

第2章 地震動

大塚悟・磯部公一（環境防災研究室）

1. はじめに

調査団第1班では、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動の特徴、余震活動状況、地震動に起因する地盤災害、津波に起因する地盤災害について調査を実施した。各調査結果について概要をまとめる。

2. 調査班の構成

第1班の構成は、環境・建設系の環境防災研究室の教員（教授 大塚悟，助教 磯部公一）から成る。

3. 東北地方太平洋沖地震の概要

2011年3月11日14時46分にマグニチュード9.0という巨大地震が発生した。気象庁によると、震源（破壊開始点）は、宮城県牡鹿半島の東南東130 km付近（北緯38.1°，東経142.9°），震源深さ約24 kmのプレート境界面上とされている（図2.1）。この地点より逆断層型の破壊が発生し広範な部分にプレートの破壊が進展した。その範囲は、岩手県沖から茨城県沖までの南北に500 km，東西に200 kmという極めて大規模な断層面が形成されたと考えられている。これにより宮城県の栗原市で震度7が観測されたほか，震度6強以上の強い揺れが岩手県，宮城県，福島県，茨城県，栃木県，群馬県，千葉県，埼玉県の東日本の広域で観測された。その後もM7クラスの大きな余震活動が継続している。図2.1に

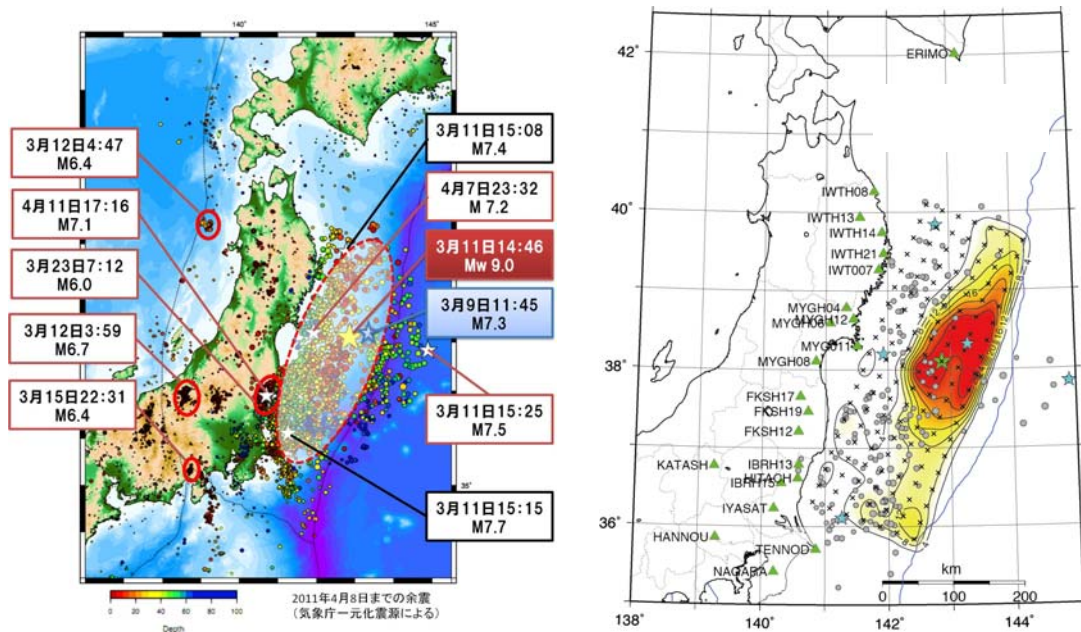


図2.1 東北太平洋沖地震の本震・余震分布¹⁾と断層変位²⁾

東北地方太平洋沖地震の本震と余震の発生分布¹⁾および推定される活動断層面を示す。図 2.2 は地震に伴う地盤変位分布である。断層のずれに伴って東日本沿海部を中心にほぼ全域で東方へ変位を生じている。図には海域における鉛直変位を示しているが、断層近くでは隆起し、沿岸域では沈下していることが分かる。地震後に東北沿岸域で広範囲な地盤沈下が生じたことが報告されている。

