

3.2 地震による外力・作用の評価・分析

3.2.1 地震動

平成23年東北地方太平洋沖地震は、三陸沖から茨城県沖に至る長さ約450km、幅約200kmの巨大な震源域が破壊し、日本の観測史上最大のモーメントマグニチュード M_w 9.0の地震となった¹⁾。気象庁の発表による遠地実体波をもとにした本震のすべり量分布とすべりの時間分布を図-3.2.1.1に示す¹⁾。図に①②③で示される大きな破壊が宮城県沖で2回、ついで茨城県沖で1回の計3回発生し、特に2番目の破壊が大きかったことが示されている。宮城県沖では30mを超える大きなすべりが発生したと見られる。以下、3.2.1.1ではこのような震源域の破壊過程によって生じた地震動の特性について、3.2.2.2では強震記録の分析に基づくプレート境界型地震を想定した設計地震動の分析検討について述べる。なお、ダムで観測された地震動及び建築物で観測された地震動の分析に関しては、それぞれ、3.3.4(4)および3.3.9.2(1)を参照されたい。

3.2.1.1 観測された地震動の特性

(1) 地震動強さの分布と加速度時刻歴波形

図-3.2.1.2は、国土交通省地震計ネットワーク²⁾で得られたSI値（スペクトル強度：一般的な構造物がどれだけ大きく揺れるかを表す地震動強度の指標）の分布とSI値が70cm/s以上（震度6強以上に相当）となった観測点の観測値を示したものである。図中、PGAは最大加速度を表す。震源域の大きさに対応して、

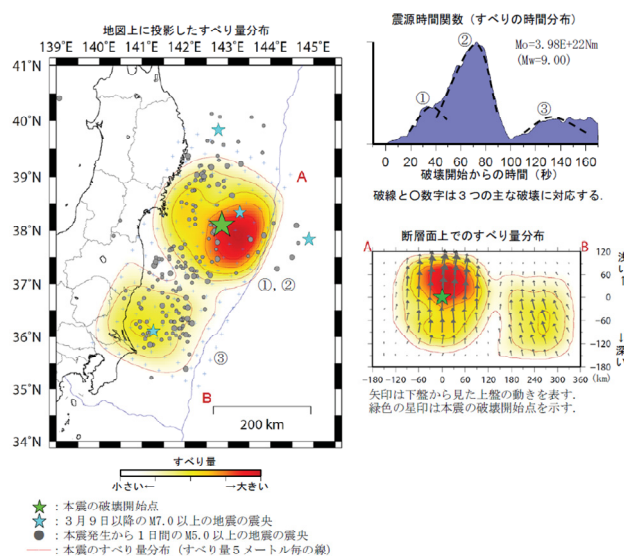


図-3.2.1.1 気象庁による本震のすべり量分布¹⁾

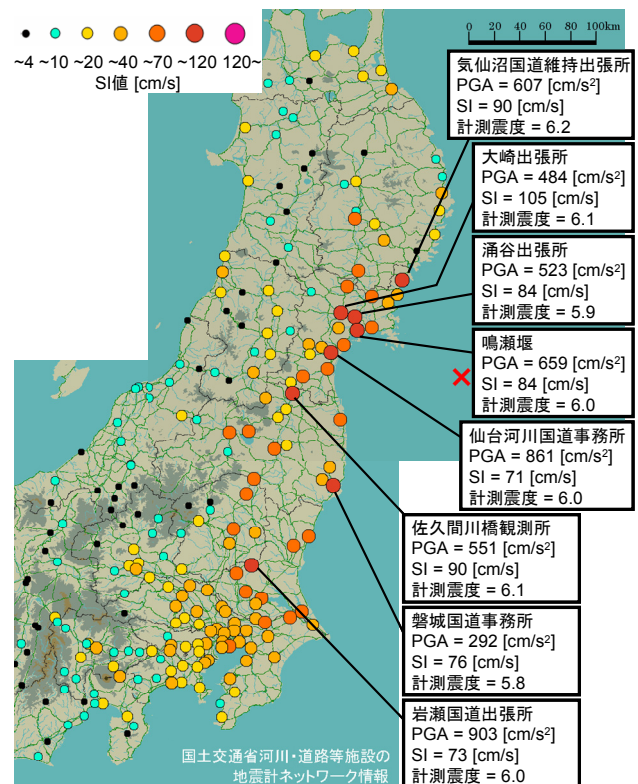
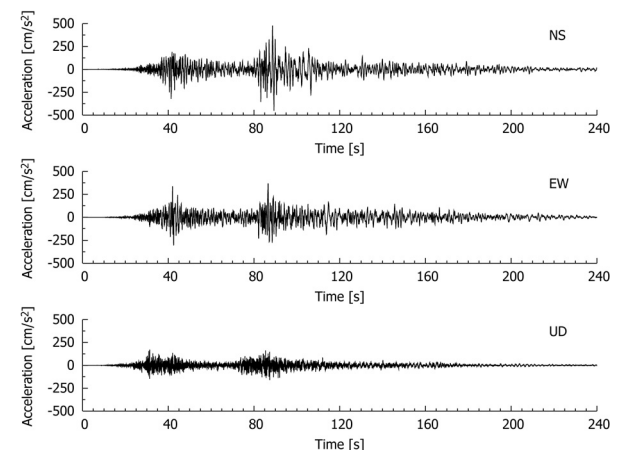
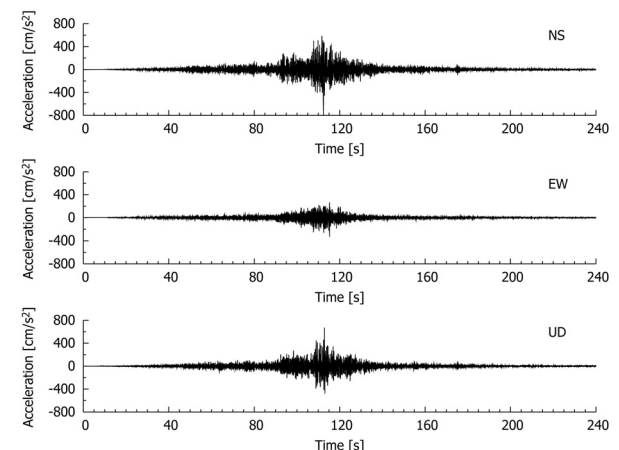


図-3.2.1.2 国土交通省地震計ネットワーク²⁾観測値



(a) 大崎出張所



(b) 岩瀬国道出張所

図-3.2.1.3 代表地点の加速度時刻歴波形

宮城県北部から茨城県南部の広い範囲で強い地震動が観測されていることがわかる。

このうち、大崎出張所（宮城県大崎市）および岩瀬国道出張所（茨城県桜川市）観測点において観測された、本震の加速度時刻歴波形を図-3.2.1.3 に示す。大崎出張所では加速度波形に特に振幅が大きい波群が2つみられる。図-3.2.1.1 に示したとおり、今回の地震における震源域の破壊は、震源付近での2つの破壊と茨城県沖での1つの破壊が160秒程度の時間をかけて発生しており、加速度時刻歴における2つの波群は、震源付近の2つの破壊によるものと考えられる。

一方、岩瀬国道事務所では複数の波群は見られない。震源付近の2つの破壊から発生した地震波は伝播の過程で減衰し振幅が小さくなっており、茨城県沖の破壊から発生した地震波が卓越していると考えられる。

(2) 加速度応答スペクトル

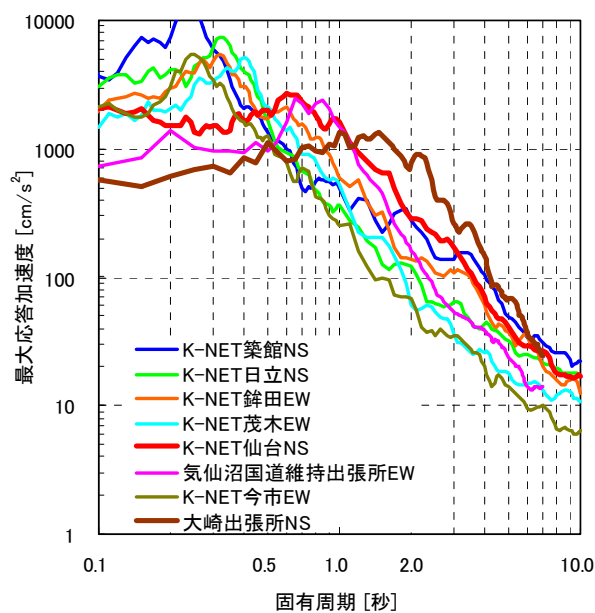
東北地方太平洋沖地震の際に（独）防災科学技術研究所 K-NET³⁾および国土交通省地震計ネットワークで得られた強震記録から、計測震度が大きい8記録の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を比較したものが図-3.2.1.4(a)である。また、1995 年兵庫県南部地震以降の近年の主要な地震で得られた代表的な強震記録の加速度応答スペクトルと比較して同図(b)に示す。

今回の地震では多く記録が観測されており、震源からの距離や地盤条件に応じて、短周期(周期 0.5 秒以下)、中間周期(周期 0.5～1 秒)、やや長い周期(周期 1 秒以上)、それぞれにピークのある記録が観測されている。橋や中低層建築物などの構造物への影響が大きい周期 1～2 秒程度の加速度応答スペクトルに着目すると、構造物に甚大な被害を生じた兵庫県南部地震（鷹取駅）と比較して同程度または低い値である。

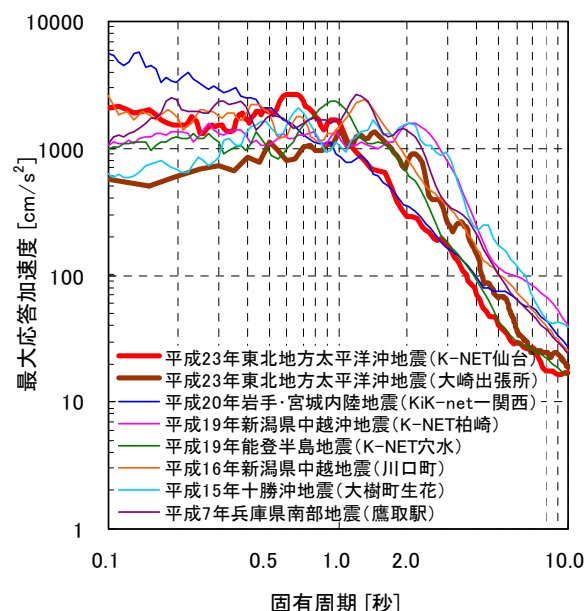
なお、K-NET 築館は、気象庁の震度情報で震度 7 とされた唯一の観測記録であるため、余震観測等による表層地盤の増幅特性に関する各種の調査が実施されている。その結果、スペクトルの周期 0.2～0.3 秒に見られる卓越周期には局所的な地形等の影響が見られ、この観測記録は周辺地域を代表するものではないとする報告もある⁴⁾。

(3) 地震動の継続時間

この地震の揺れの大きな特徴の一つは、震源域の破壊時間の長さに対応して継続時間が長いことである。地震動の継続時間を過去の主な記録と比較して図-3.2.1.5 に示す⁵⁾。継続時間には種々の算出方法があ



(a) 今回の地震（減衰定数 0.05）



(b) 主要な地震との比較（減衰定数 0.05）

図-3.2.1.4 加速度応答スペクトルの比較

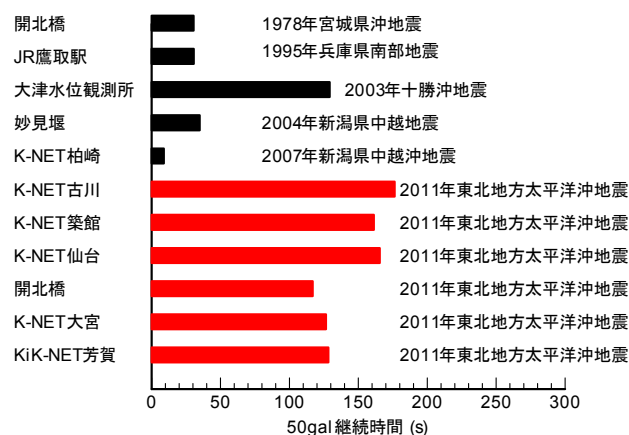


図-3.2.1.5 地震動の 50gal 継続時間の比較⁵⁾

るが、ここでは観測記録の水平2成分をベクトル合成し、初めて50galを観測した時刻と最後に50galを観測した時刻の差としている。

今回の継続時間はK-NET 古川で178秒と非常に長く、東北地方、関東地方の他の観測点においても120秒を超える継続時間が観測されている。継続時間が長い記録として過去には2003年十勝沖地震の約130秒があるが、今回の地震動はそれを上回っている。

3.2.1.2 プレート境界型地震を想定した設計地震動の分析検討

平成7年の兵庫県南部地震（気象庁マグニチュード M_J 7.3）以降、土木構造物の耐震設計ではレベル1地震動とレベル2地震動を用いた二段階設計法が一般的になってきており、例えば道路橋の耐震設計ではレベル2地震動として、プレート境界型の大規模な地震による地震動（タイプⅠの地震動）と内陸直下型地震による地震動（タイプⅡの地震動）の2種類を考慮している。

東北地方太平洋沖地震は、三陸沖から茨城県沖に至る長さ約450km、幅約200kmの巨大な震源域が破壊し、日本の観測史上最大のモーメントマグニチュード M_w 9.0の地震となった¹⁾。世界で初めて M_w 9級の巨大地震の強震記録が多数得られ、発生頻度が低く捉えられていなかった巨大地震の地震動特性の分析が可能となっている。この地震と同じプレート境界型の地震である東海地震、東南海地震、南海地震等が近い将来に発生すると考えられていること⁶⁾等を踏まえ、強震記

録の分析結果等をもとに、道路橋示方書のレベル2地震動（タイプⅠ）を見直した。

ここでは、平成24年2月に改定された道路橋示方書V耐震設計編⁷⁾のうち、上記のレベル2地震動（タイプⅠ）に係る改定に向けた検討内容を、プレート境界型の巨大地震の地震動特性を分析した例として概説する。

(1) 標準加速度応答スペクトルの改定

道路橋示方書の設計地震動は、図-3.2.1.6のような地盤種別ごとに設定された標準加速度応答スペクトルに、減衰定数別補正係数と地域別補正係数を乗じることで設定される。レベル2地震動（タイプⅠ）の標準加速度応答スペクトルは、大正12年の関東地震（ M_w 7.9）において東京周辺で生じた地震動を、近年得られた強震記録及び回帰分析法の改良によって高度化された距離減衰式^{8), 9)}を用いて推定した結果に基づき、工学的判断を加えて定めたものである。

図-3.2.1.6は、従来のタイプⅠの地震動、今回見直されたタイプⅠの地震動及びタイプⅡの地震動の標準加速度応答スペクトルを比較して示したものである。今回改定されたタイプⅠ地震動は、スペクトルのピークは従来のタイプⅠ地震動に比べて大きく、長周期側についてはタイプⅡの地震動より大きい。

また、従来のタイプⅠ地震動は堅いⅠ種地盤（良好な洪積地盤及び岩盤）よりも軟らかいⅢ種地盤（沖積地盤のうち軟弱地盤）の方がスペクトルのピークが大きく設定されていたが、改定された標準加速度応答ス

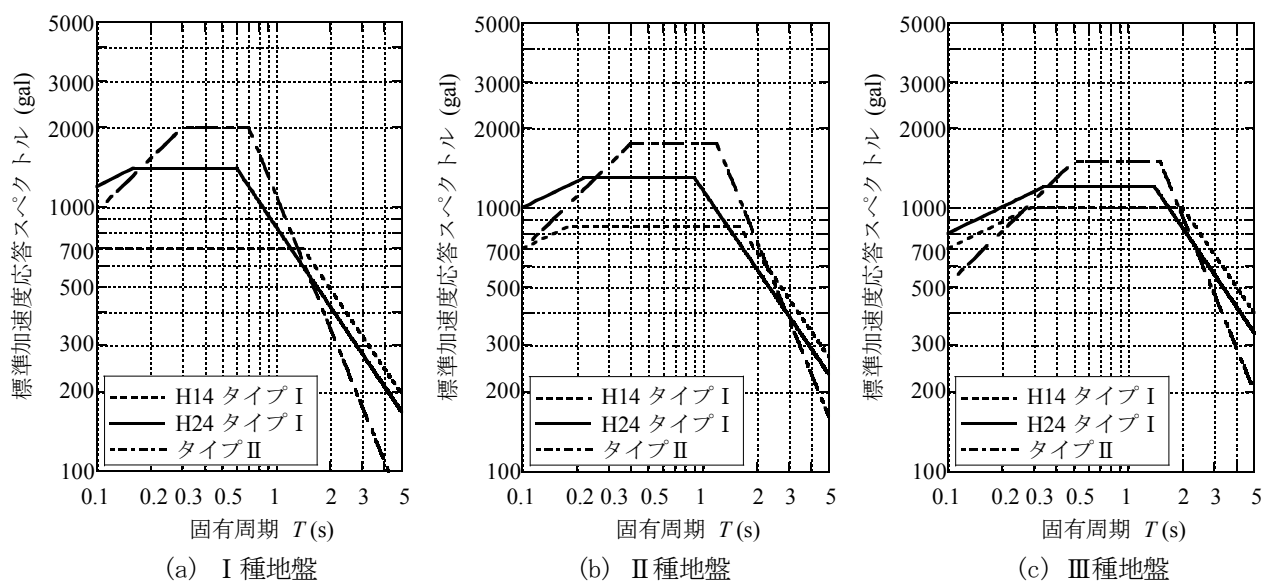


図-3.2.1.6 標準加速度応答スペクトルの比較

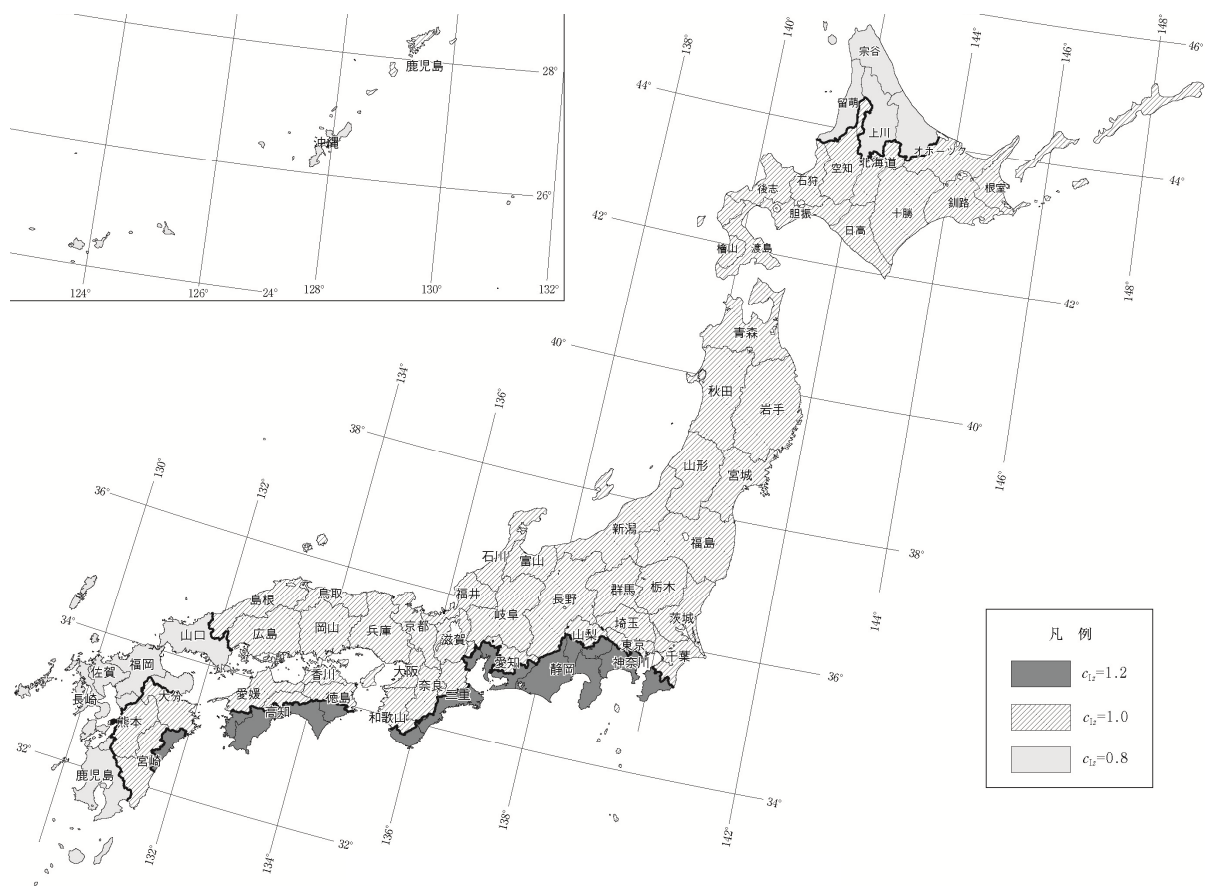


図-3.2.1.7 レベル2地震動（タイプⅠ）の地域別補正係数 c_{1z}

ペクトルでは逆転している。これは、振幅が大きい強震記録のみを用いて地盤種別ごとの地盤補正係数を算出し加速度応答スペクトルを推定した結果、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ種地盤の順に加速度応答スペクトルのピークが全体的に小さくなった結果を取り入れたものである。

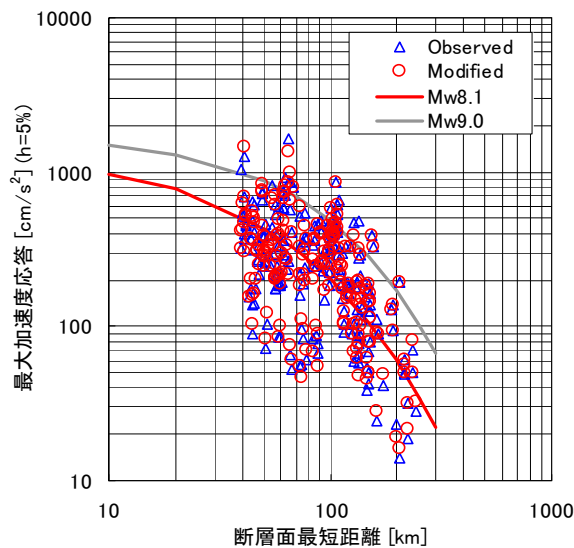
(2) 地域別補正係数の改定

標準加速度応答スペクトルの改定にあわせて、平成14年・15年の地震防災対策強化地域・推進地域の指定にあたって用いられた震源域^{10), 11)}等に関する情報をもとに、こうした地震の各地域における影響の度合いを踏まえて、従来の地域別補正係数とは別に、レベル2地震動（タイプⅠ）に対して適用する地域別補正係数を新たに設定した（図-3.2.1.7）。その際、東北地方太平洋沖地震、北海道太平洋沖の地震が連動する場合、東海・東南海・南海地震及び日向灘地震が連動する^{12), 13)}場合などの震源域が連動する影響を考慮した上で、大正12年関東地震において東京周辺で生じた地震動よりも強い影響を受けると推定される地域では地域別補正係数を1.2とした。

