

〔農工研技報 213〕
145～173, 2012〕

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による 利根川下流沿岸域の用排水路等の被害と特徴

浅野 勇*・渡嘉敷勝*・森 充広*・西原正彦*

目 次

I 緒言	145	V 考察	166
II 地震動	146	1 液状化の発生と微地形の関係	166
1 地震動と被害の特徴	146	2 開水路の地震被害の特徴	166
2 震源および地震動の特徴	146	3 水路などの地震の損傷とその対策の考え方	168
III 調査概要	148	4 地盤条件からみた地震時の水路の損傷と耐震対策方針	170
IV 利根川下流沿岸域の農業水利施設の被害	148	VI 結言	171
1 調査地点	148	参考文献	171
2 調査地域の地震動	148	Summary	173
3 液状化被害とその特徴	148		
4 個別地区の被害状況	149		

I 緒言

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分ごろ、三陸沖から茨城県沖にかけての太平洋沿岸でマグニチュード 9.0 ($M_w=9.0$) の非常に大きな地震が発生した。3 月 11 日、気象庁はこの地震を「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」（以下、今回の地震と呼称）と命名した。 $M_w=9.0$ 規模の地震はわが国の観測史上最大であり、宮城県栗原市で震度 7、岩手県から千葉県までの広い範囲で震度 6 弱以上の強い揺れが観測された。今回の地震による死者と行方不明者は、2011 年 11 月 14 日現在 1 万 9 千人を超え、7 万 1 千人以上の住民が未だ不自由な避難生活を余儀なくされている（東日本大震災復興対策本部，2011）。今回の地震による農地・農業用施設の被害総数は 2011 年 11 月 7 日現在、39,322 箇所、被害総額は 8,302 億円に達し、農地の損壊が 17,456 箇所、4,012 億円、ダム、ため池、パイプライン、水路などの農業用施設等の損壊が 21,457 箇所、3,658 億円、農村生活関連施設の損壊が 409 箇所、633 億円と発表されている（農林水産省，2011a）。農地の被害としては、津波による流失や冠水等の被害が大きく、被害推定面積は太平洋沿岸の 6 県で約 2 万 4 千 ha と報告されている（農林水産省，2011b）。このように今回の地震による農地・農業用施設の被害は極めて甚大であった。地震国であるわが国では、今後もレベル 2 クラ

スの地震発生が想定される。災害に強く防災機能の高い農業・農村を復興するためには、今回の地震による農地・農業用施設の被害の把握と分析を行い、その知見を減災対策に生かすことが必要である。本報告では、利根川下流沿岸域で発生した用排水路等の液状化被害調査を中心に地震によって発生する用排水路等の損傷形態と耐震対策の考え方について述べる。

なお、現地調査および現地研修会では、茨城県農林水産部、千葉県農林水産部、稲敷市農政部、稲敷市土地改良所、新利根土地改良区、利根川水系土地改良調査管理事務所の関係各位より資料提供および現地状況の説明を賜りました。さらに、茨城県より余津谷地区における石綿管および陶製暗渠に関するデータを提供して頂きました。ここに記して感謝を表します。また、本文の地図情報の作成には国土交通省国土地理院の電子国土 Web システム技術情報および土地条件図を使用させて頂きました。地震波形については気象庁と（独）防災科学技術研究所のデータを使用させて頂きました。液状化地区の航空写真については Google earth のデータを使用させて頂きました。微地形および液状化履歴地点のデータについては関東学院大学若松教授が作成されたデータおよびその描画に（独）防災科学技術研究所が運営する地震ハザードステーションを使用させて頂きました。さらに、調査地域のボーリングデータについては国土交通省が運営する国土地盤情報検索サイトよりデータを入手させて頂きました。ここに記して感謝を表します。

* 施設工学研究領域施設機能担当

平成 23 年 12 月 14 日受理

キーワード：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震、地震による損傷、液状化、用排水路、現地調査