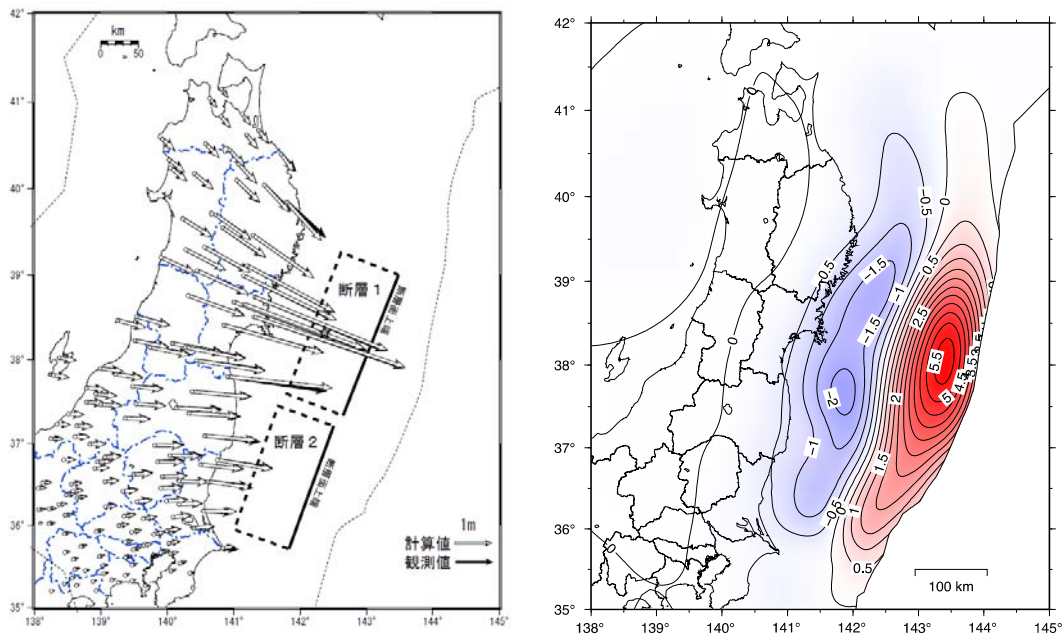


図 2.2 東日本で観測された地盤変位分布^{3),4)}

図 2.3 に東日本の太平洋岸に沿う強震観測点で観測された本震の加速度波形記録の分布¹⁾を示す。同図より、最初の大きな破壊（破壊開始点）が宮城県沖で発生し、強い地震動が東北地方太平洋沿岸地域に伝わり、その数十秒後に破壊開始点より東方の宮城県沖で大きな破壊が発生、その直後に3つ目の破壊が茨城県北部の沖合で発生し、各地震動が伝わっていく様子がわかる。今回の地震の最大の特徴として、複数の大規模な逆断層型地震が連動して発生し、東日本の広範囲で数分間にわたる継続時間の長い大きな地震動が観測されたことがあげられる。図 2.4 に示す兵庫県南部沖地震と東北地方太平洋沖地震において各地で観測された地震動に対する速度応答スペクトル比較図を見ると、兵庫県南部沖地震では速度応答スペクトルが卓越する周期帯が1~2秒付近にあるのに対し、本地震では築館、日立、塩竈の各地域において0.2~0.5秒付近に速度応答スペクトルが卓越する領域が存在している。今回の地震では、各地で一般的に木造家屋に対して影響が大きいとされているキラパルス帯（1~2秒）から外れていたことが、地震動そのものによる家屋への被害が地震の規模に対して相対的に軽微であったと考えられる。

4月11日にいわき市を震源とするM7.1の直下型の余震が発生し、延長7kmともいわれる断層が地表に現れた。図 2.5 に断層の状況を示すが、山体を縦断して断層が地表面に表れる例は珍しい。K-NET観測点の加速度波形には3回にわたる断層の活動が伺える。