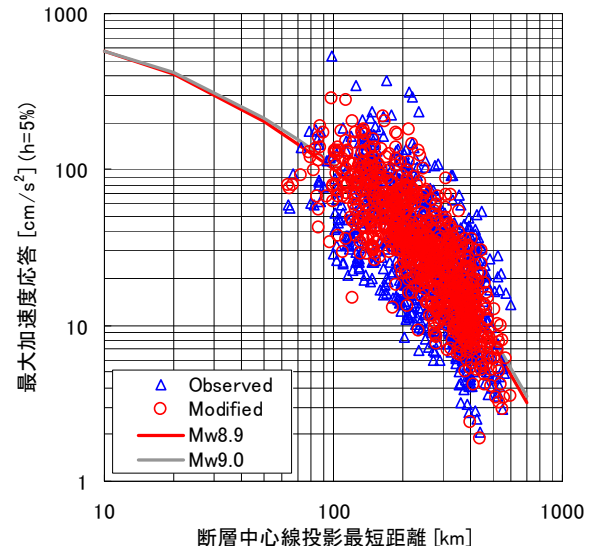
ただし、東北地方太平洋沖地震の際の観測値と距離減衰式による推定値との残差二乗和が最小となるモーメントマグニチュード M_w 8.1～8.3の地震と同程度であることがわかった¹⁴⁾。例として固有周期1秒の加速度応答スペクトル値の場合を図-3.2.1.8(a)に示す。このため、距離減衰式⁸⁾により短周期の地震動強さを算出する際には M_w 8.3を上限とした。一方、やや長周期地震動は、図-3.2.1.8(b)に固有周期3秒の加速度応答スペクトル値について例示したように、 M_w 8.7～8.9程度で残差二乗和が最小となったため、 M_w 9.0を上限とした。

(3) 動的解析に用いる加速度波形

動的解析による耐震性能の照査に用いるため、改定した標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整した加速度波形を地盤種別ごとに3波形ずつ作成した。これらは平成15年十勝沖地震と東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震記録をもとに作成したものである。

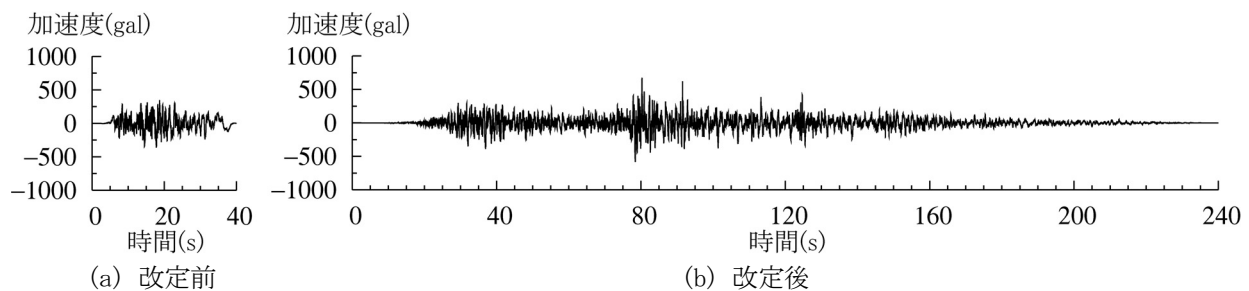


(a) 加速度応答スペクトル値（固有周期 1 秒）



(b) 加速度応答スペクトル値（固有周期 3 秒）

図-3.2.1.8 東北地方太平洋沖地震の際の観測値と距離減衰式による推定値の比較⁸⁾



(a) 改定前

(b) 改定後

図-3.2.1.9 動的解析に用いるレベル2地震動（タイプI）の加速度波形の例（Ⅱ種地盤の3波形の1つ）

改定前と改定後の加速度波形を比較した例（Ⅱ種地盤の3波形のうち1つずつ）を図-3.2.1.9に示す。改定前の波形(a)は昭和43年日向灘地震(M_J 7.5)の際に愛媛県宇和島市の板島橋周辺地盤上、改定後の波形(b)は東北地方太平洋沖地震の際に仙台河川国道事務所構内地盤上で得られた強震記録をそれぞれ振幅調整したものである。図からも明らかなように、東北地方太平洋沖地震で観測された地震動は継続時間が長い特性を有していることが特徴であるが、計算機の性能が飛躍的に向上し、継続時間の長い地震動を入力する動的解析が実務上行い得るようになったことも踏まえ、このような地震動を具体的に考慮することとした。

謝 辞

本検討では、気象庁、(独)防災科学技術研究所、JR西日本および国土交通省による観測結果を用いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第28報）、2011
- 2) 国土技術政策総合研究所ホームページ：河川・道路等施設の地震計ネットワーク情報
<http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/index.htm>
- 3) (独)防災科学技術研究所ウェブサイト：強震観測網(K-NET, KiK-net)
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 4) 山中浩明、津野靖士、地元孝輔、山田伸之、福元俊一、江藤公信：2011年東北地方太平洋沖地震の余震観測と微動探査によるK-NET築館観測点周辺の地盤増幅特性の評価、物理探査、第64巻、第6号、pp. 389-399、2011
- 5) 金子正洋、片岡正次郎、佐々木哲也、谷本俊輔：

地震及び地震動の特徴、特集・東日本大震災における海岸・河川等の被災・復旧状況、河川、No. 782、pp. 64-65、2011

- 6) 地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価、
http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm
- 7) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、丸善、2012
- 8) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A、Vol. 62、No. 4、pp. 40-757、2006
- 9) 片岡正次郎、松本俊輔、日下部毅明、遠山信彦：やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率、土木学会論文集A、Vol. 64、No. 4、pp. 721-738、2008
- 10) 中央防災会議：第4回資料、2002
- 11) 中央防災会議：第9回資料、2003
- 12) 岡村眞、松岡裕美、千田昇、島崎邦彦：見えてきた巨大南海地震の再来周期、日本地震学会秋季大会講演予稿集、p. 16、2006
- 13) Furumura, T., Imai, K. and Maeda, T.: A revised tsunami source model for the 1707 Hiei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B02308, 2011
- 14) 片岡正次郎、金子正洋：距離減衰式から逆算した東北地方太平洋沖地震のマグニチュード、日本地震工学会大会－2011梗概集、pp. 406-407、2011

3.2.2 津波

3.2.2.1 海岸

(1) 痕跡調査

1) 高さの定義

津波の高さと浸水深、痕跡高（＝浸水高）、遡上高の関係を図-3.2.2.1に示す。

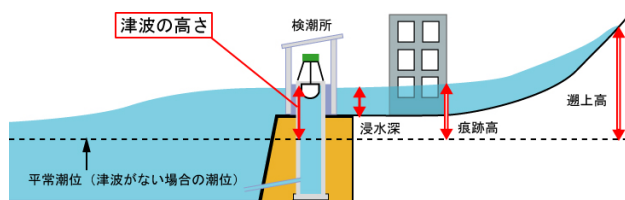


図-3.2.2.1 検潮所における津波の高さと浸水深、痕跡高、遡上高の関係（気象庁HPより）

2) 調査方法及び調査項目

下記の調査方法、調査項目及び痕跡の信頼度の判断基準は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループHPより抜粋した。

現地調査における津波高（遡上高、浸水高、港湾内での水位上昇など）の測量については一般的に以下の方法で実施する。

- ①津波高の痕跡（ウォーターマーク、漂着物、証言など）を見つける。
- ②痕跡及び周辺の写真を撮影する。
- ③GPSで位置を確認する。
- ④痕跡の汀線からの高さや距離を測量する。（汀線の測量時刻を記録すること。）

現地調査における調査項目を表-3.2.2.1に示す。

表-3.2.2.1 調査項目

場所名	出来るだけ詳しく	調査日	記録者							
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
調査地点	緯度経度 (GPS)	調査時間	測定値	信頼度	水平距離	浸水高さ/遡上高さの区別	地形勾配	潮位のまたは水準点の高さ	補正後の津波高さ	
		時分	m単位	A か D まで	m単位		度	m単位	m単位	

痕跡の信頼度の判断基準について、下記に示す。

- A:信頼度大なるもの。痕跡明瞭にして、測量誤差最も小なるもの。
- B:信頼度中なるもの。痕跡不明につき、聞き込みによ

り、周囲の状況から信頼ある水位を知るもの。測量誤差小

C:信頼度小なるもの。その他砂浜などで異常に波がはい上がったと思われるもの、あるいは測点が海辺より離れ測量誤差が大なるもの。

D:信頼度が極小なるもの。高潮、台風などの影響で痕跡が重複し、不明瞭なもの、等。

3) 調査時期及び調査機関

津波に関する現地調査において最も重要となるのは被災地に入る時期である。調査開始が遅くなると津波の痕跡が消失するとともに目撃者の記憶も曖昧になる。しかし、早すぎると救出・救援活動の妨げとなる危険性が高くなる。また、各研究者が独立して現地調査を実施すると、被害が甚大だった地域や被災形態に特徴がある地域に集中する傾向がある。そこで、被災地への負担を最小限にしながら、効果的に調査結果を得るため、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループを結成して調査地域や期間、人数などについて調整を行いながら現地調査が実施された。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループには大学や研究機関、民間企業、行政などが参加している。また、所属している学会も土木学会や地球惑星科学連合など多岐に及んでおり、様々な専門分野の協力のもとに現地調査を実施し、調査データを集約している。国総研が測定した痕跡調査結果もこの中に含まれている。

4) 調査結果

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループで集約している痕跡高及び遡上高をプロットしたものを図-3.2.2.2に示す。

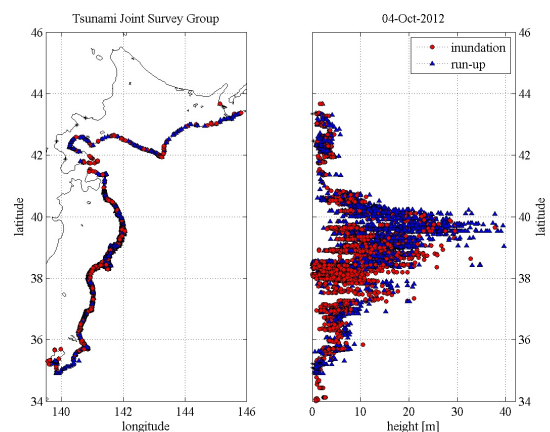


図-3.2.2.2 痕跡の沿岸分布（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ調査結果〔2012年10月4日〕）

図-3.2.2.2より宮城県から福島県にかけて浸水高及び遡上高が10mを越えているのがわかる。この区間においては、被害が甚大な箇所が多い。

上記結果及び国総研で測定した痕跡調査結果を基に、津波遡上域の地形の違う仙台平野南部、石巻平野、陸前高田、宮古市田老地区を対象に津波遡上域内の痕跡標高の遡上方向分布調査を行い、津波氾濫流の特徴を調べた。遡上傾向としては、遡上域が広い平野部では津波痕跡が遡上方向に減衰していること、平野部とは対照的に遡上域が狭い場所（陸前高田、宮古市田老地区）では津波痕跡は減衰せず、上昇する場合もあることがわかった。詳細について次に示す。

①仙台平野南部

図-3.2.2.3に仙台平野南部における津波痕跡高調査測線を示す。また、この測線毎の痕跡標高分布を図-3.2.2.4～図-3.2.2.19に示す。図-3.2.2.4 痕跡標高分布（仙台新港背後）～図-3.2.2.15 痕跡標高分布（吉田浜）より、痕跡標高は津波遡上方向に減衰していることがわかる。また、図-3.2.2.16 痕跡標高分布（笠野海岸）～図-3.2.2.19 痕跡標高分布（磯浜漁港）より、津波遡上方向への減衰が見られなくなる。これは、笠野海岸から磯浜漁港における平地部が狭くなり丘陵状の地形により津波の遡上が妨げられたためと考えられる。



