m]	7148.9	
滑動安全率*	$\mu = 0.6$	1.11
	$\mu = 0.8$	1.48
最大流速[m/s]	3.39	3.55
イスバッシュ式限界流速[m/s]	5.56	

\*  $\mu = 0.6$  : 摩擦増大マット無  
 $\mu = 0.8$  : 摩擦増大マット有

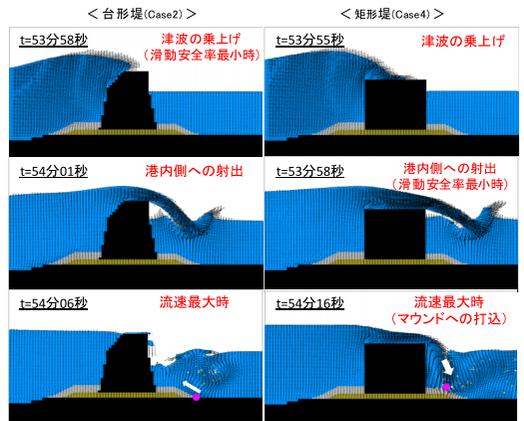


図-10 解析領域と適用式

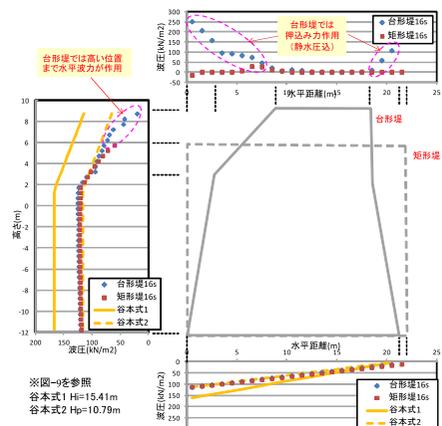


図-11 波圧分布 (Case2台形堤およびCase4矩形堤)

33% (=摩擦係数比0.8/0.6) もの安全率向上が見込めるため、いずれのケースでも1を上回っている。設計風波周期を16sとしたことと併せ、設計に裕度を与えたことが、原町港の防波堤ケーソンの安定性に寄与したと言える。また被覆ブロック空隙率を変更したケースの比較 (Case2, Case5 および Case6) から、空隙が大きいアクロポッドを用いた基礎マウンドはケーソン安定性に若干効果が見られる。これは空隙が大きいためケーソン底面流速が増大することで、揚圧力が若干低減したことによる。

### c) マウンド周辺の流動場

防波堤マウンドの洗掘危険性に関して、マウンド周辺における解析流動場から検討する。解析した各ケースとも越流した津波の射出によって港内側のマウンド部周辺の流速が大きくなった。また被覆工も港内側の方が軽い (アクロポッド9.2t型)、ここでは港内側マウンド法肩または法尻部のブロック安定性を検証する。検討は以下のイスバッシュ式から逆算される限界流速値と解析による最大流速値を比較する。

$$M = \frac{\pi \rho U_d^6}{48 g^3 y_d^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $M$ : 捨石の安定重量、 $\rho$ : 捨石の密度、 $U_d$ : 捨石の上面における流速、 $g$ : 重力加速度、 $y_d$ : イスバッシュの定数、 $S_r$ : 捨石の比重、 $\theta$ : 斜面勾配、である。イスバッシュ定数は、岩崎ら (1984) に従い、1.08とした。検討結果は表-2に記載済みである。台形堤よりも矩形堤の方が解析最大流速は大きく、(1)式の限界流速値に近い場合、マウンド洗掘につながる懸念がある。図-10のスナップにも示した通り、原町港の港内側マウンド幅は、津波の射出に対して狭く、上部工を越流してきた噴流が直接マウンドに作用することは無かった。一方で天端の低い矩形堤は、越流する津波水量が多い上に、越流の継続時間も長い。そのため法面で大きな流速を解析するに至った。本研究における台形堤と矩形堤の比較からは、両堤の高低差が、洗掘安定性に影響したといえ、上部工天端が高く、マウンド面までの距離が長い台形堤がマウンド洗掘安定性の面でも有利となった。

## 5. おわりに

本研究の主要な結論を以下にまとめる。

(1) CADMAS-SURFの解析波力から滑動安全率を算定した。一般的な設計法による矩形ケーソン (設計周期14s, 摩擦係数0.6) で滑動安全率は0.983となるが、原町の斜面堤では1.51と裕度がある。原町港では周辺港湾と比較して設計沖波の周期が大きく、摩擦増大マットの使用等、設計に裕度を与えていたことが滑動安定性に寄与したと考えられる。

- (2) 台形堤と重量がほぼ同等の矩形堤は、台形堤より滑動安全率が15%程度下がって1を下回る。このことから、台形堤に作用する波力の鉛直成分の存在が風波だけでなく津波に対して滑動安定性向上に寄与したと言える。
- (3) マウンド被覆ブロックの空隙率を変えた解析からは、アクロポッドのように空隙の大きい材料を用いた場合、ケーソン底面の流速が増すことで揚圧力が若干低減するため、滑動抵抗に寄与することが示唆された。
- (4) 矩形堤では堤体背後のマウンドに作用する流速が大きくなり、一部で5m/sを越えた。イスバッシュ式からはアクロポッド (9.2t) の安定限界に近い流速値であり、一般的な重量の被覆石 (~1t程度) を使った場合、マウンド洗掘の危険性がある。また台形堤ではケーソン天端とマウンドの距離が大きく、直接マウンドへ越流水が作用しなかったことと、被覆ブロック重量が比較的大きかったことが洗掘を防ぐ方向に働いたと言える。
- (5) 本研究結果から津波に対しねばり強い防波堤建設には、設計裕度を上げることが一策に考えられる。原町港建設時、摩擦増大マットを導入に際して、マット敷設費用と被災時の防波堤復旧を考慮したライフサイクルコスト分析を実施して裕度設定を行ったことを付記する。

## 参考文献

- 相田 勇 (1977): 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究書叢報, Vol. 52, pp. 71-101.
- 岩崎敏夫・真野 明・中村武弘・堀越伸幸 (1984): 潜堤のマウンド材およびプレバックド堤に作用する定常流流体力に関する実験的研究, 海工論文集, 第31巻, pp. 527-531.
- 沿岸技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, 296pp.
- 奥野敏彦・村野清一郎・安部修司・北松治男 (1994): 原町火力防波堤における台形ケーソン上部斜面堤の開発について, 電力土木, No. 251, pp. 20-29.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998): GISを利用した津波遡上計算と被害予測, 海工論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- 斉藤知秀・内海 博 (2012): 2011年東北地方太平洋沖地震津波における防波堤の安定性に関する検証について, 土木学会第67回年次学術講演会, pp. 435-436.
- 斉藤知秀・森 吉之・内海 博 (2012): 東日本大震災による火力発電所土木構造物の被害と対策, 電力土木, No. 360, pp. 7-11.
- 芝 和彦・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 波浪場と海浜縦断地形変化の非線形数値計算法, 海工論文集, 第40巻, pp. 376-380.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011): 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会 予稿集, 103pp.
- (独) 原子力安全基盤機構耐震安全部 (2011): 原子力事業者が実施した平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の再現計算結果等に係るクロスチェック解析, 64pp.
- Mansinha, L. and D.E.Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol.61, pp.1433-1440.