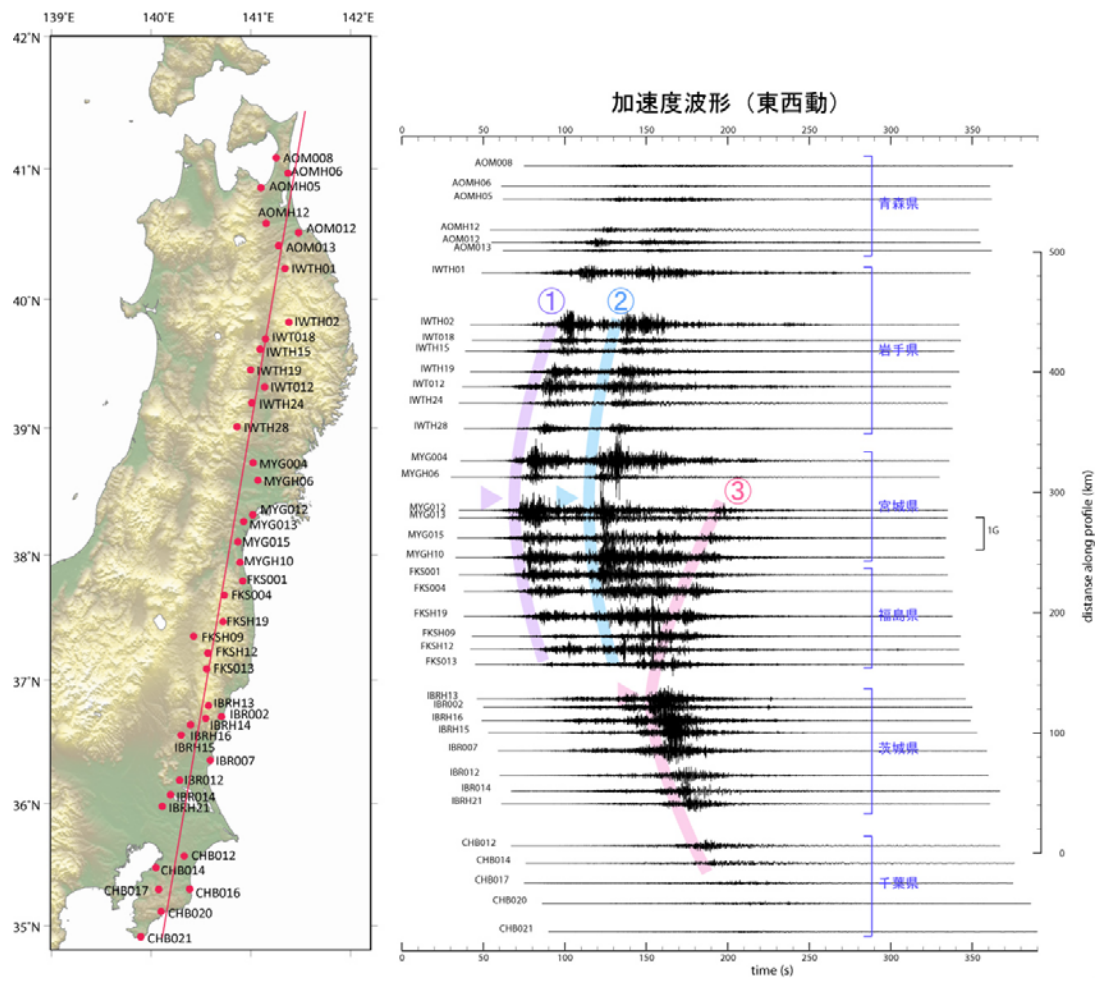


図 2.3 東日本で観測された地震動分布¹⁾

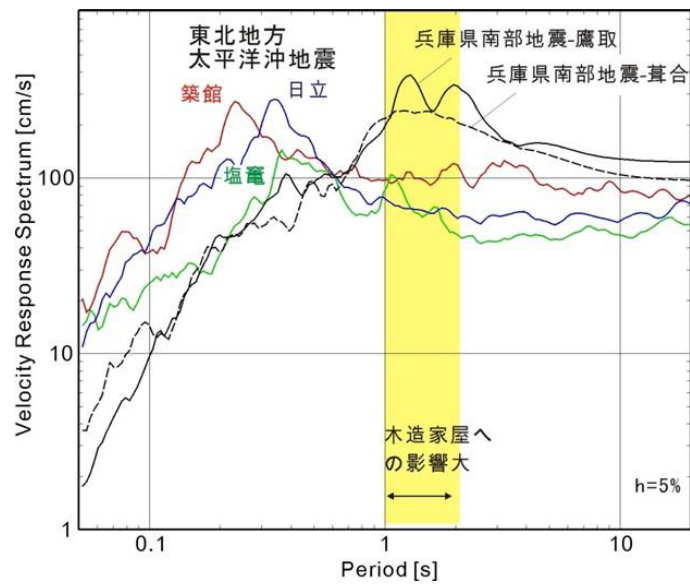


図 2.4 速度応答スペクトルの比較¹⁾



図 2.5 余震で発生した断層と断層変位による建物被害（環境防災研究室）

4. 地震動に起因する地盤災害

地盤災害は大別して、1)谷埋め盛土を中心とした宅地造成地の被害、2)河川堤防の被害、3)人工地盤の液状化、4)自然斜面の崩壊、5)津波による防潮堤の被害、が発生した。地震動は加速度が大きく、かつ振動時間が極めて長いにもかかわらず、地盤災害は中越地震に比較すると比較的軽微である。以下に、地盤災害の特徴や課題を取りまとめる。

1) 宅地造成地の被害は谷埋め盛土や腹付盛土で崩壊事例が多い。特に地下水位の高い谷埋め盛土では盛土の変形により、家屋建物が甚大な被害を受ける事例が多発した。福島市では国道4号線に沿うあさひ台団地で法面崩壊が発生して大きな被害が生じた。また、仙台市では1978年宮城県沖地震で被災した緑ヶ丘団地で法面崩壊が発生し、家屋建物に大きな被害が生じている。近年には宅地造成に伴う切盛り分布図が整備され手危険個所の抽出が進められているが、未だ斜面对策まで実施される例は比較的少なく、大きな課題になっている。特に開発された造成地は既に家屋建物が存在するために、対策工に関する制約が大きく効果的な対策工が開発されていない。後述のように、緑ヶ丘団地では宮城県沖地震による被災に伴って地すべり抑止杭や排水工による対策が行われているにも拘らず、家屋被害が発生している点は大きな問題である。



図 2.6 福島市あさひ台団地の被害（環境防災研究室）

- 2) 河川堤防では従来旧河道との交差点などで地盤の液状化に伴う堤防の損壊が生じることが一般的であるが、宮城県では北上川において粘性土地盤上の堤防が崩壊する事例が発生した。軟弱粘性土地盤では堤防の構築に伴う地盤沈下により堤防直下地盤が沈下してポケットのように地下水の涵養箇所が発生する。今回地震では粘性土地盤上の堤防にて地盤沈下に伴う地下水涵養箇所で液状化に伴う地盤強度の低下が発生して河川堤防が崩壊する事例が発生した。現在、調査研究が行われているが、粘性土地盤の低強度も破壊に関与する可能性があることから詳細調査が望まれる。