図-3.2.2.3 津波痕跡高調査測線（仙台平野南部）

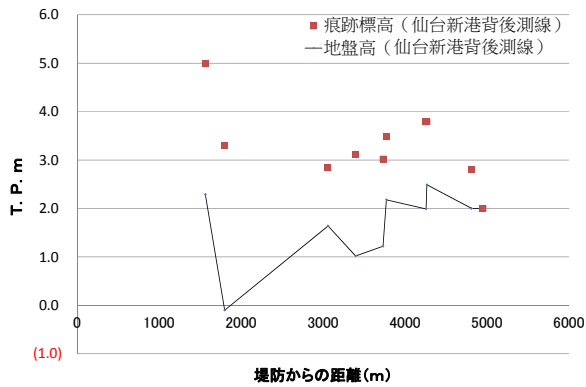


図-3.3.2.4 痕跡標高分布（仙台新港背後）

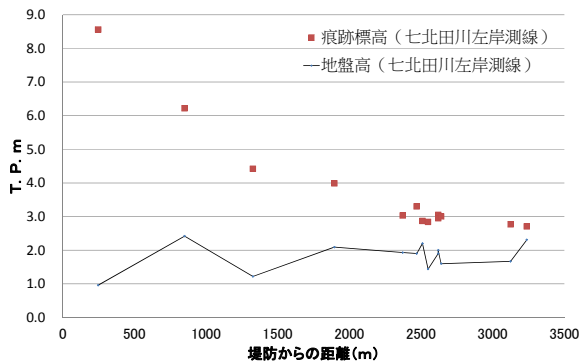


図-3.2.2.5 痕跡標高分布（七北田川左岸）

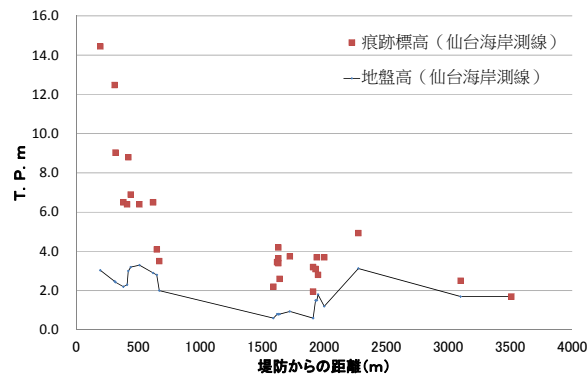


図-3.2.2.6 痕跡標高分布（仙台海岸）

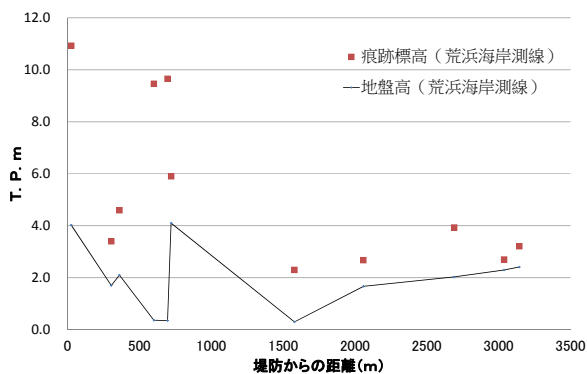


図-3.2.2.7 痕跡標高分布（荒浜海岸）

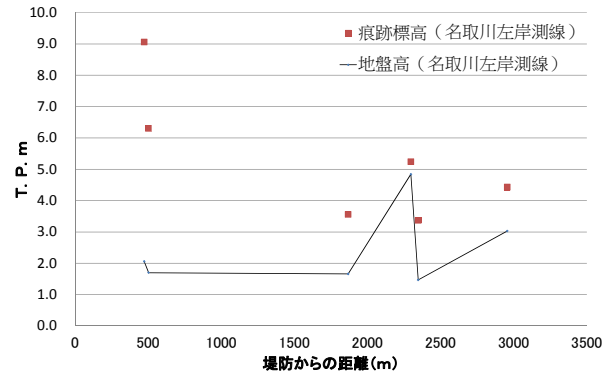


図-3.2.2.8 痕跡標高分布（名取川左岸）

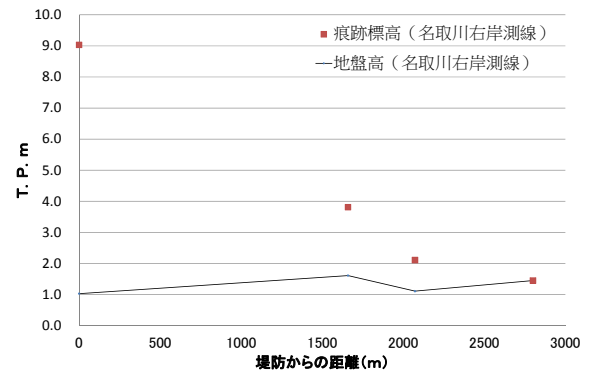


図-3.2.2.9 痕跡標高分布（名取川右岸）

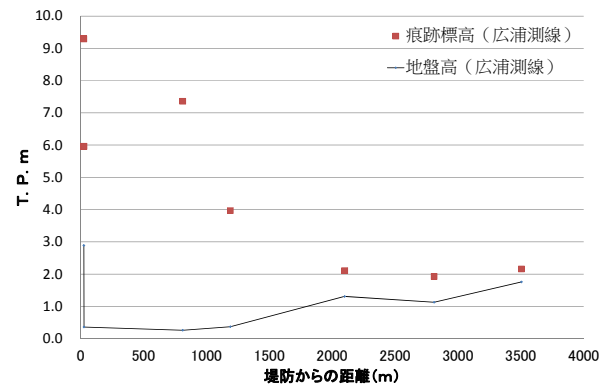


図-3.2.2.10 痕跡標高分布（広浦）

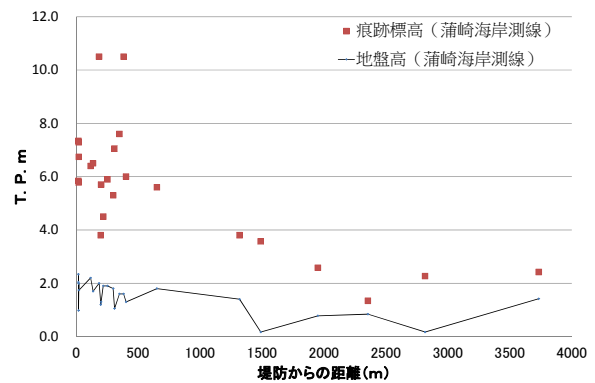


図-3.2.2.11 痕跡標高分布（蒲崎海岸）

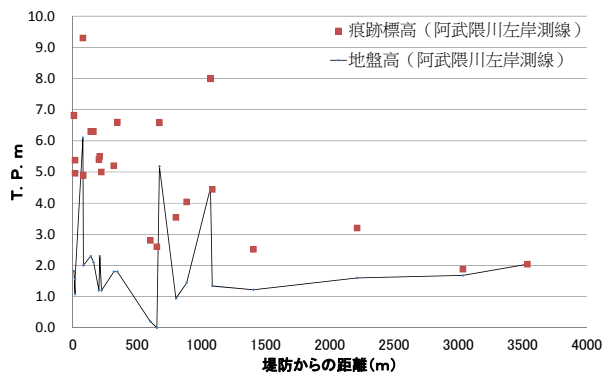


図-3.2.2.12 痕跡標高分布（阿武隈川左岸）

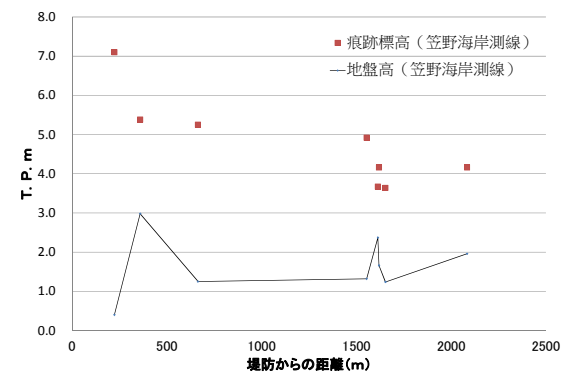


図-3.2.2.16 痕跡標高分布（笠野海岸）

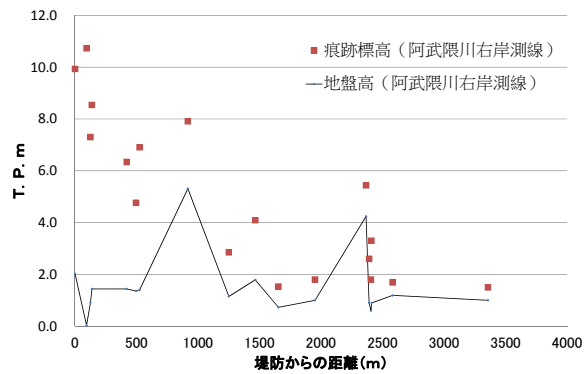


図-3.2.2.13 痕跡標高分布（阿武隈川右岸）

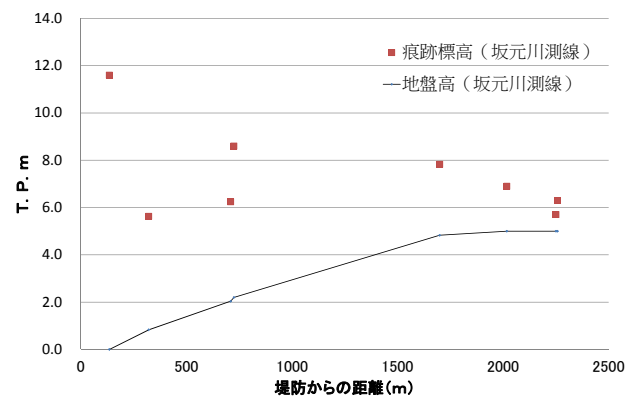


図-3.2.2.17 痕跡標高分布（坂元川）

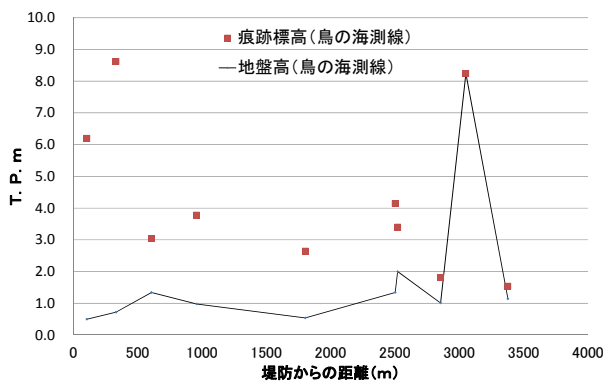


図-3.2.2.14 痕跡標高分布（鳥の海）

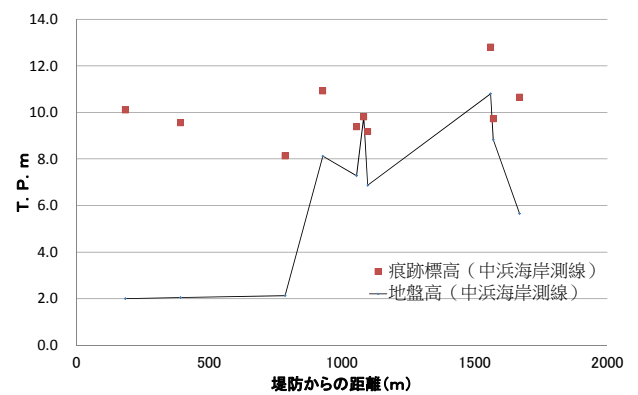


図-3.2.2.18 痕跡標高分布（中浜海岸）

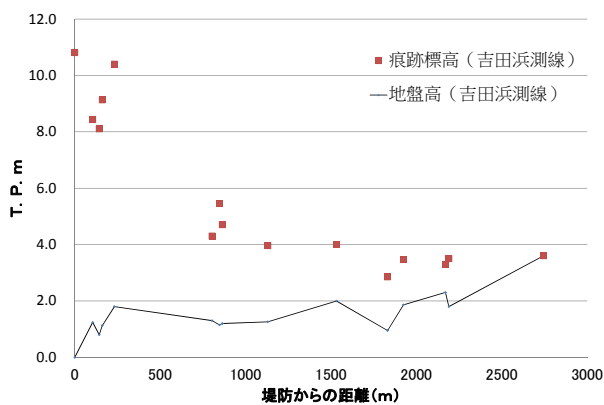


図-3.2.2.15 痕跡標高分布（吉田浜）

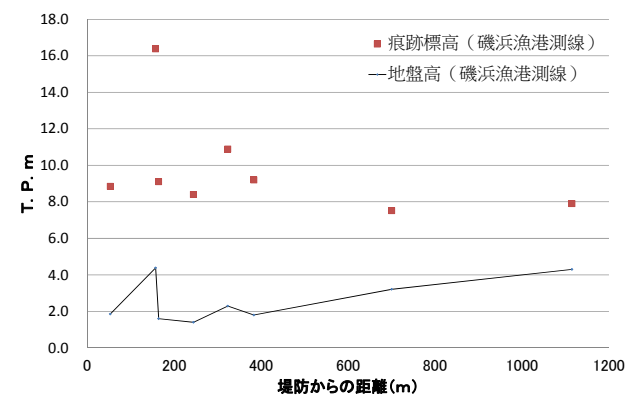


図-3.2.2.19 痕跡標高分布（磯浜漁港）

②石巻平野

図-3.2.2.20に石巻平野における津波痕跡高調査測線を示す。また、この測線毎の痕跡標高分布を図-3.2.2.21, 22に示す。図-3.2.2.21 痕跡標高分布（浜市）

市）及び図-3.2.2.22 痕跡標高分布（大曲）より仙台平野と同様に痕跡標高が津波遡上方向に減衰していることがわかる。

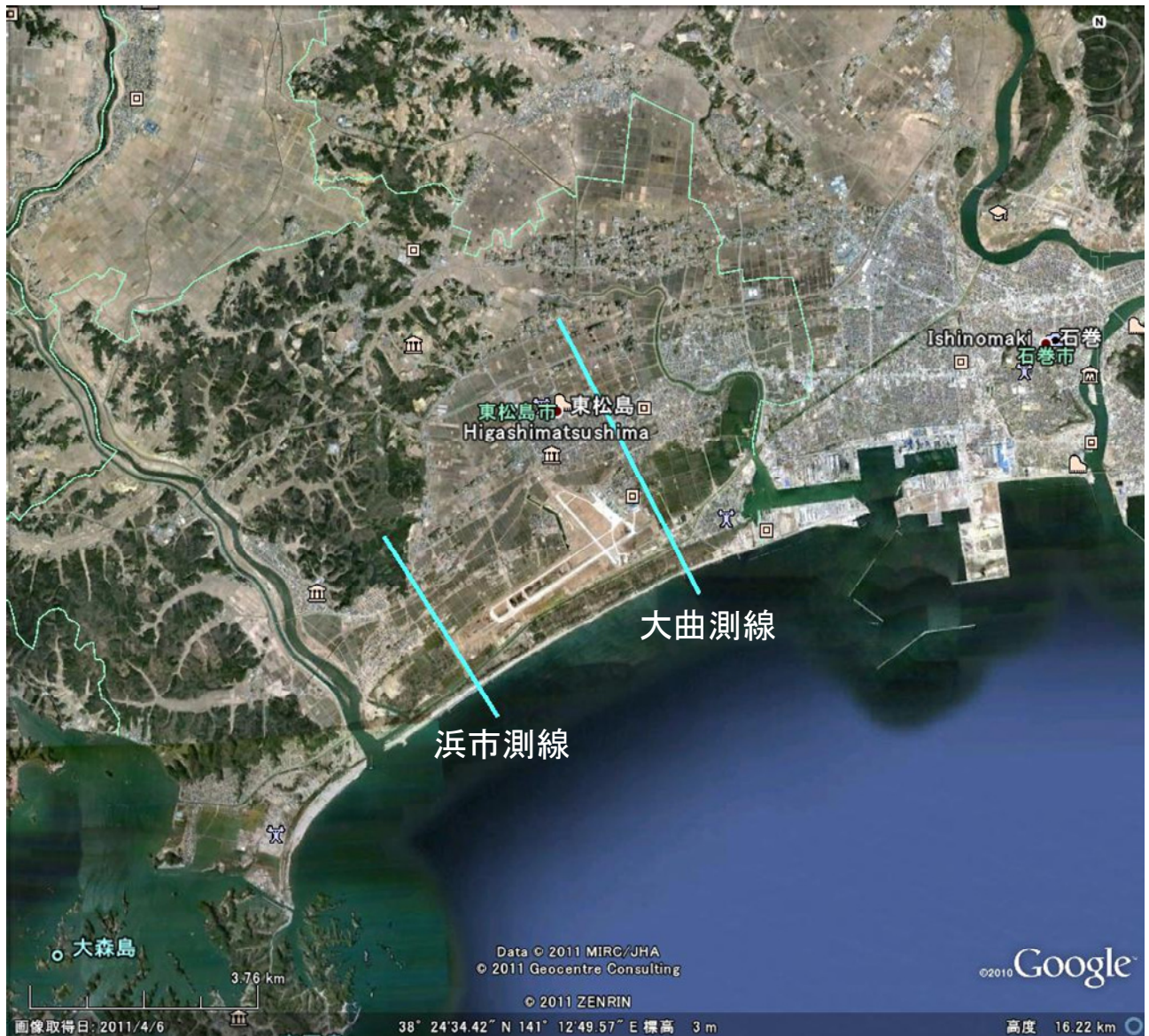


図-3.2.2.20 津波痕跡高調査測線（石巻平野）

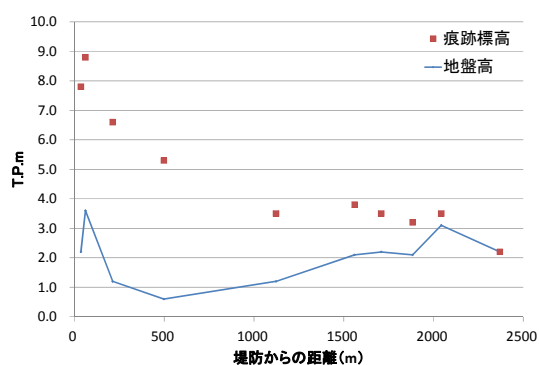


図-3.2.2.21 痕跡標高分布（浜市）

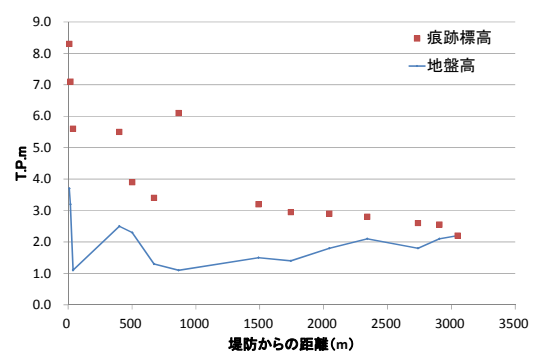


図-3.2.2.22 痕跡標高分布（大曲）

③陸前高田

図-3.2.2.23に陸前高田における津波痕跡高調査測線を示す。また、この測線毎の痕跡標高分布を図-3.2.2.24に示す。図-3.2.2.24 痕跡標高分布（陸前高田）の測線1～3の結果より、痕跡標高の津波遡上

方向への減衰は見られず、仙台平野南部の測線と同様に痕跡標高が平行若しくは上昇していく特徴が見られた。これは、平地部が狭く丘陵状の地形により津波の遡上が妨げられたためと考えられる。



図-3.2.2.23 津波痕跡高調査測線（陸前高田）

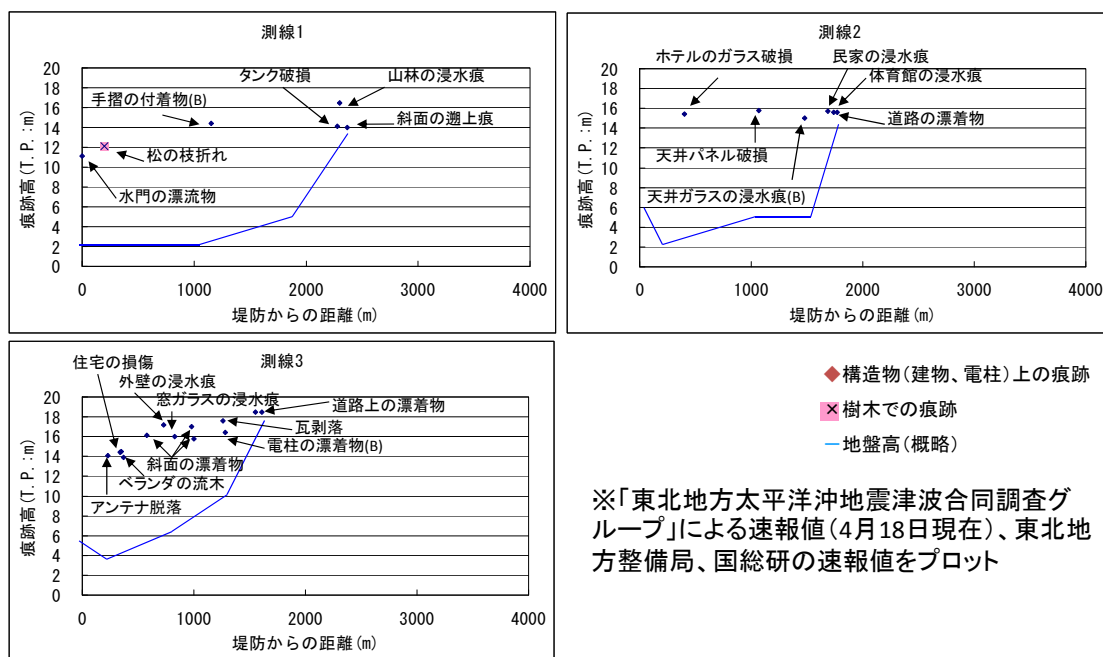


図-3.2.2.24 痕跡標高分布（陸前高田）

④宮古市田老地区

図-3.2.2.25に宮古市田老地区における津波痕跡高調査測線を示す。また、この測線毎の痕跡標高分布を図-3.2.2.26に示す。図-3.2.2.26 痕跡標高分布（宮古市田老地区）の測線1～2の結果より、痕跡標

高の津波遡上方向への減衰は見られず、仙台平野南部及び陸前高田の測線と同様に痕跡標高が平行若しくは上昇していく特徴が見られた。これは、陸前高田と同様に平地部が狭く丘陵状の地形により津波の遡上が妨げられたためと考えられる。

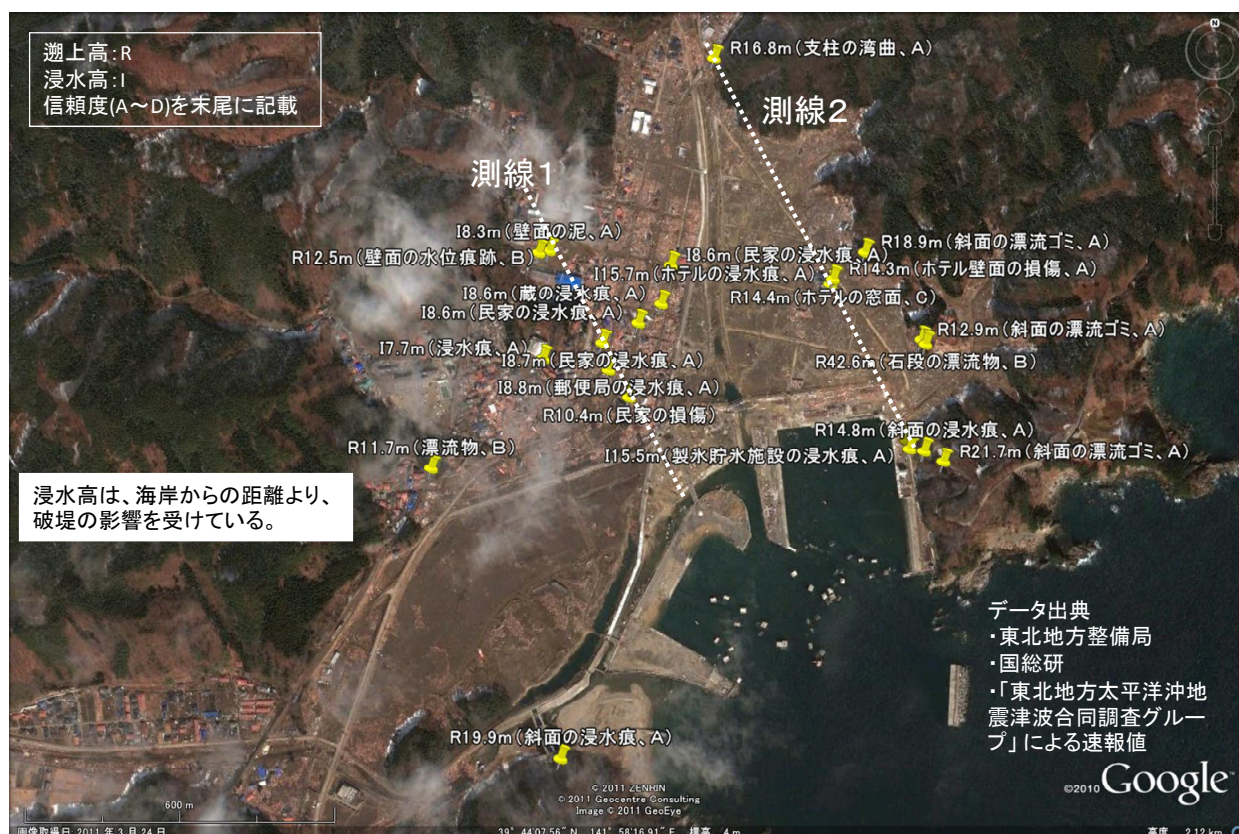
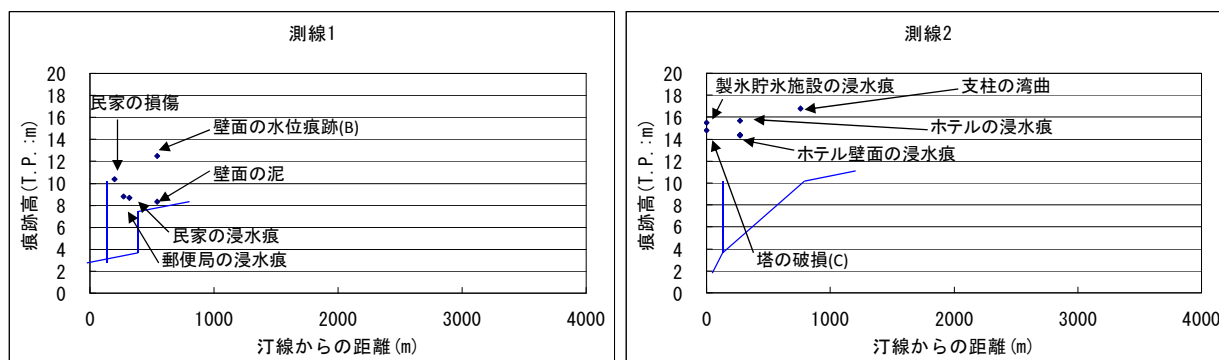


図-3.2.2.25 津波痕跡高調査測線（宮古市田老地区）



※「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による速報値（4月18日現在）、東北地方整備局、国総研の速報値をプロット

- ◆ 構造物(建物、電柱)上の痕跡
- × 樹木での痕跡
- 地盤高(概略)

図-3.2.2.26 痕跡標高分布（宮古市田老地区）

5) まとめ

以上により下記のことがわかった。

- ①遡上域が広い平野部では津波痕跡標高が津波遡上方向に減衰すること
- ②平野部とは対照的に遡上域が狭い場所では、津波痕跡標高は津波遡上方向に対し減衰せず、上昇する場合もあること（これは地表・建物等地物との摩擦等により減衰する前に、丘陵状の地形により津波の遡上が妨げられたため流れの運動エネルギーが位置エネルギーに変化したものと考えられる）

(2) 津波浸水計算による遡上津波の特性把握

1) 解析の方法

陸上に遡上した津波の特性を把握するため、仙台平野南部、陸前高田市、宮古市田老地区を対象に、海岸堤防がない条件及びある条件で津波浸水計算を行い、浸水深や流速を比較した。

東北地方太平洋沖地震の断層モデルの一つである藤井・佐竹モデルver4.0¹⁾を用いて、Okada (1992)²⁾の手法により地盤変位量を算定し、それを初期波形として、非線形長波方程式に基づく平面二次元モデルで津波浸水計算を行った。ただし、断層モデルのパラメータのうちすべり量については、各地区の浸水状況の再現性を高めるためにチューニングを行っている。また、東北地方太平洋沖地震では、地殻変動による地盤変動が顕著であったことから、国土地理院の実測値に基づいて、被災前の標高データから仙台平野南部で0.5m、陸前高田市で0.7m、宮古市田老地区で0.5mだけ一律に沈降させた。

2) 仙台平野南部を対象とした解析

津波浸水計算の計算条件を表-3.2.2.2に示す。計算格子間隔は、波源域を含む沖合から1350m、450m、150m、50m、10mと対象地域に近づくにつれて小さくするように設定した。

表-3.2.2.2 計算条件（仙台平野南部）

項目	内容
計算格子間隔	（波源～沿岸）1350m, 450m, 150m, 50m, 10m
計算時間	3 時間
計算時間間隔	0.1 秒
潮位条件	朔望平均満潮位（T.P. +0.76m）
陸上遡上における波先端の打ち切り水深	10 ⁻⁵ m
粗度係数	0.025
越流境界（防波堤、堤防等）	本間公式による越流計算

また、津波来襲時の潮位（T.P. -0.42m）、海岸堤防等が破壊されない条件での津波浸水計算を別途実施し、177点の痕跡データを用いて相田（1977）³⁾の幾何平均K、幾何標準偏差 κ を算出した結果、藤井・佐竹モデルver4.0のすべり量を1.2倍にすることで概ね良好な再現性（K=0.87、 κ =1.34）が得られること

が確認された。

海岸堤防等の構造物条件は、図-3.2.2.27に示す3ケースを設定した。ケース1では、海岸堤防等はないものとした。ケース2では、海岸堤防等は東北地方太平洋沖地震時点での高さとしており、海岸堤防の高さは3.0～7.2mとなっている。ケース3は、相田（1977）による昭和三陸地震の断層モデルを用いた津波浸水計算によって得られた対象地域での最高水位に相当するT.P. +4.0mを海岸堤防等の高さとした。

図-3.2.2.28は、仙台市内に設定した岸沖方向の断面において、水深10m地点、施設前面（海岸堤防の海側）、施設背面（海岸堤防の陸側）における水位の時間的変化を示している。最高水位は、第一波の到達直後に発生しており、水深10m地点及び施設前面ではケース2、ケース3、ケース1の順に大きく、施設背面ではその逆の順になっている。海岸堤防によって、その海側の水位が上昇する一方、その陸側の水位が低下しているものと考えられる。

図-3.2.2.29は、各ケースの最大浸水深の平面分布を示している。浸水範囲についてはケース間の違いが明瞭ではないが、最大浸水深についてはケース2、ケース3、ケース1の順に小さく、堤防が高いほど最大浸水深が小さくなる傾向が認められる。なお、浸水域中央よりやや西側において最大浸水深が大きく変化する箇所が南北に蛇行しているが、これは仙台東部道路及び常磐自動車道の盛土の影響である。

図-3.2.2.30は、各ケースの最大流速の平面分布を示している。仙台東部道路や常磐自動車道に近づくにつれて、ケース1と比べ、ケース2及びケース3の最大流速が小さくなる傾向が見られる。

図-3.2.2.31は、ケース1とケース2について、浸水域内に設定した3点における浸水深 h と流速 v との関係を5秒間隔で出力したものである。図中には、フルード数0.5、1、2となる浸水深と流速の関係式も示している。最も海側にある地点①では、津波先端部の到着直後に流速が大きく、その流速が概ね保たれたまま浸水深が増加した後、フルード数が1未満になった時点で浸水深が最大となり、その後に浸水深、流速とも減少している。このような反時計回りの時間的変化は地点②でも見られるが、地点①では仙台東部道路の盛土の影響のため明瞭ではない。なお、3地点とも、ケース1よりケース2の方が浸水深、流速とも小さくなっており、海岸堤防による浸水深及び流速の低減効果が認められる。