気象庁気象研究所（2011）によれば、本震の震源位置は牡鹿半島の東南東約 130km 付近の深さ約 24km、破壊した主断層の長さは約 450km、幅は約 150km と推定されており、最大すべり量は約 30m に達する。強震計記録などから推定される断層破壊過程は、最初の大きな断層破壊が宮城県沖で発生し、その数十秒後に 2 回目の断層破壊が起き、それから間もなく 3 回目の破壊が茨城県北部の陸地に近い沖合で生じたとされている（東大地震研究所，2011）。このような 3 つの大きな断層破壊が連続して複雑なかたちで発生した地震は極めて稀であり、地域によって大きく異なる地震波形が観測された。東京大学地震研究所が作成した地震加速度波形の分布を Fig.2 に示す（東大地震研究所，2011）。Fig.2 から宮城県以北では地震動の振幅のピークが 2 つあるのに対し、福島県から茨城県にかけてはピークが 1 つであることが分かる。図中の①～③は 3 つの断層破壊に対応する波形の開始点を結んだ線であり、3 つの断層破壊過程が地震動に大きな影響を与えたことがわかる。今回の地震の現在までの最大余震 ($M_j=7.7$) は本震から約 30 分後に茨城県沖の深さ 43km で発生した。茨城県稲敷市役所の震度は本震で震度 6 弱、余震で震度 5 強であった。後ほど述べる利根川下流沿岸域の液状化被害地域では、本震も含め 30 分の間に 2 回の強い地震動を受けたことになる。

防災科学技術研究所，気象庁，鉄道総合技術研究所などにより記録された強震波形から，今回の地震の地震動の性質が明らかにされつつある。筑波大学の境（2011）は，防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net の強震波

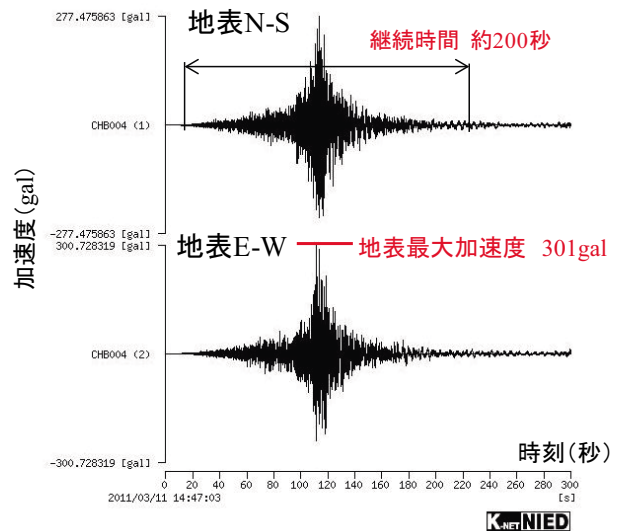


Fig. 3 強震計の加速度波形記録 K-NET 佐原（CHB004）
Observed accelerations at K-NET SAWARA Station (CHB004)

形の分析を行い，今回の地震では震度 6 弱以上の揺れが広範囲に観測されたが，地震波の加速度応答スペクトルは 1 秒以下の短周期が卓越しており，木造住宅や中低層の建築物の大被害に結びつく 1～2 秒の長周期の応答がさほど大きくない地震動であったことを報告している。利根川沿岸下流の K-NET 佐原観測点（CHB004）における本震の地震波形を Fig.3 に，中央大学の國生ら（2011）によって計算された佐原観測点および江戸崎観測点の加速度および速度応答スペクトルを Fig.4 に示す。両観測