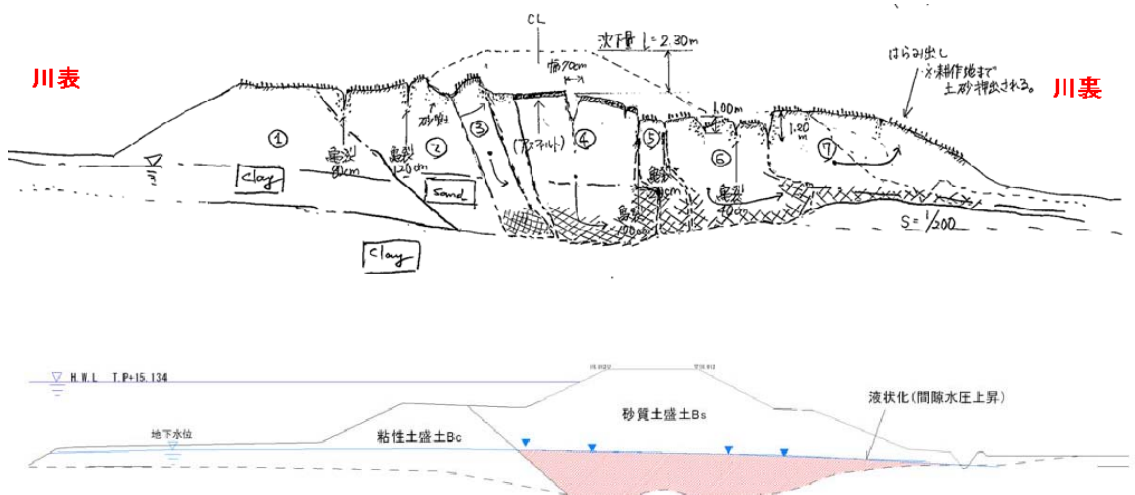


図 2.7 阿武隈川坂津田地区の被害⁵⁾

- 3) 地盤の液状化は東北地方の海岸地域を中心に広範囲に発生したと想定されるが、津波による被害のために液状化被害の痕跡は比較的限定される。しかし、いわゆる自然堆積地盤の液状化ではなく、盛土や埋め土の人工地盤では液状化が広範囲に発生して被害を生じた。関東地区の浦安市をはじめ内陸部でも人工地盤で液状化が発生して家屋建物に甚大な被害が発生した。公共構造物では液状化対策が普及して対策効果が発揮されるのに対して、宅地開発では液状化対策が不十分な地域も数多くあり、選択的に被害が発生している。個人宅地は一般に液状化対策の費用が負担であり、既存建物がある場合には対策工も制約されるために効果的な対策が難しい現状がある。社会的にも大変注目されており、早急の対策工の開発と実施が望まれる。
- 4) 自然斜面の崩壊は直下型地震の中越地震に比較すると被害は軽微である。特に宮城、岩手県は比較的地山も堅いため、ほとんど被害は見られない。福島県では火山性堆積物を中心に比較的規模の大きい斜面崩壊が発生した。溶結凝灰岩は固結した火山噴出物を含んでおり、地震時には繰り返しせん断による堆積圧縮により間隙水圧の発生によるせん断強度の低下が懸念される。しかし斜面被害の発生は限定的で、中越地震の旧山古志村のような広域被害は発生していない。地下水の多い斜面が選択的に崩壊した印象があり、地下水の涵養状況が中越地震の被害地と異なることが主原因と思われる。
- 5) 東北地方太平洋沖地震では津波による防潮堤や防波堤の被害が多数発生した。想定を超



図 2.8 福島県葉ノ木平地区の斜面崩壊とすべり面の露頭（環境防災研究室）



図 2.9 防潮堤の転倒被害と基礎地盤の浸食（環境防災研究室）

える津波高さにより潮位差に伴う基礎の浸食や洗掘が被害の主原因と考えられる。しかし、防潮堤の被害形態には個々の地点で異なる特色があり、堤体の滑動や転倒など被害形態はいくつかのタイプがある。今回の津波は設計想定を超えるものであるために、被害の発生ある程度やむを得ないと思われるが、今後の防潮堤や防波堤をどのように設計するのか、大きな課題が発生した。地震と同様にレベル1、2の設計を行う提案があるが、レベル2の場合には巨大津波に対して被害を減災する構造物や復旧性能の高い構造物を構築する新技術の開発が期待されている。

5. 顕在化した課題と今後の調査研究

今回の地震で顕在化した地盤災害の課題と環境防災研究室の調査研究課題について取りまとめる。

- (1) 地震時における地盤の液状化は完全液状化以外にも部分液状化による地盤強度の低下によって被害の発生する事例がある。福島県では宅地造成地の盛土被害が多数発生した

が、盛土材は火山性堆積物が用いられる事例が多い。火山性堆積物はガスの噴出により土粒子が多孔質材であることや固結・団粒化した土塊が含まれることから、地震動による土塊の粉碎や粒子破碎によって盛土地盤は堆積圧縮するために間隙水圧が生じる（液状化の素因）。火山性堆積物の盛土材への転用は比較的事例の多いことから、盛土材としての性質を調査するとともに、適切な施工管理方法の開発が必要である。