図-3.2.2.32は、各ケースについて、浸水深帯別の

面積を浸水深が大きい方から累加した結果である。浸水の総面積はケース1、ケース3、ケース2の順に大きいものの、その差は比較的小さいのに対し、浸水深5m以上の面積は、ケース1はケース2の約2倍

となっている。このことから、この地域では、堤防によって、浸水深が比較的大きい範囲を減少する効果があるものと考えられる。

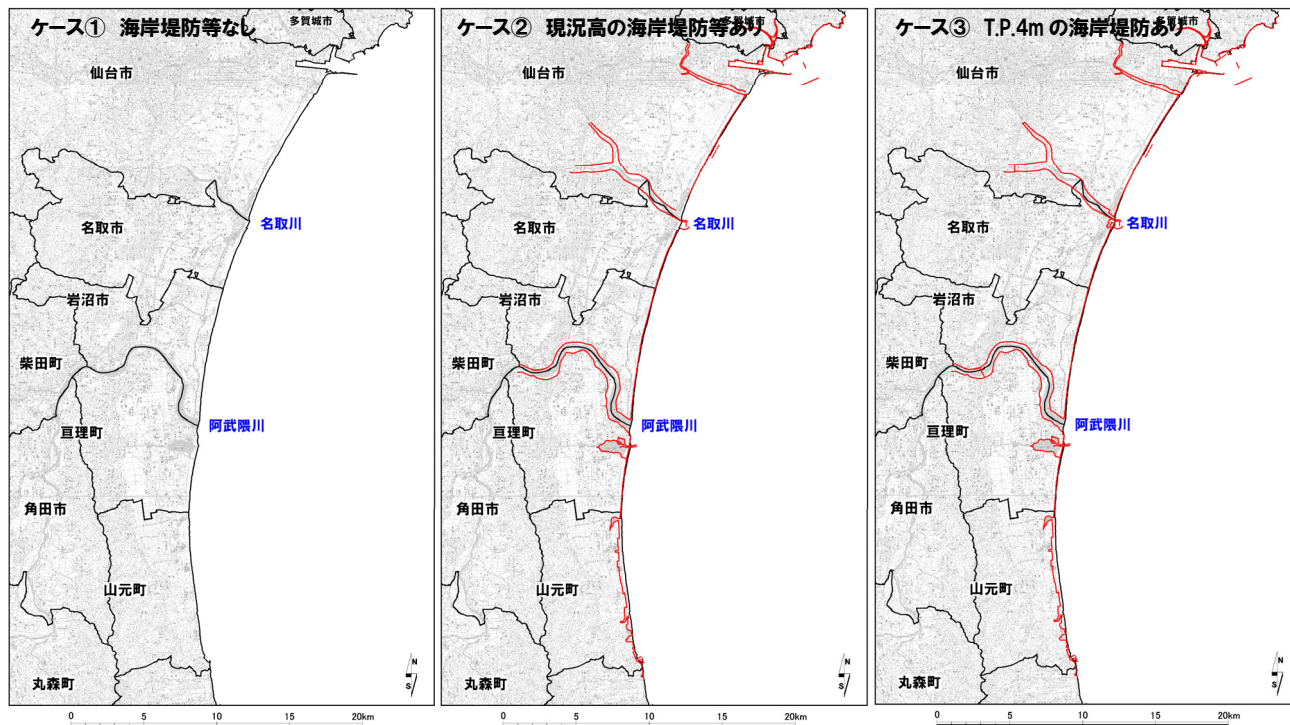


図-3.2.2.27 各ケースの施設配置（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

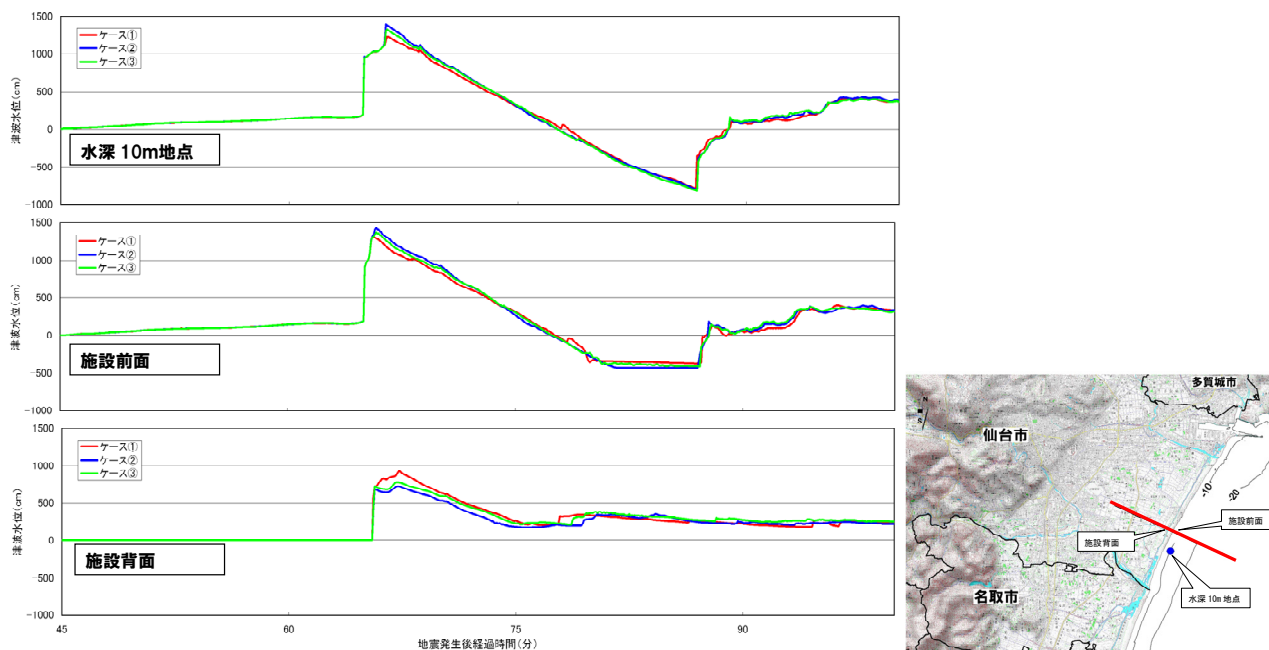


図-3.2.2.28 津波水位の時系列（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

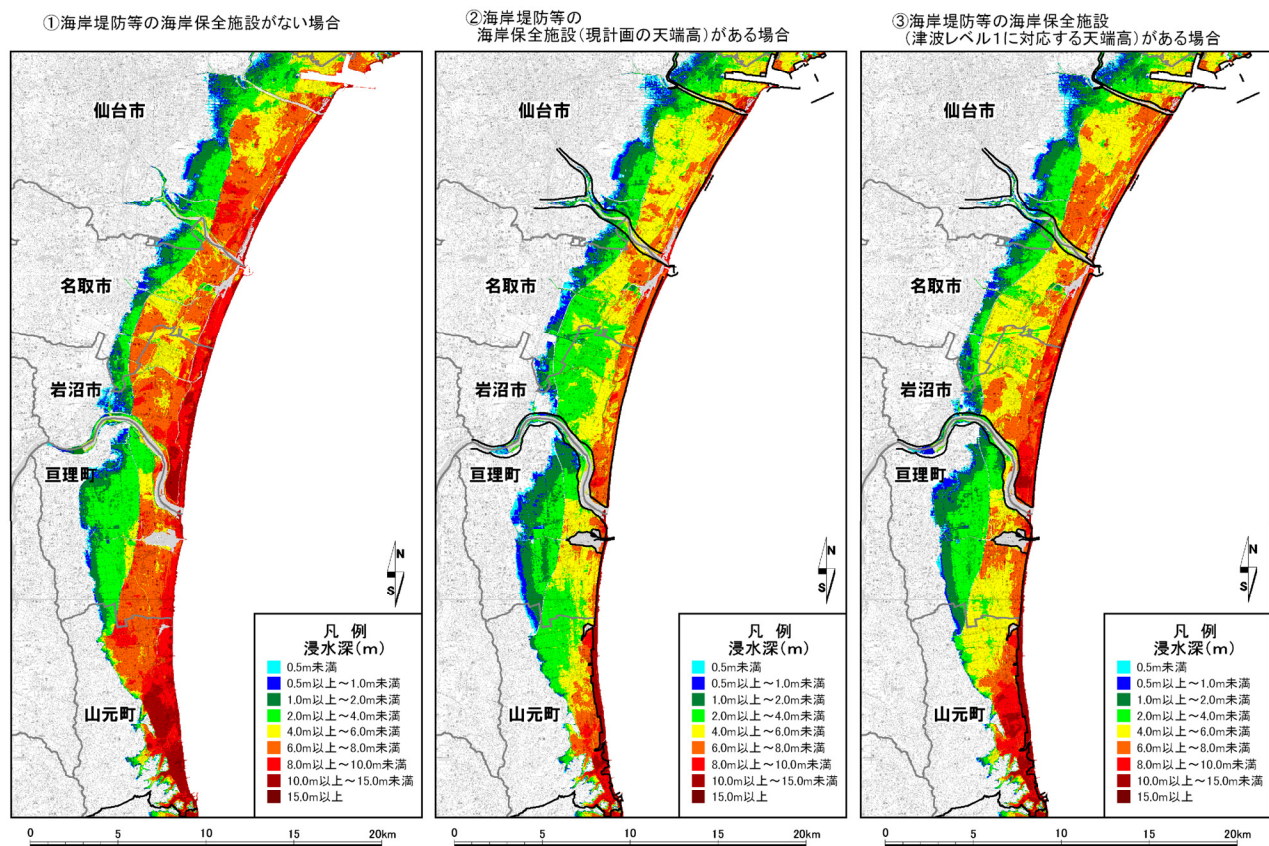


図-3.2.2.29 最大浸水深(左:ケース1、中:ケース2、右:ケース3)
(国土地理院の数値地図25000(地図画像)を背景に使用)

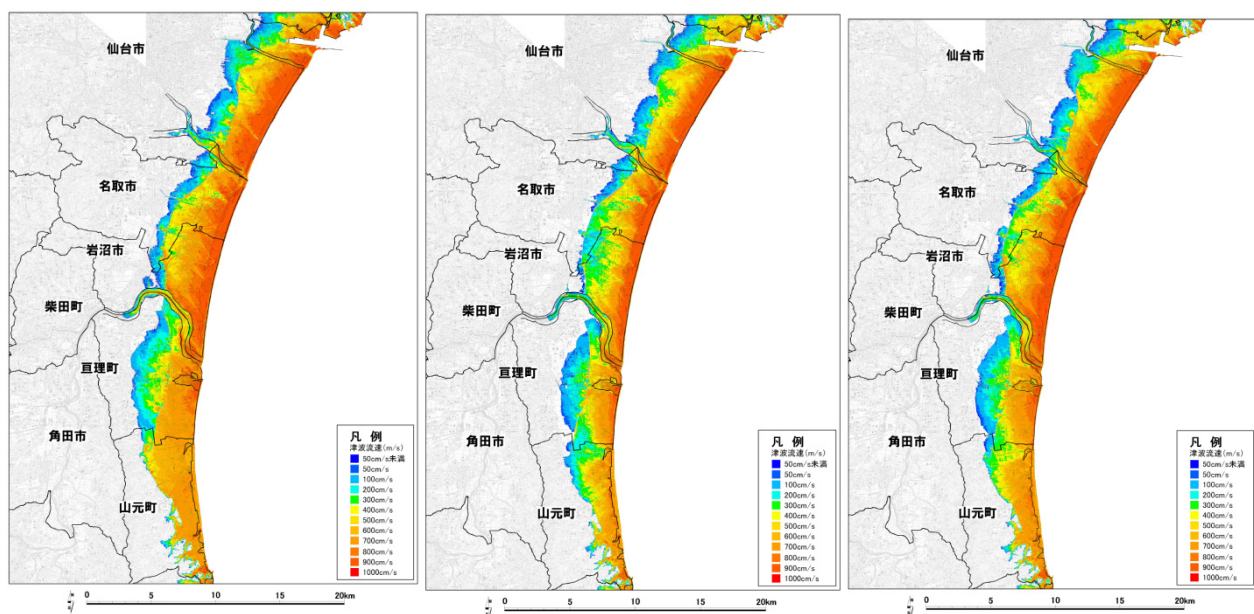


図-3.2.2.30 最大流速(左:ケース1、中:ケース2、右:ケース3)
(国土地理院の数値地図25000(地図画像)を背景に使用)

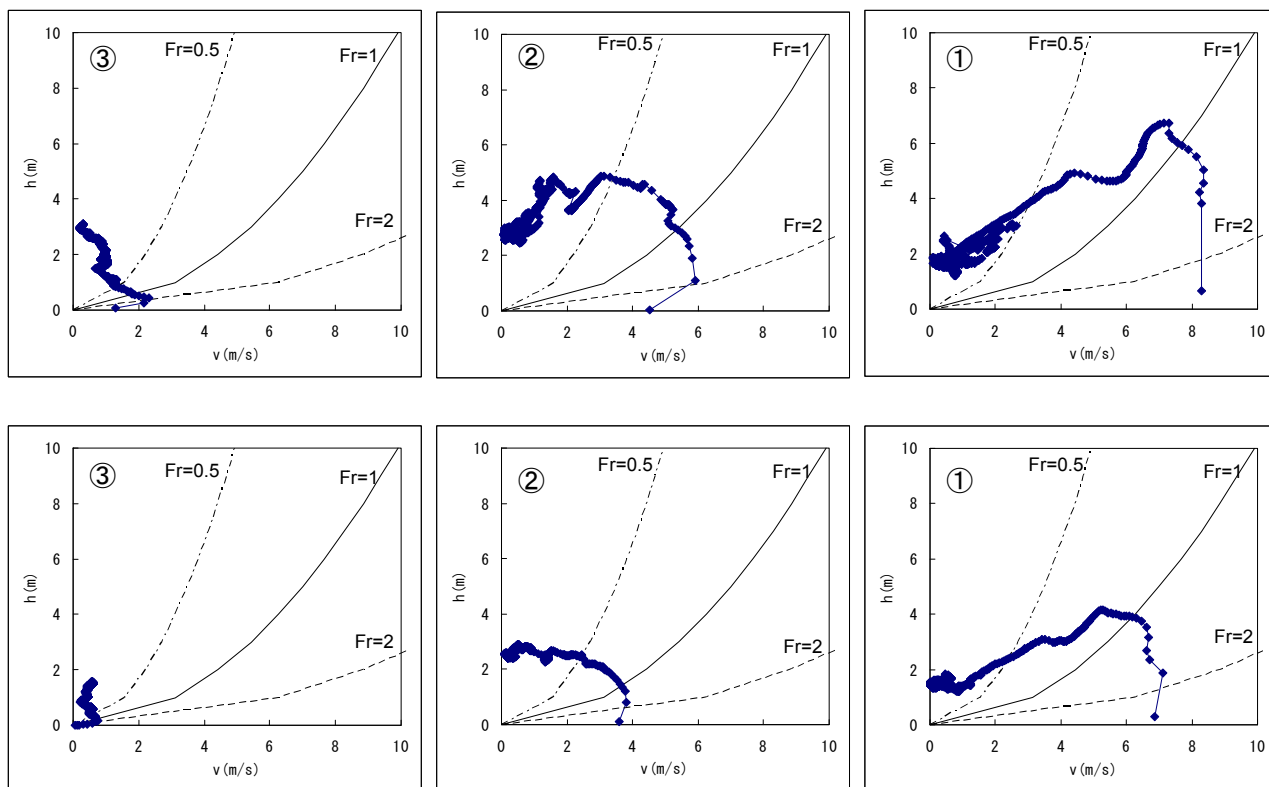
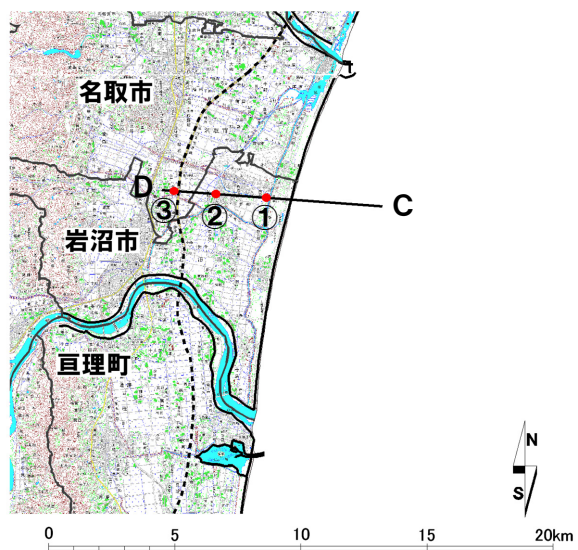


図-3.2.2.31 浸水深と流速との関係（上段：ケース 1、下段：ケース 2）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

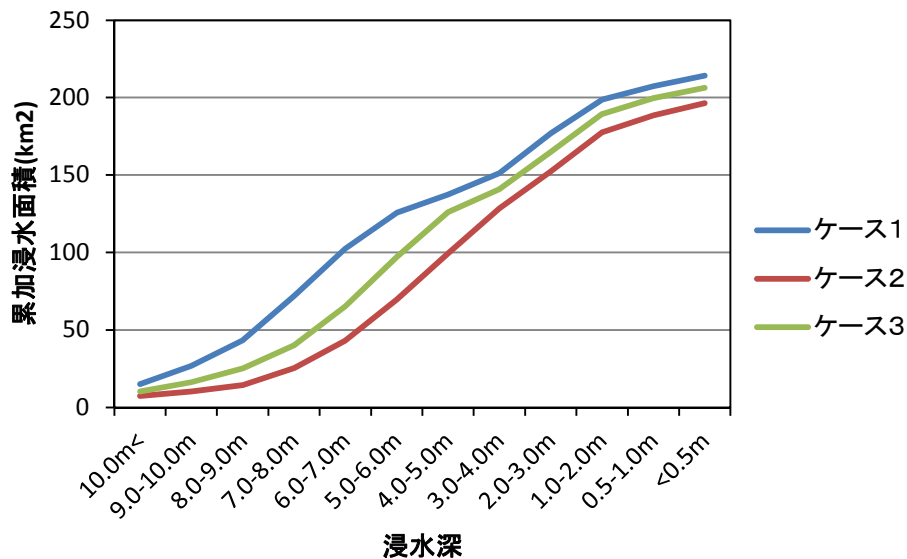


図-3. 2. 2. 32 浸水深帯別の累加浸水面積

3) 陸前高田を対象とした解析

津波浸水計算の計算条件を表-3. 2. 2. 3に示す。計算格子間隔は、波源域を含む沖合から3240m、1080m、360m、120m、40m、10mと対象地域に近づくにつれて小さくするように設定した。

表-3. 2. 2. 3 計算条件（陸前高田市）

項目	内容
計算格子間隔	（波源～沿岸）3240m, 1080m, 360m, 120m, 40m, 10m
計算時間	3 時間
計算時間間隔	0.2 秒
潮位条件	朔望平均満潮位（T.P. +0.65m）
陸上遡上における波先端の打ち切り水深	10 ⁻⁵ m
粗度係数	0.025
越流境界（防波堤、堤防等）	本間公式による越流計算

また、岩手県津波防災技術専門委員会で行われた再現計算の結果をふまえ、対象地域での津波の再現性を高めるため、断層モデルのすべり量を藤井・佐竹モデルver4.0の1.3倍に設定した。

海岸堤防等の構造物条件は、図-3. 2. 2. 33に示す3ケースを設定した。ケース1では、海岸堤防等はないものとした。ケース2では、海岸堤防等は東北地

方太平洋沖地震時点での高さとしており、海岸堤防の高さは4.95～6.15mとなっている。ケース3は、相田（1977）による昭和三陸地震の断層モデルを用いた津波浸水計算によって得られた対象地域での最高水位に相当するT.P. +5.2mを海岸堤防等の高さとした。

図-3. 2. 2. 34は、水深10mの3点における水位の時系列を示している。水位は地震発生から30分後までに低下した後、T.P. +13～15mまで急激に上昇している。また、仙台平野南部とは異なり、水深10mでの水位はケース間の差がほとんど見られない。

図-3. 2. 2. 35は、各ケースの最大浸水深の平面分布を示している。最大浸水深は広範囲で10mを超えているが、浸水範囲はケース間の違いが明瞭ではない。また、ケース1とケース2の最大浸水深の差を示した図-3. 2. 2. 36のように、最大浸水深は、海岸堤防より陸側ではケース2の方が小さく、海側ではケース1の方が小さい傾向が認められる。

最大流速は、図-3. 2. 2. 37のように、広範囲で5m/s程度になっている。最大浸水深と同様に最大流速をケース間で比較したところ（図-3. 2. 2. 38）、海岸堤防があるケースでは、海岸堤防の陸側で1m/s程度大きくなる一方、海岸堤防の海側では小さくなっている。

図-3. 2. 2. 39は、ケース1とケース2について、浸水域内に設定した3点における浸水深hと流速vとの関係を5秒間隔で出力したものである。第1線堤と第2線堤に挟まれた地点④では、第1波の押しと引きにおいて流速が極大となっており、堤防があるケース2の方が、浸水深が速く上昇している。海岸堤防

の陸側に位置する地点⑤及び⑥では、仙台平野南部と同様の反時計回りの時間的変化が見られるが、浸水深が最大となる時点では流速はかなり小さくなっている。このことは陸上に遡上した津波が重複波の

状態になっていることを示しており、陸前高田の痕跡高が内陸方向に減衰していなかったことと整合している。三陸沿岸のように平野が比較的狭い地区では、同様の現象が生じていたことが推察される。

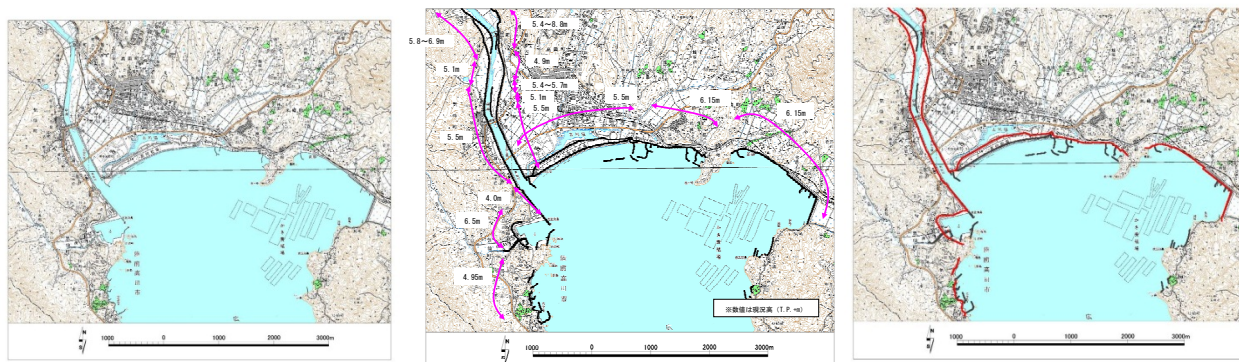


図-3.2.2.33 各ケースの施設配置（左：ケース1、中：ケース2、右：ケース3）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

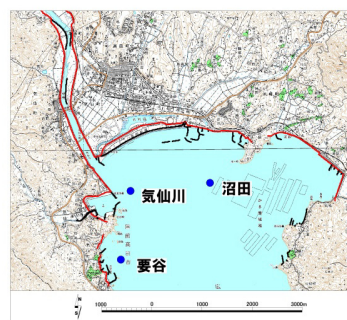
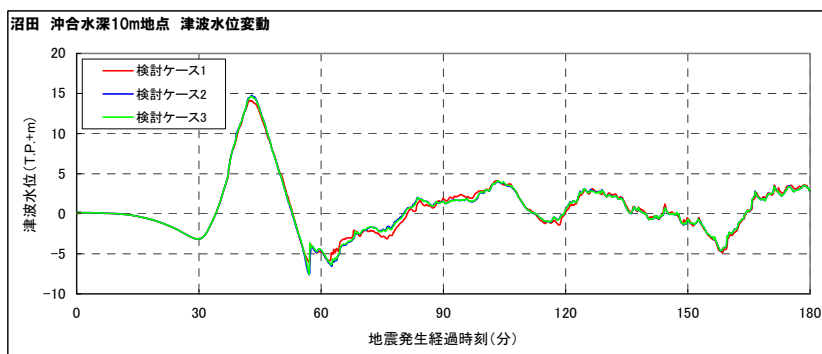
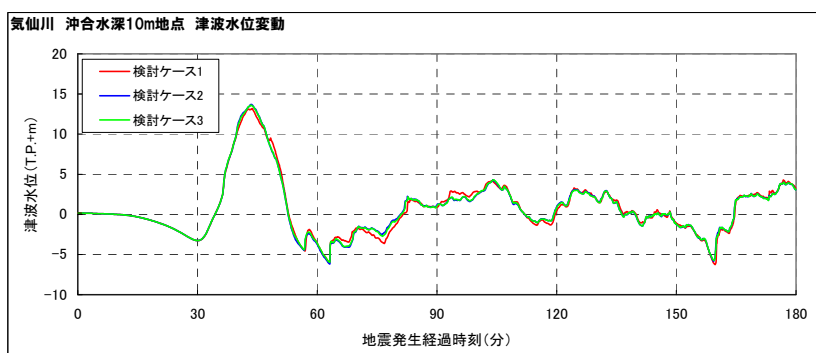
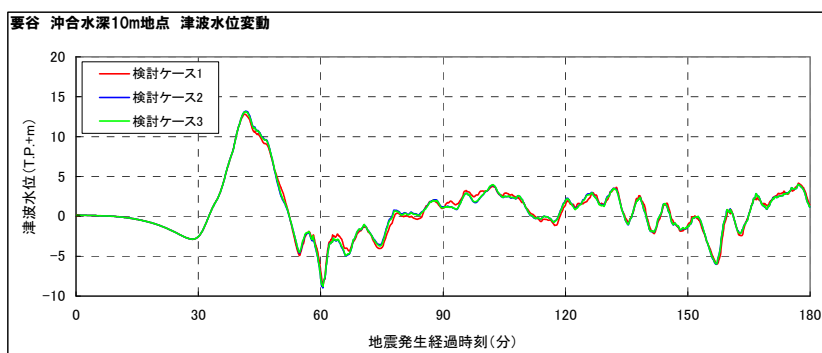


図-3.2.2.34 津波水位の時系列（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

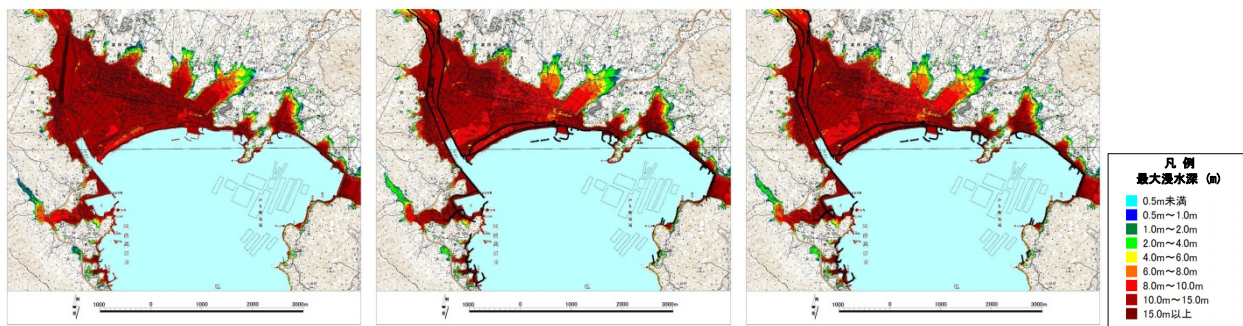


図-3.2.2.35 最大浸水深（左：ケース1、中：ケース2、右：ケース3）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

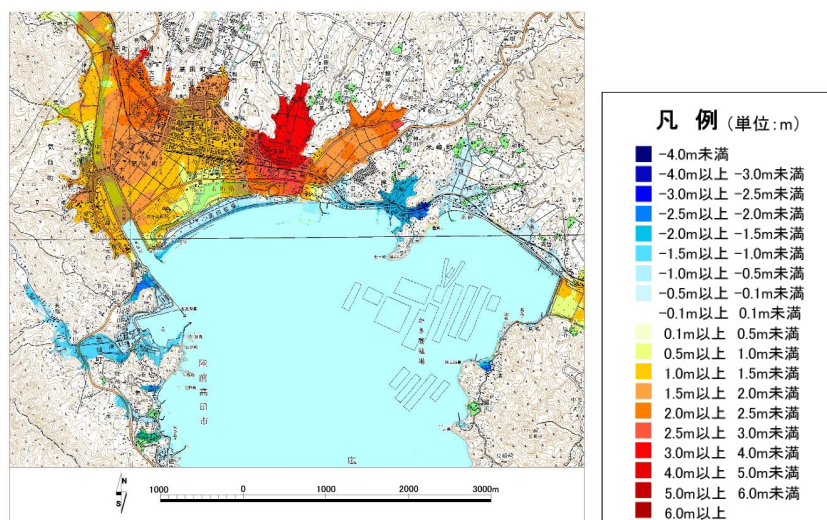


図-3.2.2.36 最大浸水深の差（ケース1－ケース2）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

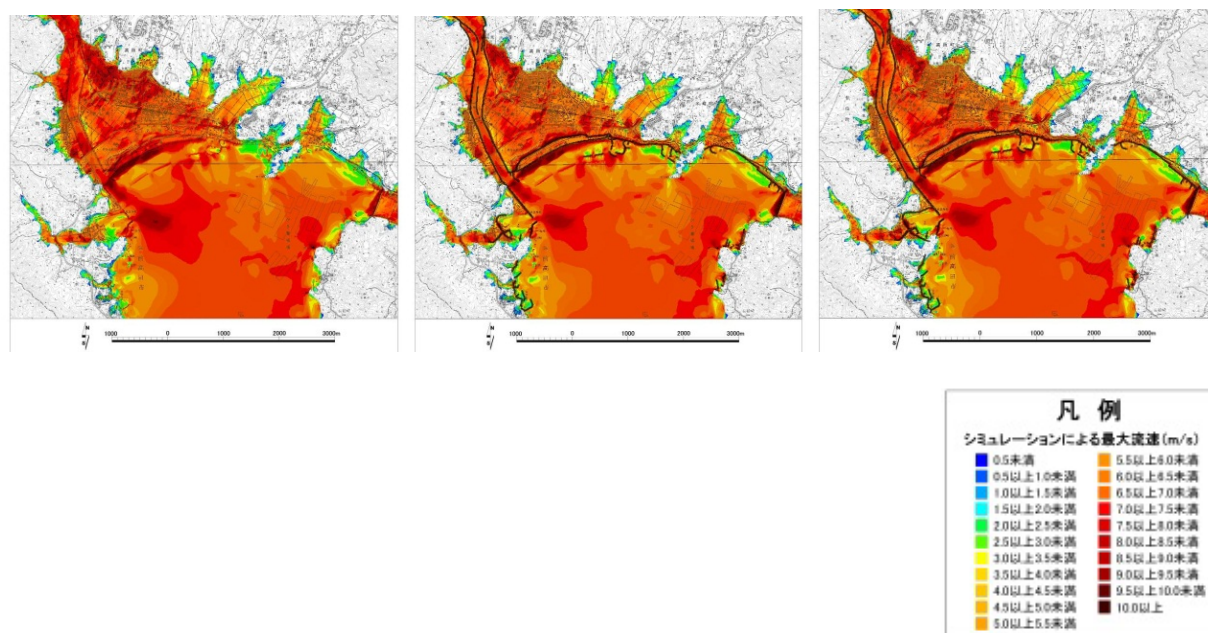


図-3.2.2.37 最大流速（左：ケース1、中：ケース2、右：ケース3）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

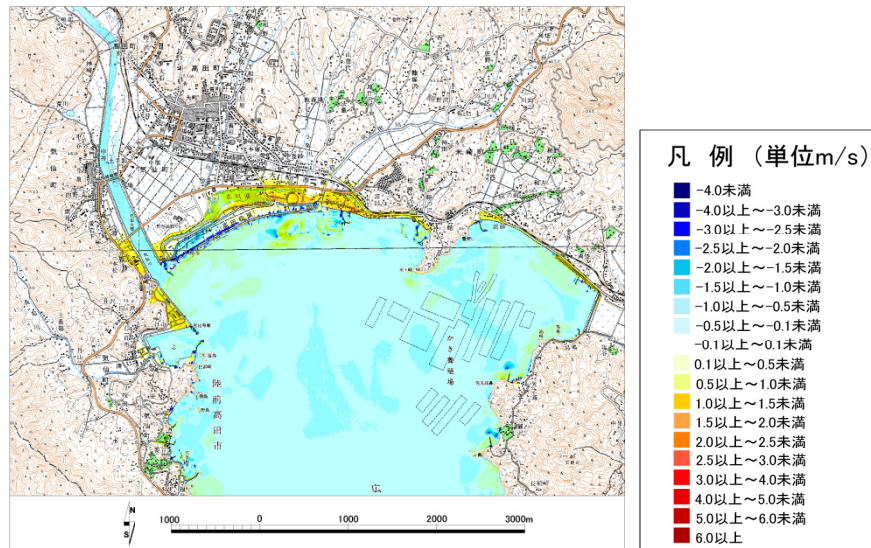


図-3.2.2.38 最大流速の差 (ケース1－ケース2)
(国土地理院の数値地図 25000 (地図画像) を背景に使用)

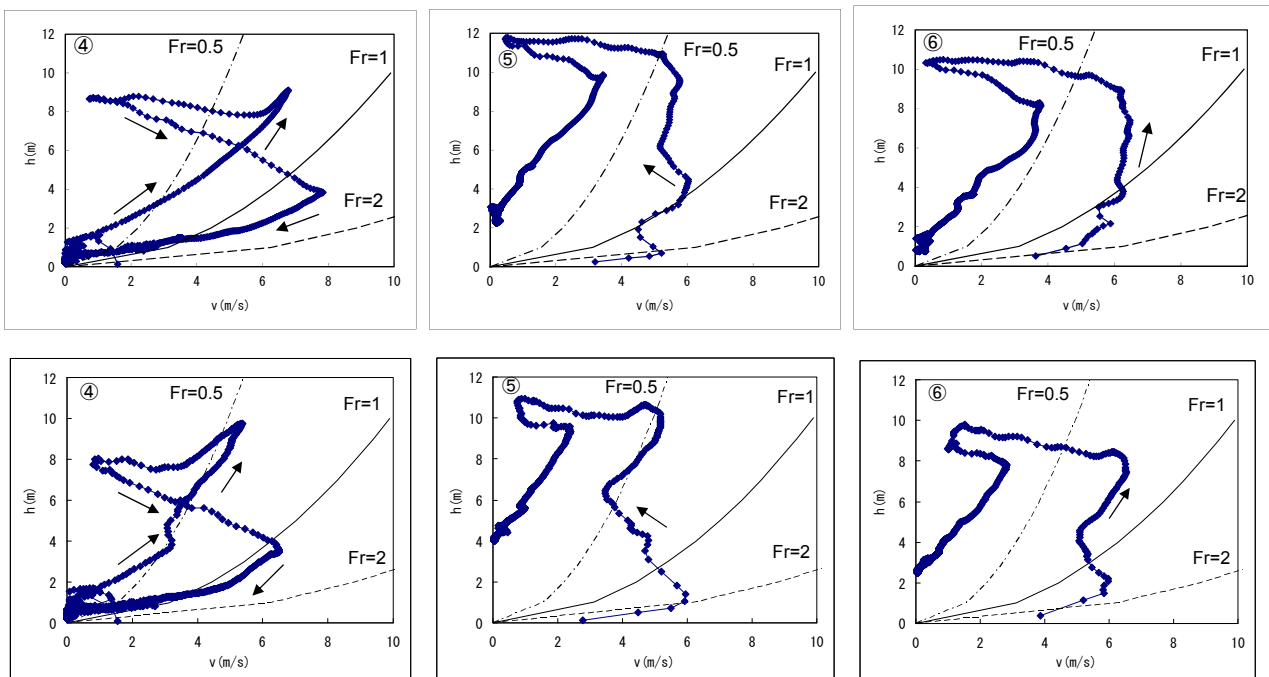
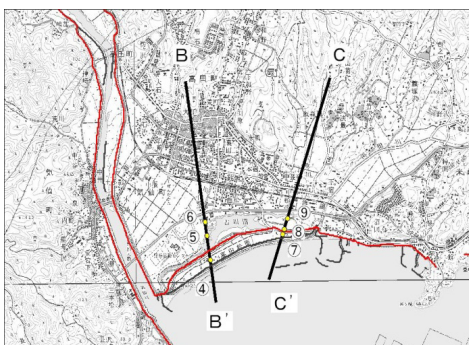


図-3.2.2.39 浸水深と流速との関係 (上段：ケース1、下段：ケース2)
(国土地理院の数値地図25000 (地図画像) を背景に使用)

4) 宮古市田老地区を対象とした解析

津波浸水計算の計算条件を表-3.2.2.4に示す。計算格子間隔は、波源域を含む沖合から3240m、1080m、360m、120m、40m、20m、10mと対象地域に近づくにつれて小さくするように設定した。

表-3.2.2.4 計算条件（宮古市田老地区）

項目	内容
計算格子間隔	（波源～沿岸）3240m, 1080m, 360m, 120m, 40m, 20m, 10m
計算時間	3 時間
計算時間間隔	0.2 秒
潮位条件	朔望平均満潮位（T.P. +0.69m）
陸上遡上における波先端の打ち切り水深	10 ⁻⁵ m
粗度係数	0.025
越流境界（防波堤、堤防等）	本間公式による越流計算

また、岩手県津波防災技術専門委員会で行われた再現計算の結果をふまえ、対象地域での津波の再現性を高めるため、断層モデルのすべり量を藤井・佐竹モデルver4.0の2.9倍に設定した。

海岸堤防等の構造物条件は、図-3.3.40の上部に示すように、ケース1として海岸堤防等がない条件、ケース2として東北地方太平洋沖地震時点での高さ（海岸堤防の高さはT.P.+10.0m）の海岸堤防等がある条件、ケース3として最前線の海岸堤防（図-3.3.40の地図において黄線の部分）の高さをT.P.+13.0m（昭和三陸地震で越流しない高さ）とした条件を設定した。

図-3.3.40の地図中に示された4点の浸水深の時系列を見ると、水深10mにある地点①ではケース間の差がほとんどないが、陸上の3点（②～④）では、海岸堤防等がない条件のケース1と比べて、海岸堤防等があるケース2及び3の方が、浸水の開始時刻が遅く、最大浸水深が小さくなっている。

図-3.3.41によれば、最大浸水深が広範囲で10m以上となるケース1と比べて、海岸堤防があるケース2及び3の方が、堤内地のほとんどにおいて最大浸水深が小さくなっていることがわかる。その傾向はケース1と2の最大浸水深を比べた図-3.2.2.42においても

明瞭であり、2線の海岸堤防の内側となる浸水域の北西部では浸水深が6m以上減少している箇所もある。

図-3.2.2.43は最大流速の平面分布を示している。海岸堤防等がない条件のケース1では、6m/s以上の範囲が大きく広がり、一部で8m/s以上になっている。海岸堤防等がある条件のケース2と3では、海岸堤防のすぐ陸側で8m/s以上となる一方、海岸堤防の海側や、海岸堤防からある程度陸側に入ったところでは6m/s以下となっている。ケース1と2の最大流速を比較した図-3.2.2.44でも、同様の傾向が認められる。海岸堤防があるケースでの最大流速の低減が仙台平野南部や陸前高田と比べて顕著であるが、これは田老地区の堤防が比較的高いことが影響しているものと考えられる。

以上のように、海岸堤防によりその陸側の最大浸水深が小さくなることが確認された。ただし、海岸堤防のすぐ陸側では、最大流速が大きくなることに留意する必要がある。

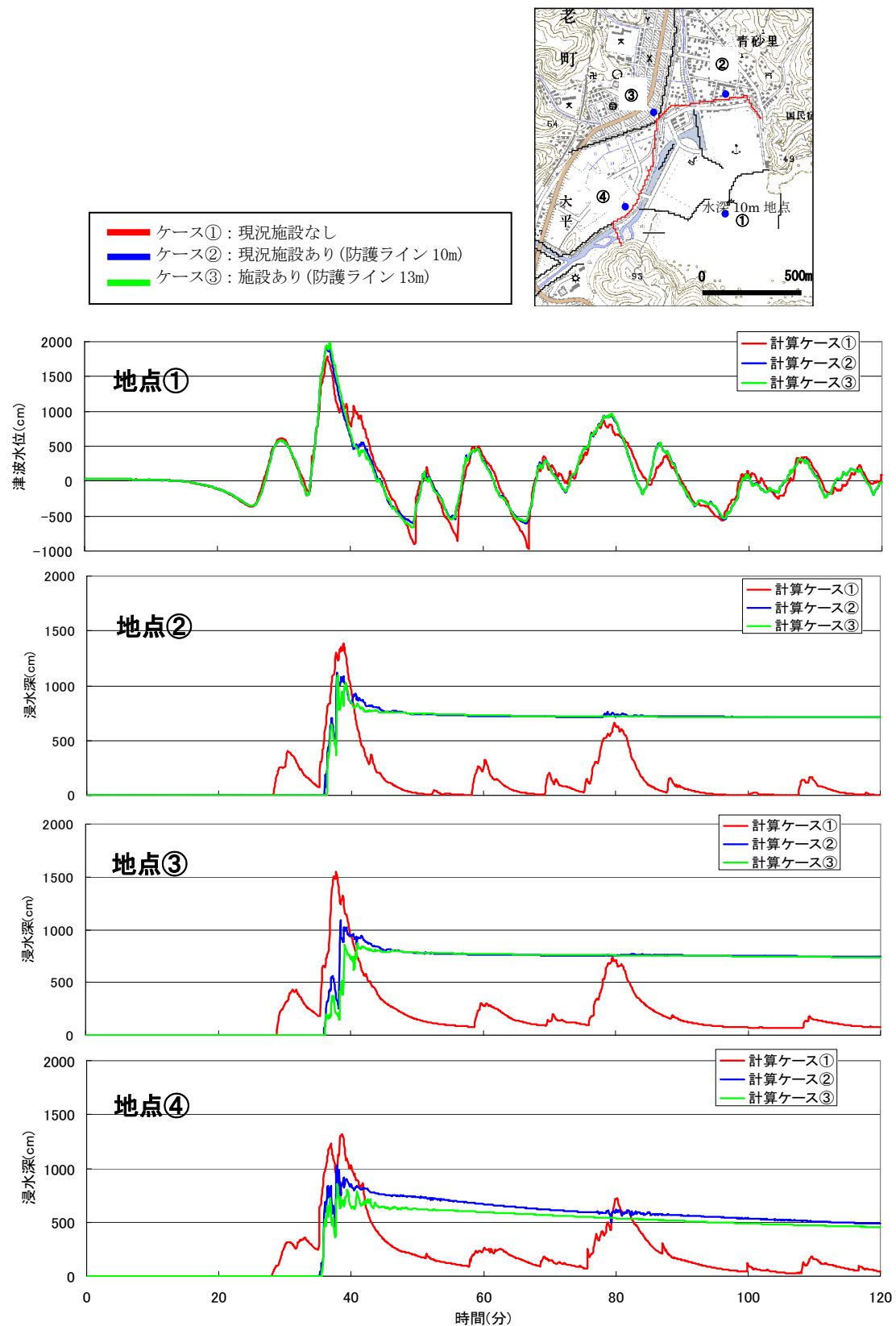


図-3.2.2.40 津波水位の時系列
(国土地理院の数値地図25000 (地図画像) を背景に使用)

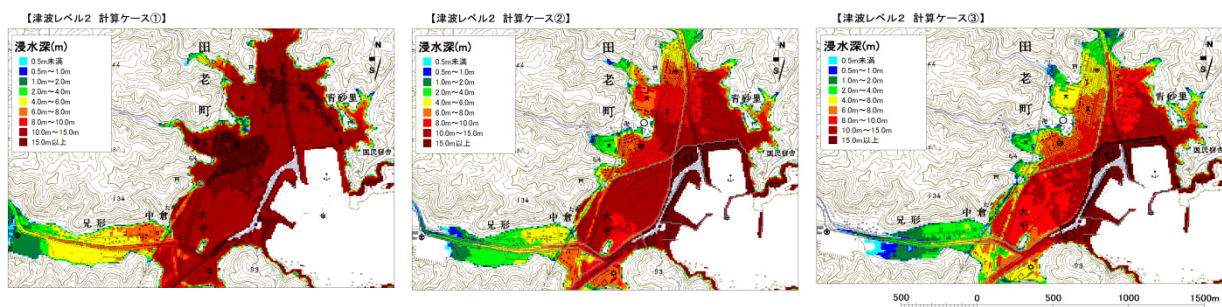


図-3.2.2.41 最大浸水深（左：ケース1、中：ケース2、右：ケース3）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