図 2.9 火山性堆積物による盛土の被害（環境防災研究室）

(2) 仙台市緑ヶ丘団地では谷埋め盛土で斜面の変状が生じた。対策工で鋼管杭と排水工が施工されていたにもかかわらず、繰り返し被害が発生した。対策工の施工にも拘らず、斜面の変位被害が発生した原因を数値解析により調査し、適切な対策工の開発を行う必要がある。

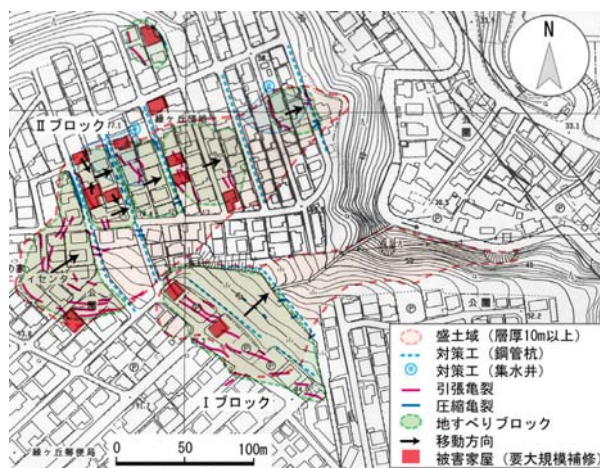


図 2.10 谷埋め盛土の繰り返し被害と耐震対策工（鋼管杭・排水工）⁶⁾

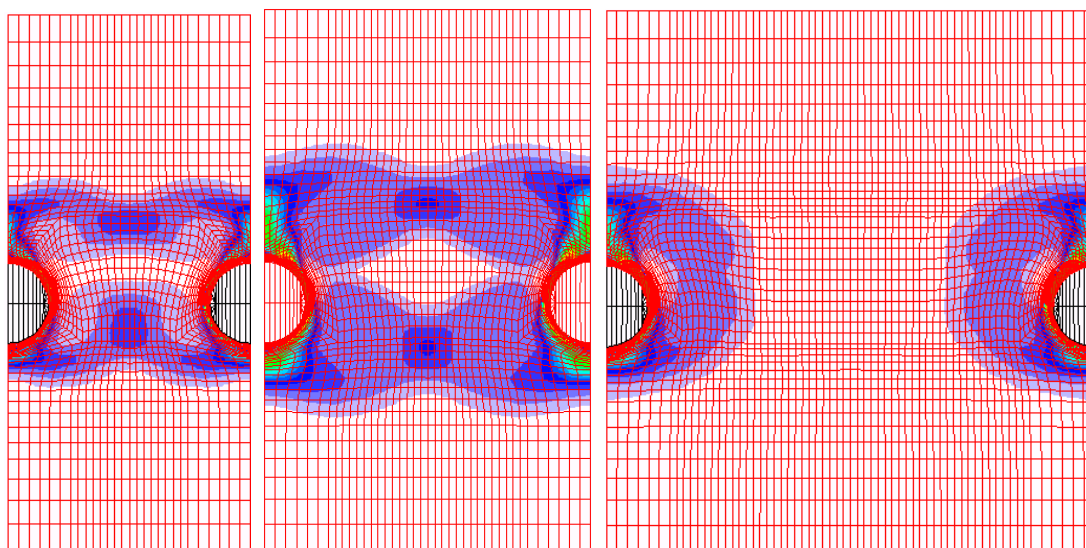
(3) 河川堤防の被害は地震による変形被害が詳細に調査されている。今後各機関で地盤の物性調査が実施されることから、これらの基礎情報を基に液状化による強度低下を考慮した簡易残留変形解析手法の開発を行う必要がある。河川堤防の被害は砂質系材料の被害がこれまで報告されてきたが、今回被害では粘性土地盤での被害が発生しており、被害の実態を数値解析によって明らかにする必要がある。

(4) 砂質地盤上に建設された杭基礎形式の建物が津波により転倒被害を受けた。推測では地震によって液状化した地盤に対して、津波による水平荷重が作用したと考えられる。複合被害ということもできるが、津波に対する建物基礎の検討が必要である。砂質地盤に対しては液状化防止の視点から固化材による地盤改良が一般に行われる事例が多いが、経済性の問題より壁状改良など様々な方法が提案されている。しかし、水平・傾斜荷重を受ける際の壁状改良地盤の支持力を精度良く求める方法が存在しないことから、改良地盤の強度特性を考慮した極限支持力の評価手法の開発が必要である。