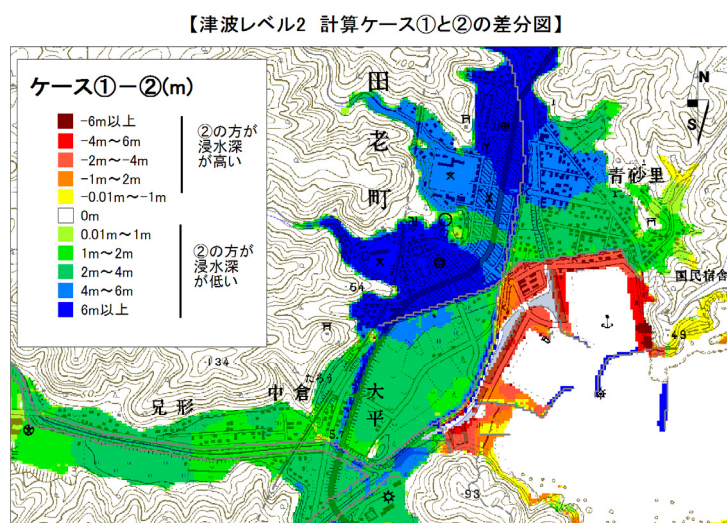


図-3.2.2.42 最大浸水深の差（ケース1－ケース2）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

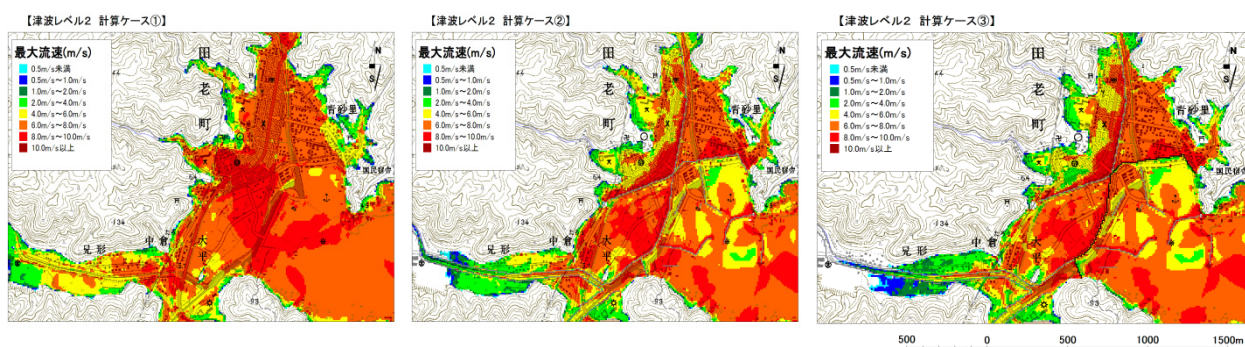


図-3.2.2.43 最大流速（左：ケース1、中：ケース2、右：ケース3）
（国土地理院の数値地図25000（地図画像）を背景に使用）

【津波レベル2 計算ケース①と②の最大流速差分図】

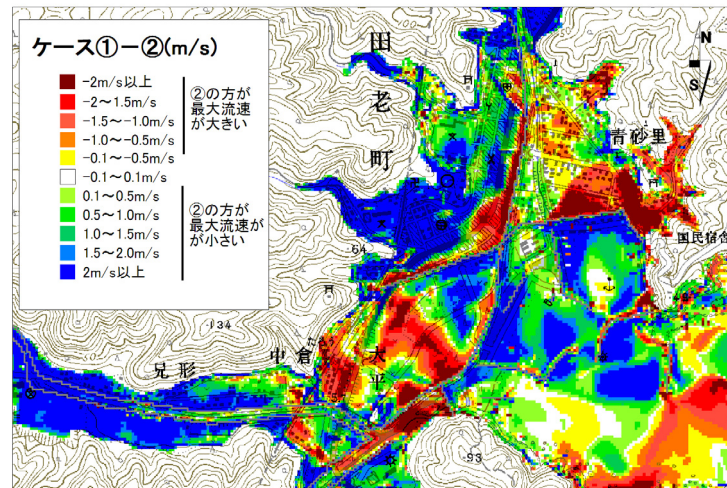


図-3.2.2.44 最大流速の差（ケース1－ケース2）
（国土地理院の数値地図 25000（地図画像）を背景に使用）

5) まとめ

津波浸水計算により陸上に遡上した津波の特性を検討した結果、浸水深及び流速の時間的変化の傾向が仙台平野南部と陸前高田との間で異なることなどが明らかになった。また、設計条件を超える津波が海岸堤防を越流しても、海岸堤防により浸水深等が減少する効果が認められた。このことは、津波が越流しても海岸堤防が粘り強く効果を発揮することが背後地の減災に資することから、粘り強い構造の検討の重要性を示している。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）調査研究（速報）、国土技術政策総合研究所資料、No. 636、建築研究所資料、No. 132、pp. 4-43-45、2011
- 2) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992
- 3) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション、東京大学地震研究所彙報、第52号、pp. 71-101、1977

3.2.2.2 港湾

(1) 津波痕跡高

東日本大震災で被災した施設の早期復旧には、被災状況の把握、被災原因の究明が不可欠である。このため国総研では、国土交通省等の要請を受け被災状況の調査を行った。いずれの調査も(独)港湾空港技術研究所と合同で行っている。

被害調査は、津波班、地震班に分けて行われているが、ここでは以下に示す津波班による津波遡上状況等の調査結果について報告する。

(調査の概要)

- ① 平成23年3月16日～19日 1名の職員を釜石港、大船渡港の被害調査へ派遣
- ② 平成23年3月16日～19日 2名の職員を八戸港、久慈港の被害調査へ派遣
- ③ 平成23年3月27日～30日 1名の職員を釜石港、宮古港の被害調査へ派遣
- ④ 平成23年4月5日～8日 2名の職員を相馬港、小名浜港の被害調査へ派遣
- ⑤ 平成23年4月5日～6日 1名の職員を鹿島港、茨城港の被害調査へ派遣

現地調査において測定した津波痕跡高(合計105地点)を図-3.2.2.45に示す。測定地点や津波痕跡の内容などの詳細については、調査速報¹⁾を参考にしたい。これらの津波痕跡高は、最大波の発生時刻が必ずしも明確でないことを考慮し、すべて津波到達時の天文潮位を基準面として整理した。

浸水高に着目すると、気仙沼市から女川町にかけて浸水高13mを越える非常に大きな津波が来襲しており、女川町女川港で最大18.4mが観測されている。また、宮古市から大船渡市、仙台市にから相馬市にかけての海岸に浸水高が10m近い津波が来襲したと考えられる。釜石市の釜石港では、浸水高が、釜石湾のすぐ北側に隣接する両石湾(釜石市両石町)内で16～17mであるのと比べて小さくなっており、湾口防波堤の影響と考えられる。同じ地域内でも、構造物や地形の影響により津波痕跡高にばらつきがみられる。

青森県、岩手県、宮城県、福島県の各県では、津波による被害想定を実施している。このうち、最大の予測値を示すことの多い明治三陸津波の想定結果を北から順に示すと、青森県の八戸港白銀地区で最大浸水深4.0～6.0m、岩手県の宮古市田老町で最大遡上高16.8m、宮古市津軽石で最大遡上高8.4m、釜石市港奥

で最大遡上高8.0m、大船渡市大船渡湾奥で最大遡上高7.0m、宮城県の石巻市で最高水位3.0m、仙台港奥部で最高水位2.3m、福島県の相馬港で最大遡上高4.9m、小名浜港で最大遡上高4.0mとなっている。なお、宮城県については第四次地震被害想定調査の平成23年2月に中間報告した結果を用いている。

これらを図-3.2.2.45の津波痕跡高と比較すると、どの値も明治三陸津波の想定とくらべて非常に大きな値となっている。とくに岩手県より南で非常に大きくなっている。

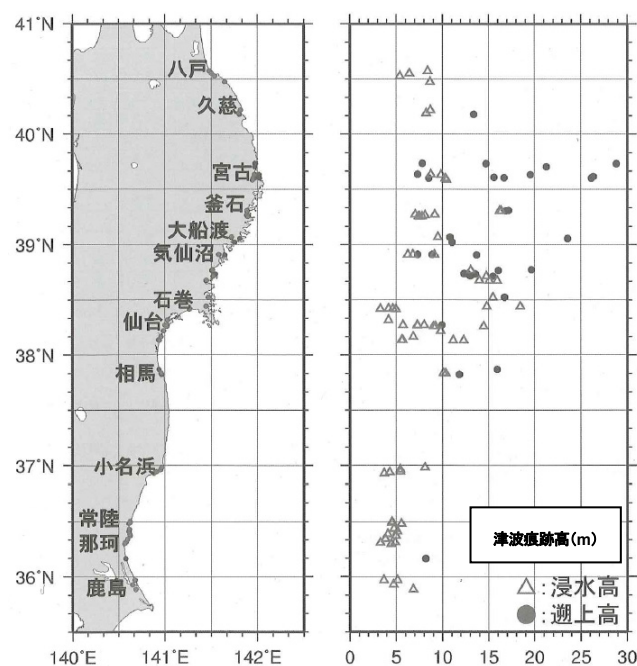


図-3.2.2.45 津波痕跡高の測定結果¹⁾

(2) 短波海洋レーダを用いた津波観測

短波海洋レーダは海面の流速変動を平面的に把握できるとともに、湾内や水道等での副振動モードの解析が可能であるという特徴があり、このため沖合の波浪計とあわせて津波観測への活用が期待される。国土交通省が紀伊水道に常設している短波海洋レーダによって、東日本大震災によって発生した津波を海面における流速変動として検出することに成功した^{2)、3)}。これにより多くの研究者によって理論的・数値的に検討されてきた海洋レーダによる津波検知の可能性が実証された。

解析には近畿地方整備局が和歌山県雑賀崎と湊地区に常設している短波海洋レーダによって取得されたデータを用いた。観測対象領域を図-3.2.2.46に示す。計測は3月11日17:00から3月14日0:00までの間、観測周期15分、サンプリング10分間の観測モードで実施し、

そのうち3月11日17:00から22:38までの観測結果を解析した。

解析の結果得られた水位と視線方向流速の時系列を図-3.2.2.47に示す。湊地区に設置された短波海洋波レーダの視線方向流速の解析値から、津波第1波から第3波までは進行波としての性格が強いこと、それ以降は水道内に副振動が発生したことを明らかにした。

日本沿岸は複雑な地形が多い。短波海洋レーダは流れの空間分布を計測できる利点があり、沿岸域における固有モードの空間分布をあらかじめ計算しておくことは、津波被害を軽減する上で重要であると考えられる。

短波海洋レーダで津波や副振動の計測をリアルタイムで安定的に行うことができれば津波対策上きわめて有効であり、このためには①流速計測の高速化、②観測範囲の広域化と高分解能化、③通信の高度化及び④データ保存方法や電源供給方法の改良が必要である。

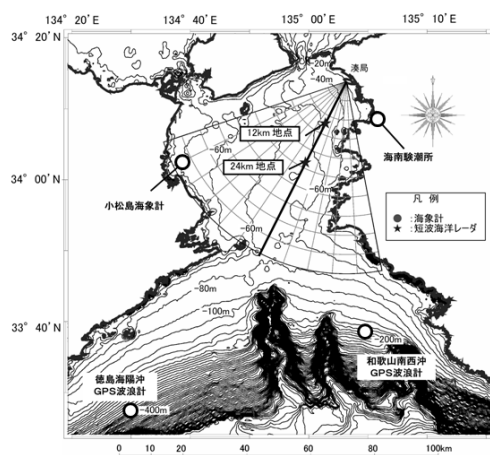


図-3.2.2.46 短波海洋レーダの観測対象海域³⁾

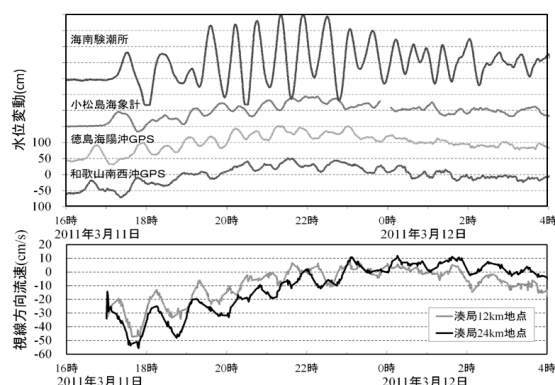


図-3.2.2.47 水位（上）と視線方向流速（下）の時系列³⁾

謝 辞

津波痕跡高の現地調査にあたっては、東北地方整備局及び関東地方整備局の全面的な支援と各自自治体のご協力を得て実施している。また、短波海洋レーダを用いた津波観測にあたっては、近畿地方整備局が常設している短波海洋レーダのデータを用いている。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋重雄、戸田和彦、菊池喜昭、菅野高弘、栗山善昭、山崎浩之、長尾毅、下迫健一郎、根本貴史、菅野甚活、富田孝史、河合弘泰、中川康之、野津厚、岡本修、鈴木高二朗、森川嘉之、有川太郎、岩波光保、水谷崇亮、小濱英司、山路徹、熊谷兼太郎、辰巳大介、鷲崎誠、泉山拓也、関克己、廉慶善、竹信正寛、加島寛章、伴野雅之、福永勇介、作中淳一郎、渡邊祐二：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No. 1231、200p.、2011
- 2) 日向博文、藤良太郎、藤井智史、藤田祐一、花土弘、片岡智哉、水谷雅裕、高橋智幸：紀伊水道における短波海洋レーダを用いた津波・副振動観測、海岸工学論文集、第59巻、2012
- 3) 藤井智史、日向博文、古川恵太、宮田正史、小林孝、水谷雅裕、小海尊宏、永松宏、金津伸好：短波海洋レーダを用いた紀伊水道における津波観測、2011年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、2011

参考になるホームページアドレス

- 1) 国土技術政策総合研究所ホームページ：東日本大震災関連情報
<http://www.ysk.nilim.go.jp/oshirase/uc.html>
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/index.html>
- 2) 青森県ホームページ：青森県地震・津波被害想定調査
http://www.bousai.pref.aomori.jp/kansoku/higaisoutei/higaisoutei_top.htm
- 3) 岩手県ホームページ：岩手県地震・津波シミュレーション及び被害想定調査
http://www.pref.iwate.jp/~hp010801/tsunami/yosokuzu_index.htm
- 4) 宮城県ホームページ：宮城県第四次地震被害想定

調査について

http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/jishin_chishiki/H22_disaster_prevention_council_bukai/index.htm

- 5) 福島県ホームページ：福島県津波想定調査結果の概要

http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=19543

3.2.2.3 河川

国総研は、本省・東北地方整備局の要請により災害復旧等に資する情報を得ることを目的として、北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川を対象に被災状況の概括的把握のための現地調査を行った。本節では、現地調査時に得た情報に東北地方整備局、国土地理院等による津波遡上の痕跡や映像など各種データを加えて、水位や流れの向きについて整理した。

(1) 河道内の津波遡上の概況

仙台平野に河口を有する河川周辺への津波第一波目の遡上状況を捉えた映像や同地域への津波の遡上計算結果¹⁾を見ると、河川周辺の堤内陸域への津波遡上に先行して、河道内を遡上する状況が確認された。また、堤内側からの越水が生じた区間においても堤防のり尻際の高水敷の洗掘（落堀）の形成が不明瞭であり、また天端のり肩部周辺のり面侵食が顕著であったことなどは、河道内の水位が堤内側に先行して上昇していたことを示唆するものと考えられる。

新北上川に設置された2箇所の水位観測所で記録された津波遡上時の水位時系列を図-3.2.2.48に示す。2観測所間において痕跡水位は堤防高を下回っており（図-3.2.2.51参照）、下流側の福地観測所では一波目の津波遡上時に2分程度で約3mといった急激な水位上昇が生じている。これは、河川に沿って設置されたCCTVカメラで津波遡上を捉えた動画で見られる段波状の津波遡上に対応する変動を捉えたものと考えられる。図-3.2.2.49には、鳴瀬大橋上流（鳴瀬川3.4kp左岸）に設置されたCCTVが捉えた映像に標定点を設け、画像解析によって水面変動を読み取った結果である。画像に含まれる複数の測線で新北上川と同様な急激な水位上昇を確認できる。

津波が上流へ伝播する速度は、2観測所での第一波目ピーク水位間の時間差と観測所間の縦断距離（6.37km）の商として算定すると、約8m/sとなった。また、第一波目が遡上した時のCCTV画像からPIV解析により津波遡上時の表面流速を算定すると、最大で5m/s程度と伝播速度よりも小さな値が得られている。

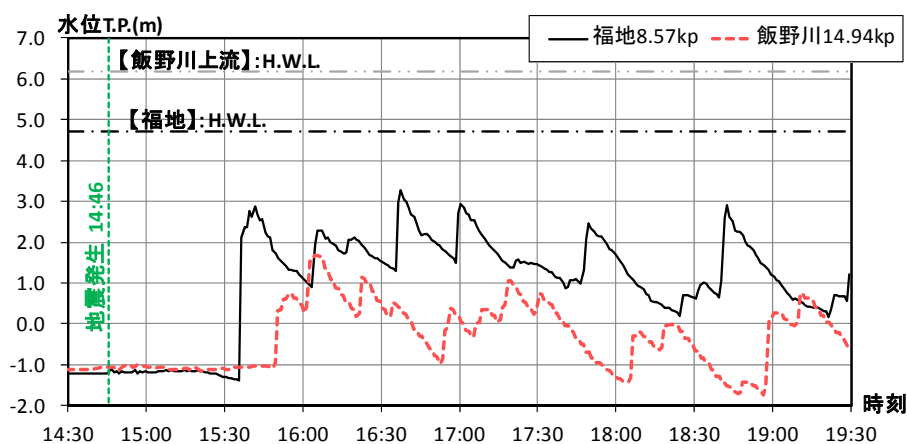


図-3.2.2.48 北上川における津波遡上時の水位経時変化の観測結果

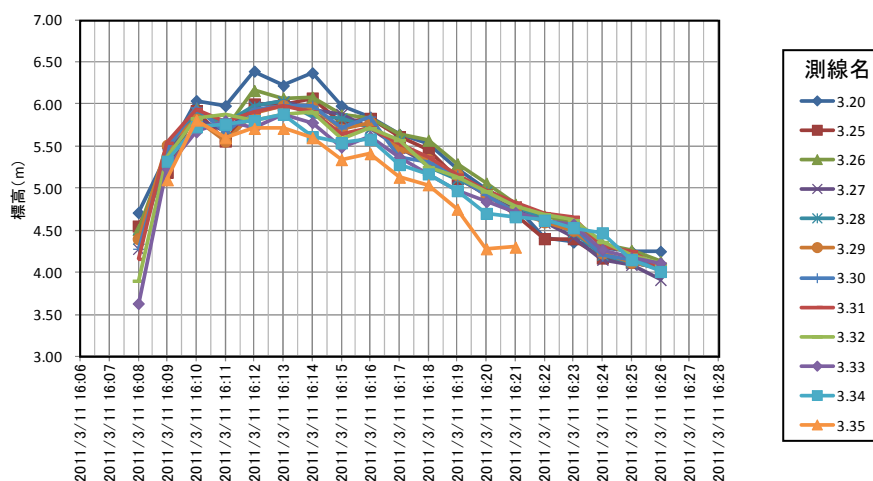
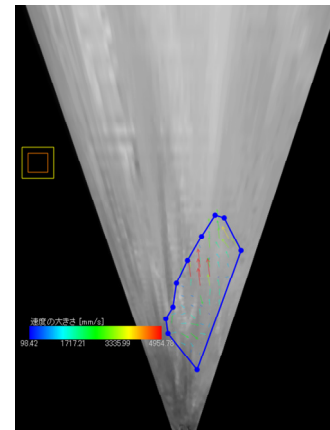
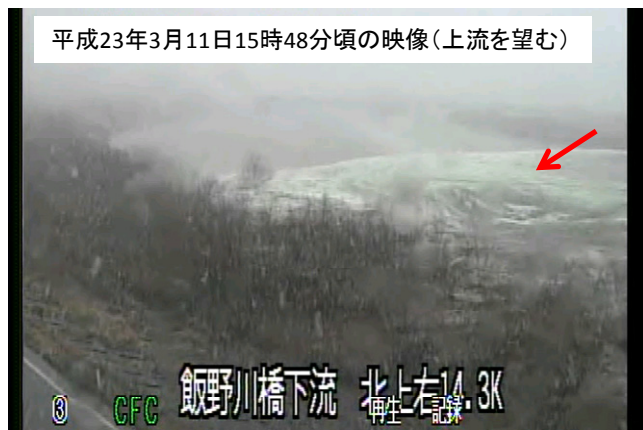


図-3.2.2.49 CCTV 画像から画像解析によって判読した津波遡上時の水位変化（鳴瀬川 3.4kp）



(a) CCTV 画像から切り出した画像（矢印部分に津波の波面） (b) 左図を平面投影し PIV 解析した結果

図-3.2.2.50 CCTV 画像を平面投影し PIV 解析によって算定した水面の流速分布（北上川 14.3kp）

福地水門（北上川8.6kp）に設置されたCCTVカメラの画像については、カメラと河川との間に植生が繁茂し、河川との距離が長く解像度も悪かったことから、表面流速を算定することはできなかった。福地水門よりも5.7km上流にある飯野川橋下流（北上川14.3kp）に設置されたCCTVカメラの画像からは、河道の右岸側を遡上する津波の表面流速が5m/s程度であったことを確認した（図-3.2.2.50）。ただし、図-3.2.2.50(a)のように水面の乱れが大きく、算定精度は高くないと判断された。図-3.2.2.48では、上流への津波の伝播に伴い波高が減少しているが、最高水位の発生時刻に着目すると、河口側の福地観測所の方がその上流の飯野川上流観測所より遅くなっており、津波遡上に伴う最高水位の縦断分布を描く際に留意すべき点と考えられた。

(2) 河道内および堤内の津波痕跡水位調査結果

図-3.2.2.51は、阿武隈川、名取川、鳴瀬川および新北上川で記録された津波痕跡水位である。痕跡調査では、堤防のり面を始め、橋梁、水門、堤内地の建設物や山裾部に達している区間があり、その区間で得られる痕跡は、上記した河川堤防より高い構造物等に限られるため、データ数が少ない。また、そのような構造物であっても水没したと推察されるもの、また山裾に津波が打ち上げられた高さ（遡上高）に相当するデータなどが含まれている。そこで、図-3.2.2.51には、現地調査時の観察結果を踏まえて、最大水位分布を大まかに推定した結果を「大まかな水位の変化傾向」と注書きを付した曲線として表示した。

堤防天端高を基準とした堤内側・川側の水位の行程の組み合わせから、河川への津波遡上状況を河口から上流に向かって図-3.2.2.52のように大別することができる。最も河口側では、堤内・川側とも天端を超

える最高水位に達する「堤防水没区間」、その上流では堤内側水位が天端高以下で川側から越水する「堤防越水区間」となる。なお、堤防水没区間であっても、最大水位に達するまでの間やそれ以降において、川側または堤内側からの越水が卓越する時間帯がある。これら区間より上流には、堤内・川側とも堤防天端高以下で遡上する「堤防高以下遡上区間」となる。

阿武隈川の亘理大橋地点では、左岸に比べて右岸側の痕跡水位が非常に高くなっている。このデータは亘理大橋の高欄に引っかかった植物を津波遡上による痕跡と判断したものであり、津波到達を示す痕跡としての信頼性は高いと考えている。この地点で河道は下流に向かって左に湾曲しており、津波遡上に対して外岸側に相当するため水位上昇が生じたと考えられる。

(3) 堤防法線形状と盛土・山脚など高地部が津波遡上に与える影響

新北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川の下流の空中写真²⁾に津波遡上の流向（写真上の青矢印）と遡上状況区分（図-3.2.2.52参照）を併記したものを写真-3.2.2.1に示す。津波遡上の流向は、空中写真から判読した電信柱の倒伏方向や現地踏査で確認した植生の倒伏や天端舗装の剥離・流送方向等から推定した。なお、堤防上の矢印は川側または堤内側への越水の卓越方向を表しており、厳密な意味での流向では必ずしもないことに留意されたい。

これらの写真と図-3.2.2.51に示した痕跡水位から、津波遡上状況について以下のように整理できる。

a) 汀線に対してほぼ垂直な向きに概ね直線的に堤防が延伸する場合

これに該当する代表例として、名取川右岸および

鳴瀬川左岸が挙げられる。堤防水没区間では、河川堤防を挟んで堤内・川側の両方向へ向かう痕跡が見られた。鳴瀬川左岸1km付近では、一連区間で天端舗装が川側に流送されており、一時的にある区間に渡って同一方向に堤防を越える流れが生じた可能性が考えられる（写真-3.2.2.2）。

この区間よりさらに上流に向かうと、川側・堤内側とも徐々に最大水位が低下するが、その度合いが川側より堤内側の方が大きいと、川側からの越水を伴う「堤防越水区間」、さらに上流では「堤防高以下遡上区間」となる。

b) 盛土・山脚など高地部がa)の河川堤防に隣接する場合

これに該当する代表例として、名取川左岸および新北上川左右岸が挙げられる。名取川の場合には関上大橋の道路盛土、新北上川の場合には山脚部が堤防近傍まで接近している箇所（左岸では1.2～1.8km、右岸では3.8km地点：いずれとも山脚が堤防に接近せずに間に水路が入っている）である（写真-3.2.2.1(a)、(c)写真に灰色の矢印で示した）。

高地部において堤内側を遡上してきた津波がせき上げられていて水位を増大させ、これが河川堤防を越えて川側へ越水したと考えられる。したがって、高地部より下流では「堤防水没区間」となるが、a)との差異は高地部の下流側近傍で川側に向かう越水が卓越することである。

新北上川の場合、山脚部より上流では堤内側へ越水する「堤防越水区間」となった。右岸側では、この区間内において約400mに及ぶ破堤が生じた。山脚部より上流において堤防に隣接する水路に沿って遡上してきた津波が氾濫したと推察される様子が撮影されている³⁾。

名取川の場合、道路盛土より上流では津波遡上水位が大きく低下している。これは、堤防近傍では津波道路盛土を越水せず、堤防から離れるに伴って徐々に低くなる道路盛土を回り込んで上流に津波が遡上していった状況から、回り込みに伴う津波遡上距離の増大や流れの拡散の影響等によって波高が低減したためと考えられた。

c) 川側のり面が河口に面するように堤防が汀線に対して斜め方向に延伸する場合

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の河口から約1kmの範囲（湾曲部より下流の範囲）が挙げ

られる。この範囲では「堤防水没区間」においても、3.3.3(1)に後述するように川側から越水によるり面崩壊と法尻での落堀形成が生じていた。また、堤防天端に設置されたパラペット上の金属製手摺には、川側からの越水を示唆する植生の集積や流送物の衝突によると推察される変形が見られた。さらに、一部パラペットが倒壊し、堤内側に流送されていた。以上の状況から、川側のり面が河口に面するように堤防法線が汀線に対して斜め方向に延伸する区間では、川側からの越水が卓越する場合があると推察された。この区間の被災状況の検討については、3.3.3(1)に後述した。

d) 津波遡上に対して外岸側となる堤防湾曲区間

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の湾曲部が挙げられる。(2)に示したように、湾曲部に位置する亘理大橋の痕跡調査から外岸側において水位の増大を示唆する結果が得られている。

(4) 空中撮影映像から判読した津波波面の伝播状況

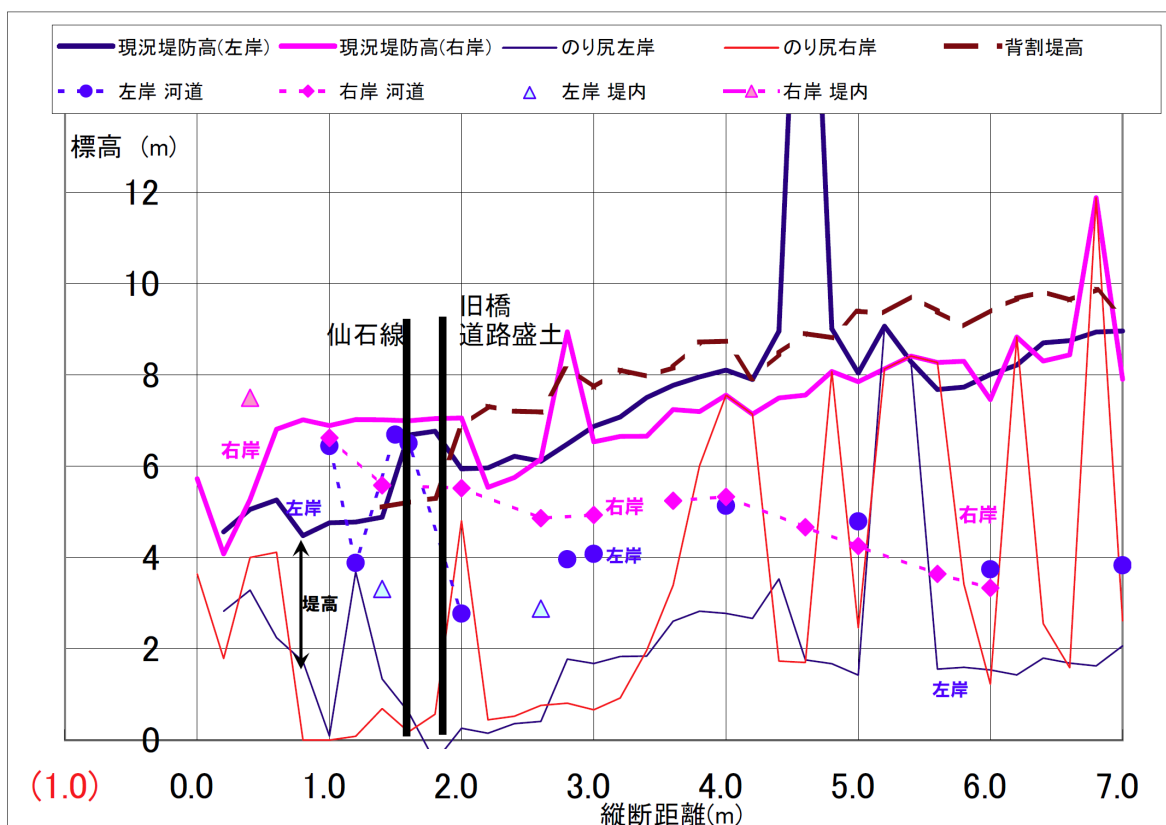
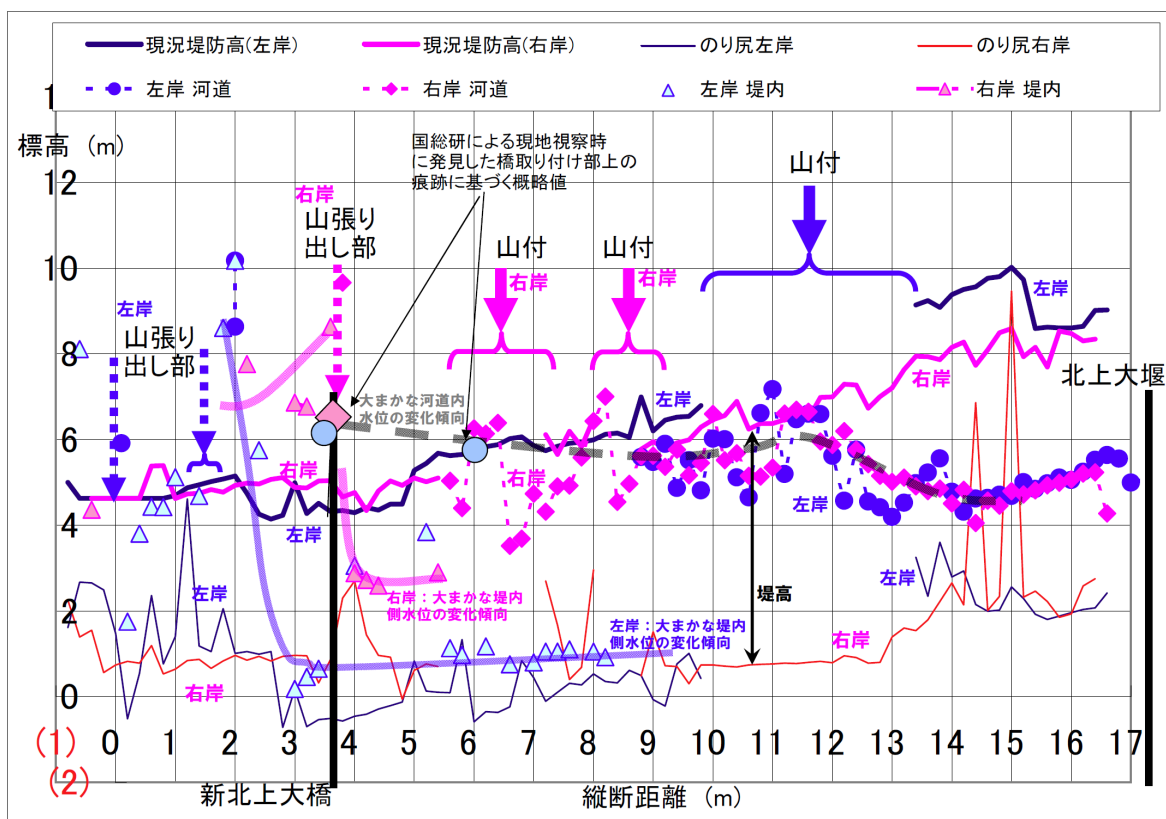
名取川河口から阿武隈川河口に掛けた沿岸域で、海上保安庁のヘリコプターにより、津波第一波の遡上状況が撮影されている。図-3.2.2.53は、その映像の中から津波の波面（津波遡上に伴う湛水域と非湛水域との境界）の位置とその移動状況を確認できた箇所を示し、点線は実線に比べ、撮影時間が短かった箇所である。写真-3.2.2.3は、それぞれの箇所で判読した波面の位置を数秒から数十秒程度ごとに記録した結果であり、撮影時間が十分に確保できた箇所では、伝播距離L、その区間を伝播するのに要した時間Tを求め、LをTで割ることで平均的な伝播速度を算出した。この成果は、海岸研究室で実施した津波シミュレーションの再現性の確認に利用された。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会ホームページ：
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasentsunamitaisaku/index.html, 2011
- 2) 国土地理院ホームページ：
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html.
- 3) 国土交通省東北地方整備局ホームページ：
http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyokuokijishinn/kenntoukai/shiryou2_1.html.

参考になるホームページアドレス

- 1) 河川津波対策検討会、河川遡上津波のシミュレーション結果、第2回配布資料
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasentsunamitaisaku/index.html
- 2) 国土地理院、災害関連情報
http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html
- 3) 国土交通省東北地方整備局、北上川等堤防復旧技術検討会資料
http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyouokijishinn/kenntoukai/shiryou2_1.html