沿海部では軟弱な粘性土が厚く堆積することから、多くの建物が杭によって支持されている。地盤は粘性土や砂質土から成る多層系地盤であることから、地震によるせん断波が入射すると地層境界で剛性の高い杭に大きな横荷重が作用する。軟弱な粘性土では地震による変位も大きいことから、変位法を用いた杭の設計は過大設計になる可能性がある。粘性土地盤による杭のすり抜けを考慮した設計を実務に導入する必要がある。



図 2.11 砂質地盤における杭構造形式建物の津波による転倒被害（環境防災研究室）



(a) 3.0D ($R=11.9c_u$)

(b) 4.0D ($R=11.9c_u$)

(c) 6.0D ($R=12.5c_u$)

図 2.12 軟弱地盤中の杭の横抵抗支持力（環境防災研究室，杭間距離の変化）

6. 講演・発表論文・報告等

- 1) 中村晋・仙頭紀明・梅村順・大塚悟・豊田浩史：福島県中通りおよびいわき地域における地盤被害，地盤工学ジャーナル，Vol. 7, No. 1, 91-101, 2012.
- 2) 中村晋（地盤工学会北陸支部調査団：大塚悟・豊田浩史・磯部公一）：福島県中通り地区およびいわき地区の地盤災害，地盤工学会誌，Vol.59 No.6, pp. 44-47, 2011.
- 3) 保科隆・大塚悟・磯部公一：剛塑性動的変形解析法による土構造物の残留変形解析，応用力学論文集，Vol.14, I_251-I_259, 2011.
- 4) 落合弘和・山田健人・大塚悟・磯部公一：新潟県中越沖地震の家屋被害特性の分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学）[特]地震工学論文集（掲載決定）.
- 5) Takashi Hoshina, Satoru Ohtsuka & Koichi Isobe : Development of slice method based residual deformation analysis of earth structure against earthquake, 15th World Conference of Earthquake Engineering (to appear).
- 6) Koichi Isobe, Satoru Ohtsuka & Hirokazu Nunokawa : Field investigation and model tests on unequal settlement of houses due to liquefaction in the Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake in 2007, 15th World Conference of Earthquake Engineering (to appear).
- 7) 日本応用地質学会北陸支部編（大塚悟）：2004年新潟県中越地震地すべり記録集，2011.
- 8) 大塚悟：地盤液状化の被害と予測，防災技術に関する市民講演会，地盤工学会北陸支部，新潟市，2011.
- 9) 大塚悟：東日本大震災調査報告会（地震動と地盤災害），長岡市民講座，長岡市，2011.
- 10) 大塚悟：地震による地盤災害について，長岡技科大・北陸地整 連携防災シンポジウム，長岡市，2011.
- 11) 大塚悟：中越沖地震の疑問に取り組む（地盤調査編），新潟県土の会，新潟市，2011.
- 12) 大塚悟：中越地震について－被害例から得られる教訓－，山地災害防止セミナー，新潟県長岡地域振興局農林振興部，長岡市，2011.
- 13) 大塚悟：地盤液状化被害の特徴と事例，高度技術者研修，長岡技術科学大学，長岡市，2012.

7. 参考文献

- 1) 東京大学地震研究所：火山・地震情報：2011年3月東北地方太平洋沖地震（http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/），2011.
- 2) 気象庁気象研究所：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定—近地強震波形を用いた解析—，www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2011tohokutaiheiyo/source-process2.pdf，2011.
- 3) 国土地理院：東北地方太平洋沖地震の震源断層モデル(暫定)1.水平変動，<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html>，2011.
- 4) 国土地理院：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の滑り分布モデルから計算される上下変動，<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314.2-index.html>，2011.
- 5) 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：北上川等堤防復旧技術検討

会報告書，2011.

- 6) 村尾英彦，釜井俊孝，太田英将，佐藤信宏：2011年東北地方太平洋沖地震による都市住宅域の斜面災害，地すべり学会第50回研究発表会，1-11，2011.