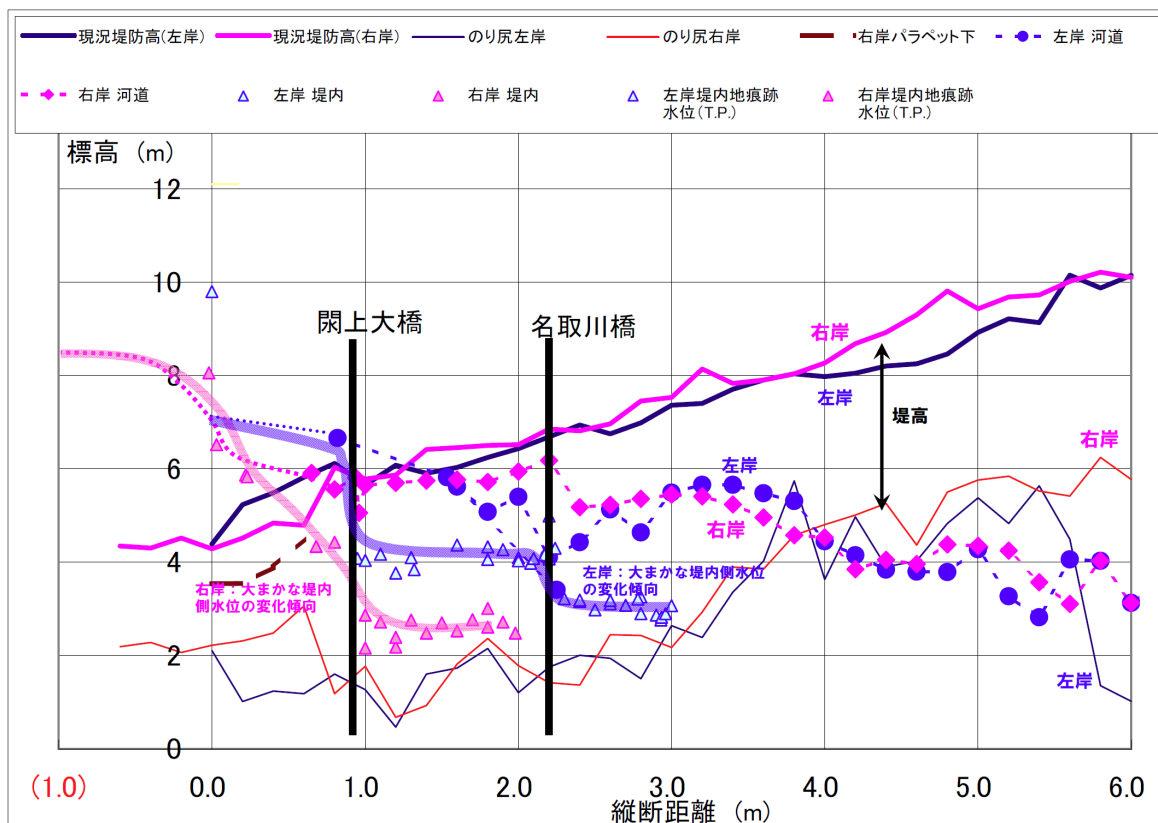


図-3.2.2.51(c) 名取川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

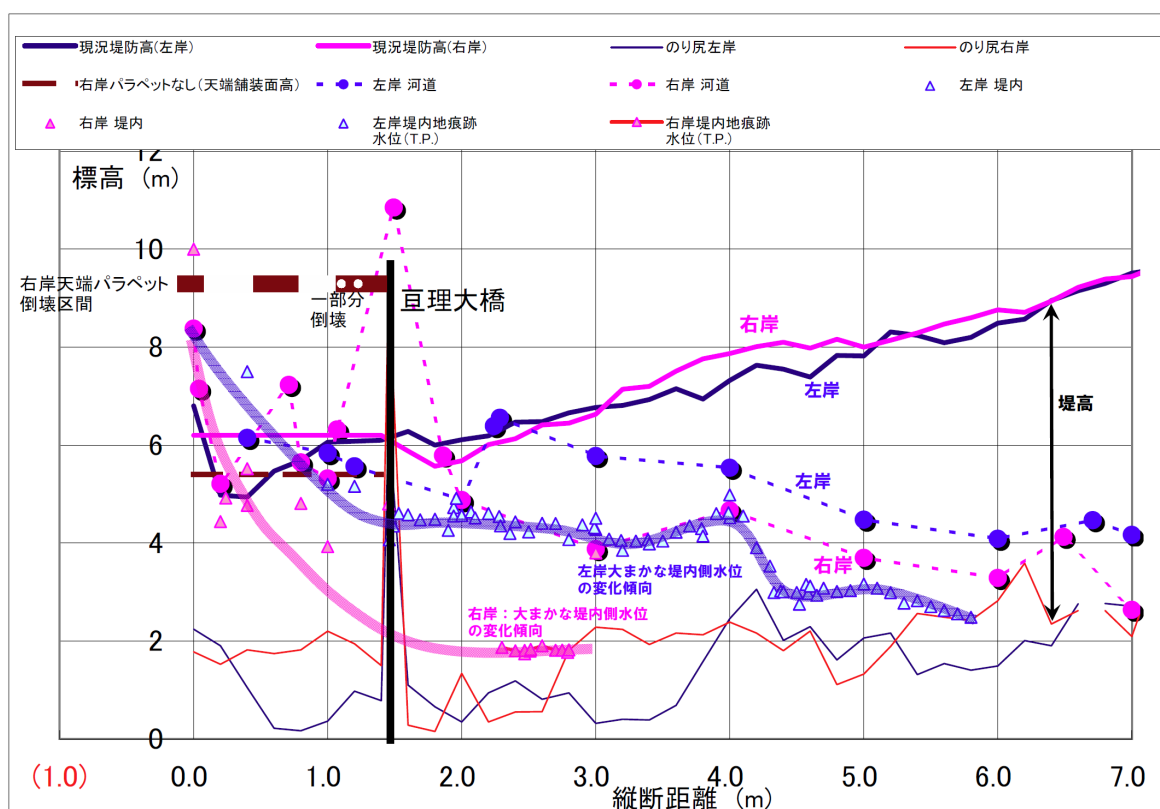


図-3.2.2.51(d) 阿武隈川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

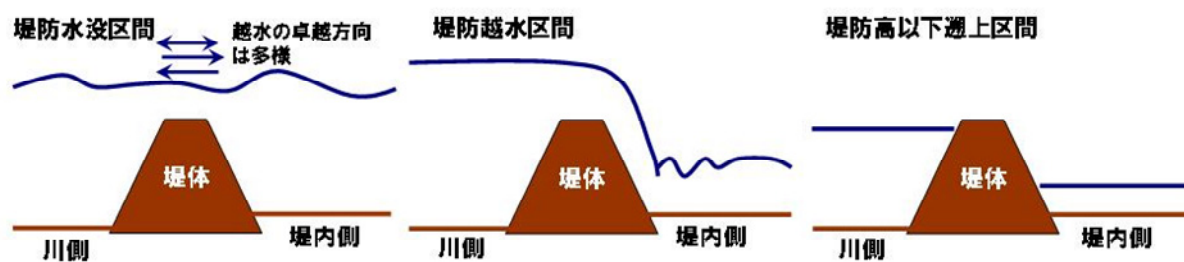


図-3. 2. 2. 52 河川への津波遡上状況の三分区

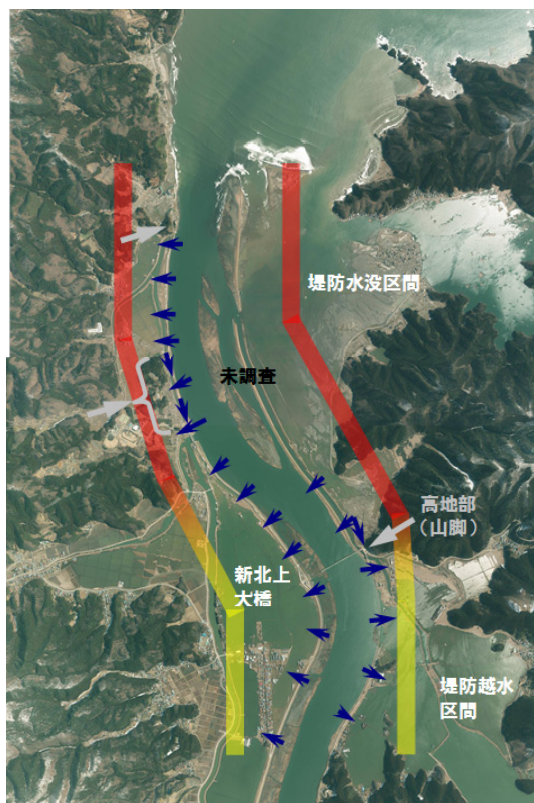


写真-3. 2. 2. 1(a) 新北上川への津波遡上状況

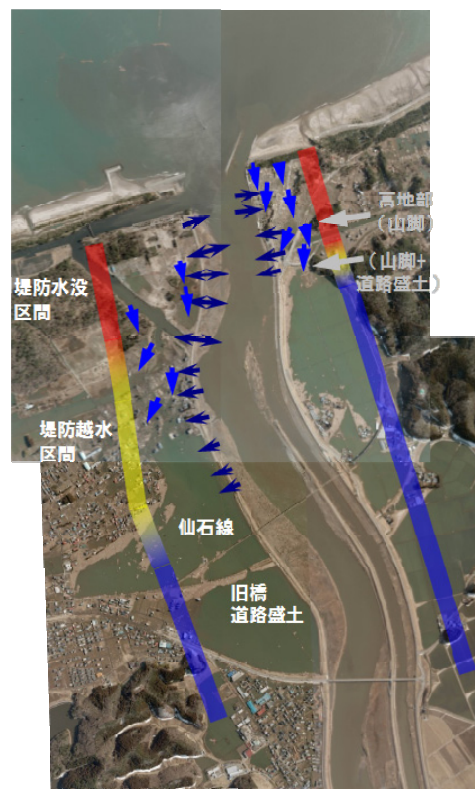


写真-3. 2. 2. 1(b) 鳴瀬川への津波遡上状況

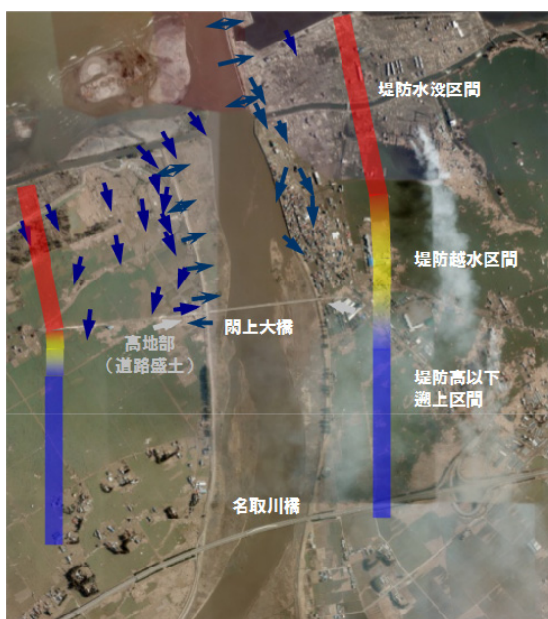


写真-3. 2. 2. 1(c) 名取川への津波遡上状況

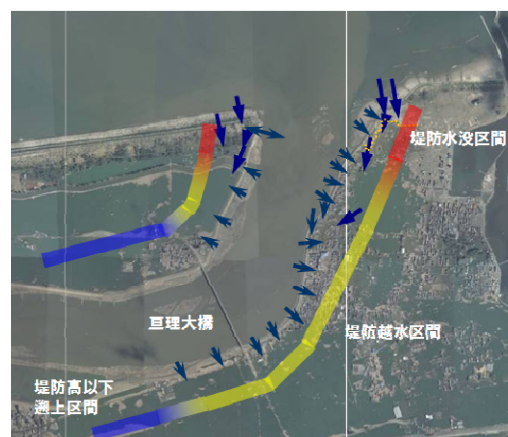


写真-3. 2. 2. 1(d) 阿武隈川への津波遡上状況

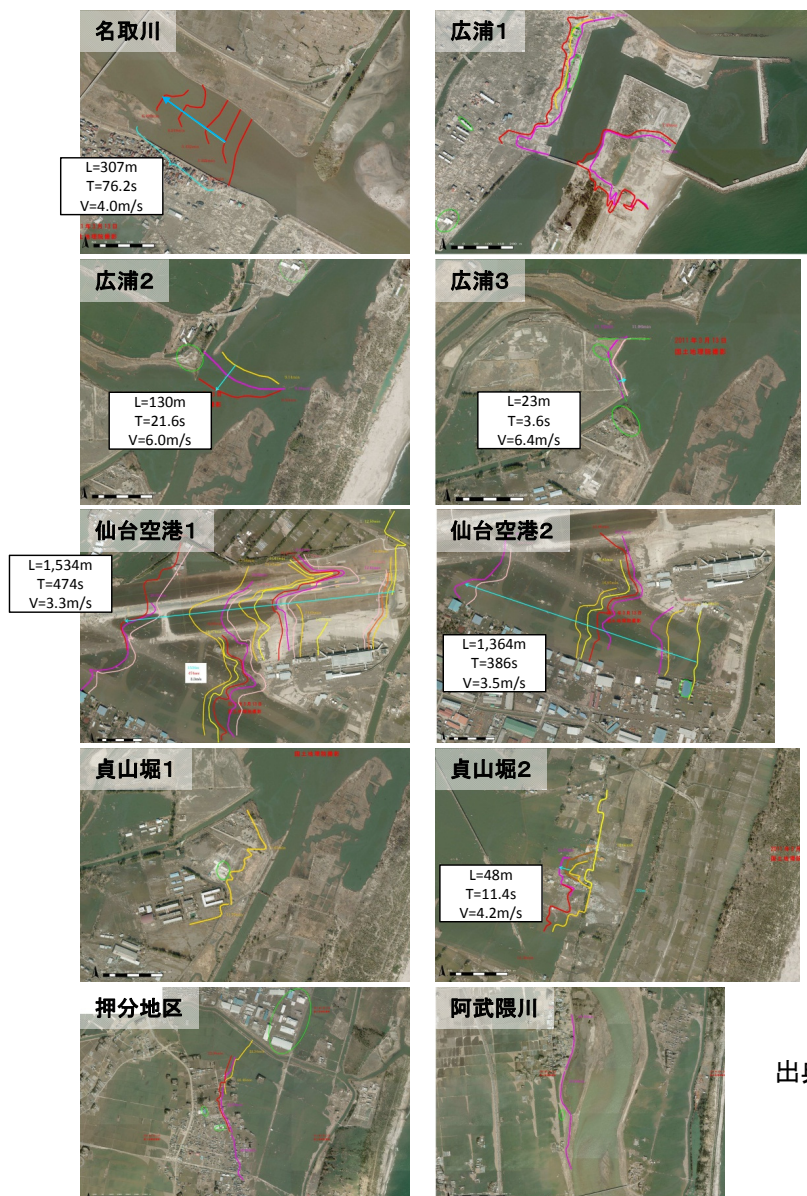
出典) 航空写真は国土地理院による撮影データ



写真-3.2.2.2 堤防天端アスファルト舗装の剥離状況 (鳴瀬川左岸 1kp 付近)



図-3.2.2.53 海上保安庁のヘリコプターによる撮影画像を用いた津波の伝播状況確認箇所
出典) 背景はカシミール 3D <http://www.kashmir3d.com/>を用いて作成



出典) 航空写真は国土地理院による撮影データ

写真-3.2.2.3 図-3.2.2.53 の各箇所における津波の伝播状況

3.2.3 地盤の液状化

(1) 液状化対策技術検討会議

東日本大震災では広い範囲にわたって液状化現象が発生し、住宅・宅地、社会基盤施設等に大きな被害が生じた。国土交通省では「液状化対策技術検討会議」を平成 23 年 5 月に設置し、液状化による被害実態等の把握、液状化判定手法の検証等の各社会基盤施設等に共通する技術的事項について検討を進めた¹⁾。本会議の検討体制を図-3.2.3.1 に示す。

具体的には、現地踏査等により関東地方での液状化発生状況を把握し、東京湾岸や利根川下流域等の埋立地を中心に少なくとも 96 市区町村で液状化が発生したことを確認した。また、確認した液状化の発生実績と代表的な液状化判定法である FL 法による判定結果との比較・分析により FL 法の検証を実施するとともに、高度化に向けた今後の課題を整理した。

以下の(2)～(4)では、本会議の検討に資するため、国総研が(独)土木研究所とも協力の上、東北地方太平洋沖地震の強震記録を分析し、FL 法の妥当性、有効応力解析の適用性を検討した結果²⁾について述べる。なお、建築分野に関連して実施された液状化分析に関しては、3.3.9.2(6)を参照されたい。

(2) 最大加速度分布の推計と FL 法の妥当性検討

東日本大震災では継続時間の長い特徴的な地震動が多数観測され、このような特性が液状化の発生に影響する可能性があることから、強震記録と被害調査結果をもとに FL 法の妥当性を検討した。

FL 法は、液状化抵抗を表す「動的せん断強度比 R 」と地震外力を表す「地震時せん断応力比 L 」の比「液状化抵抗率 FL」を指標とし($FL=R/L$)、FL が 1.0 以下の土層は液状化すると判定する方法である。地震時せん断応力比 L は、地表面における地震動の最大加速度から計算されるため、東北地方太平洋沖地震の地震動の最大加速度分布を推計した。また、継続時間が短い地震動との比較のため、1987 年千葉県東方沖地震(気象庁マグニチュード 6.7)の最大加速度分布を

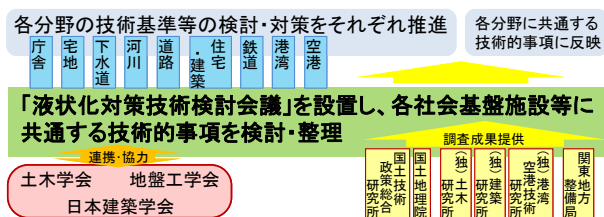
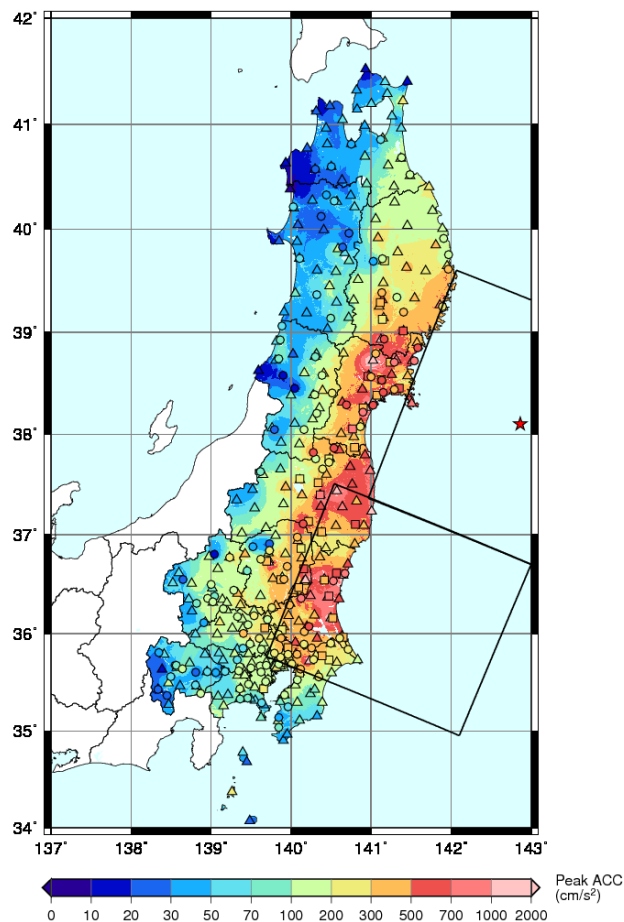
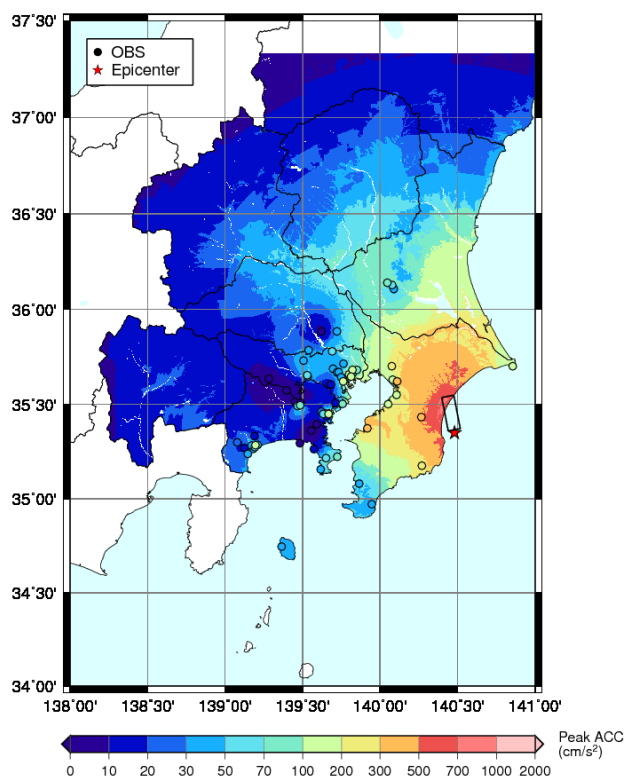


図-3.2.3.1 液状化対策技術検討会議の検討体制

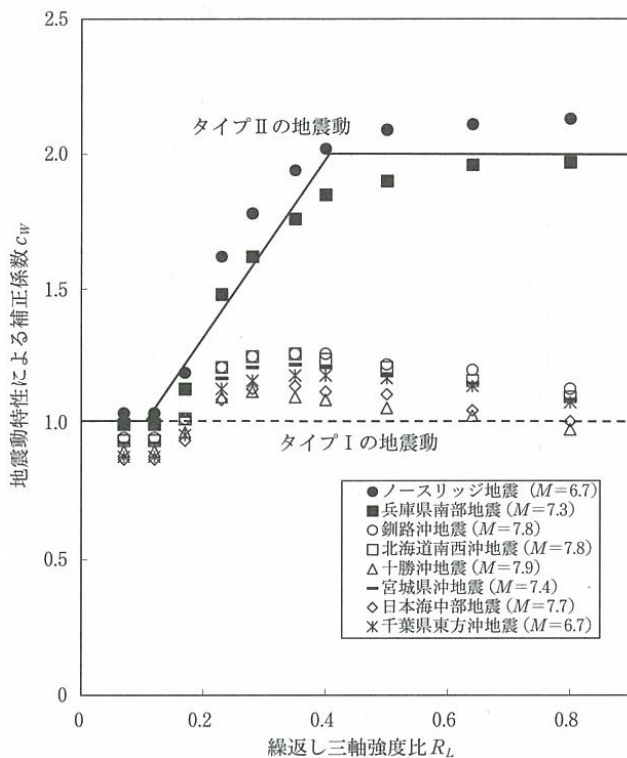


(a) 2011 年東北地方太平洋沖地震

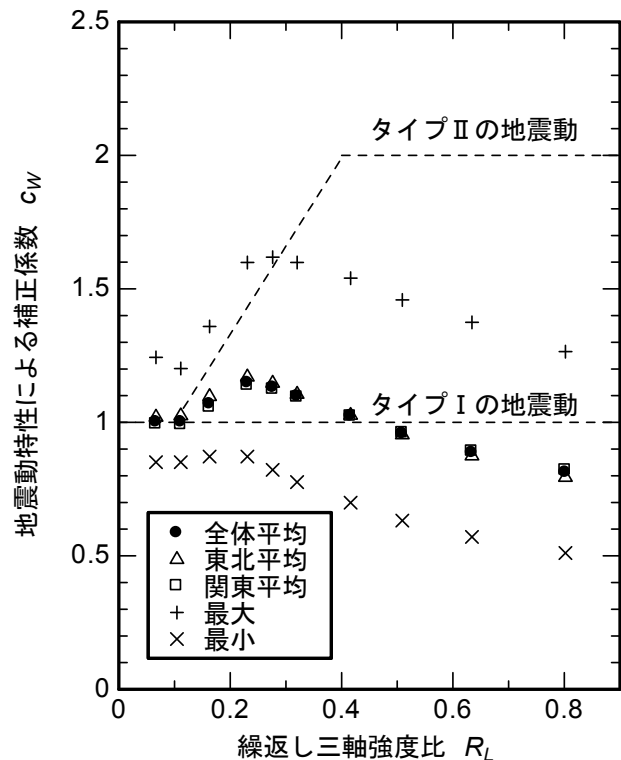


(b) 1987 年千葉県東方沖地震

図-3.2.3.2 推計した最大加速度分布



(a) 道路橋示方書V耐震設計編⁴⁾



(b) 東北地方太平洋沖地震の強震記録

図-3.2.3.3 地震動特性を考慮する係数 c_w の計算結果の比較

同様に推計した(図-3.2.3.2)。ここで、東北地方太平洋沖地震は気象庁、(独)防災科学技術研究所 K-NET および国土交通省の公開データを、千葉県東方沖地震は日本建築学会の公開データ³⁾を用いた。

この最大加速度分布を用いた FL の計算結果から、継続時間の影響が一部に見られる一方で、 $FL > 1.0$ となる地点では液状化が発生しておらず、FL 法による液状化判定に液状化発生の見逃しが見られないこと等が確認された²⁾。

(3) 地震動特性を考慮する係数の検証

上述の FL 法による液状化判定では、動的せん断強度比 R は、 $R = c_w \times R_L$ で表される。ここで、 R_L は繰返し三軸強度比であり、繰返し三軸試験において繰返し回数 20 回で軸ひずみが 5% 生じるのに必要な繰返しせん断応力比(繰返しせん断応力/有効拘束圧)と定義される。また、 c_w は地震動特性を考慮する係数であり、繰返し回数 20 回相当の地震動では $c_w = 1$ 、それよりも繰返し回数が少ない地震動では $c_w > 1$ 、繰返し回数が多い地震動では $c_w < 1$ となる。

ここでは、東北地方太平洋沖地震の際に得られた地動加速度 32 波形から c_w を算出し、道路橋示方書 V 耐震設計編⁴⁾に規定される c_w と比較・検証した。な

お、 c_w は累積損傷度理論に基づき、東・田村(1997)と同様の手順⁵⁾で算出した。

得られた結果を図-3.2.3.3 に示す。同図(a)と比較すると(b)では R_L が 0.4 程度より大きい範囲で 1 を下回る値となっているが、 R_L が 0.4 程度より小さい液状化強度が低い土に対しては $c_w = 1$ 程度となり、従来の知見と概ね整合する結果となった。

(4) 地盤の地震応答解析による再現性の検討⁶⁾

堤防の耐震性評価には、過剰間隙水圧の上昇に伴う液状化の影響を考慮する必要があるが、実地震時に加速度波形と過剰間隙水圧が同じ地点で同時に観測された事例は限られており、過剰間隙水圧の影響を考慮した地震応答解析(有効応力解析)により推定した過剰間隙水圧を観測記録と比較、検証した事例も少ない。

東北地方太平洋沖地震の際、鳴瀬川河口付近の河川堤防で堤防天端部、基礎地盤部で加速度時刻歴波形が、液状化層で過剰間隙水圧が観測された。そこで、基盤層の加速度時刻歴波形記録と強震計設置時の現地土質調査結果を用いて 1 次元有効応力解析⁷⁾を実施し、堤防天端部の加速度時刻歴波形と液状化層における過剰間隙水圧を算出した。その結果と、観測された堤防天端部の加速度時刻歴波形、液状化層の過剰間隙

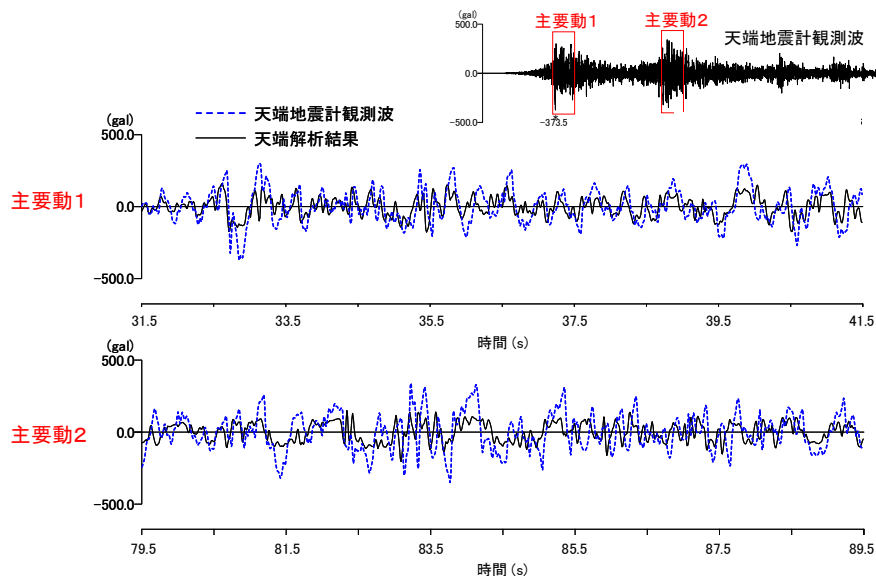


図-3.2.3.4 有効応力解析結果と観測記録（加速度時刻歴波形）との比較

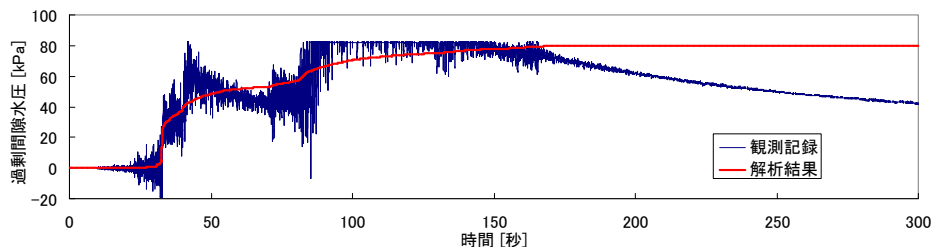


図-3.2.3.5 有効応力解析結果と観測記録（過剰間隙水圧）との比較

水圧をそれぞれ比較した。

得られた結果を図-3.2.3.4 と図-3.2.3.5 に示す。加速度波形の位相等の振動特性は概ね一致している一方で、短周期成分が小さい傾向がある。過剰間隙水圧については全体的な傾向は概ね推定できているが、水圧の消散特性等については十分な再現できていない結果となった。

(5) 今後に向けて

今回得られた強震記録を用いて地盤の動的解析手法を検証し、地盤の変形量の推定精度向上、ひいては液状化対策の合理化に資するよう検討を進めている。

謝 辞

本検討は、(独) 土木研究所地質地盤研究グループ 土質・振動チームと連携のもと実施し、国土交通省液状化対策技術検討会議では種々御助言いただいた。また、気象庁、日本建築学会、(独) 防災科学技術研究所および国土交通省による公開データを用いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省報道発表資料：「液状化対策技術検討会議」の設置について、2011. 5. 12
- 2) 国土交通省報道発表資料：「液状化対策技術検討会議」の検討成果について、2011. 8. 31
(http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_h_h_000154.htmlより入手可能)
- 3) Architectural Institute of Japan: Digitized strong-motion earthquake records in Japan, Vol. 1: The off east coast of Chiba prefecture earthquake, December 17, 1987, 1992
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、2002
- 5) 東拓生、田村敬一：地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化強度評価法、土木技術資料、Vol. 39、No. 9、pp. 50-55、1997
- 6) 松岡一成、片岡正次郎、長屋和宏、金子正洋：東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた河川堤防の地震応答解析、土木学会論文集中A1（構造・地震工学）、Vol. 68、No. 4、pp. I_104-I_110、2012
- 7) 吉田望、東畑郁生：YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法（改訂版Version 2.10）、2005