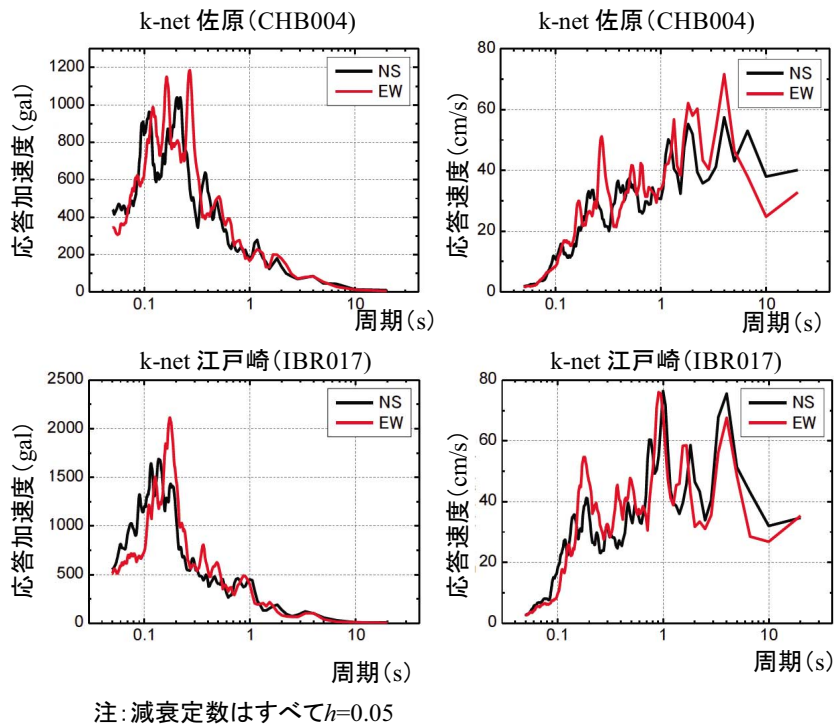


Fig. 4 K-NET 佐原，江戸崎観測点の加速度および速度応答スペクトル（中央大学國生研究室報告書に加筆）
Acceleration response spectrum and velocity response spectrum at K-NET SAWARA, EDOSAKI
(Improving data of the report by Geotechnical Engineering, Laboratory, Chuo University)

点の応答スペクトルの分布傾向は良く似ており、応答加速度は周期0.1～0.3秒の極短周期に、速度応答は周期1～10秒にピークが存在する。**Fig.4**からは利根川沿岸下流では0.1～0.3秒の極短周期の加速度応答が卓越していたことがわかる。地震動の周波数特性および継続時間と地盤の液状化の関係は十分解明されておらず、液状化が発生した場合の地盤の非線形化の問題とともに今後検討が必要な課題である。

Ⅲ 調査概要

液状化による農業水利施設の被害状況を確認するため、2011年4～6月に利根川下流沿岸地域の被害調査を実施した。調査方法は、主として目視により、地盤変状、噴砂、施設の沈下、浮き上がり、破損状況を確認した。なお、水田の液状化の被災の程度については、農研機構作物研究所の近藤(2011)が提示した作付けの観点から分類した液状化区分に基づき**Fig.5**に示す3段階に分けて判定を行った。

Ⅳ 利根川下流沿岸域の農業水利施設の被害

1 調査地点

調査地点を**Fig.6**に示す。茨城県取手市から利根川に沿って千葉県香取市までの11地点を調査した。大規模な液状化(10ha以上)が発生した地区を赤丸(●)、中

小規模な液状化の発生地区を黄丸(●)、用排水機など点施設の調査地点を青丸(●)で表す。液状化発生地区では、地区のほぼ中央に丸をプロットするように努めた。

2 調査地域の地震動

今回の地震に対する調査地域の地表最大速度(Peak Ground Velocity: PGV)分布を**Fig.7**に示す。PGVのコンター図は産業技術総合研究所地震動マップ即時推定システムを利用して作成した(産業技術総合研究所, 2011)。調査地点およびK-NET江戸崎、佐原観測点の位置を図中に示した。**Fig.7**から、本震では、調査地域には液状化が発生する目安となるPGVが15～20cm/sを越える地震動が入力しており、調査地域の液状化の可能性が高いことがわかる。

3 液状化被害とその特徴

茨城県では225haの水田が液状化した。特に、稲敷市西代(にししろ)、香取市石納(こくのう)、稲敷市結佐六角(けっさろっかく)地区では大規模な液状化が発生し、約180haの水田が作付け不能となった。また、用排水路、パイプライン、暗渠排水にも大きな被害が発生し、用水不足などにより稲敷市全体で540haの水田が作付け不能となった。千葉県では740haの水田が液状化したが、そのうち約9割は農家および関係者の努力で田植えまでに復旧、仮復旧した。しかし、神崎町向野(むかひの)、香取市石納地区では大規模な液状化が発生し、20haの



1. 小規模(小):
水田への噴砂の出現は限定的。噴砂厚約5cm以下。2011年の水稲の作付け可能。

2. 中規模(中):
水田の凹凸は30cm程度、噴砂厚5-10cmが水田の2割程度。プラウ、レベラによる均平化、施肥によるムラの軽減などにより2011年の水稲の作付け可能。

3. 大規模(大):
圃場の凹凸の差が60cm以上、噴砂が圃場の最大5割程度を覆い、厚いところで40cmを超える。2011年の作付けは困難。復旧には土木工事が必要。

Fig. 5 水田の液状化の被害程度区分
Indicator of the degree of liquefaction damages of paddy



Fig. 6 調査地点
Locations of surveyed sites

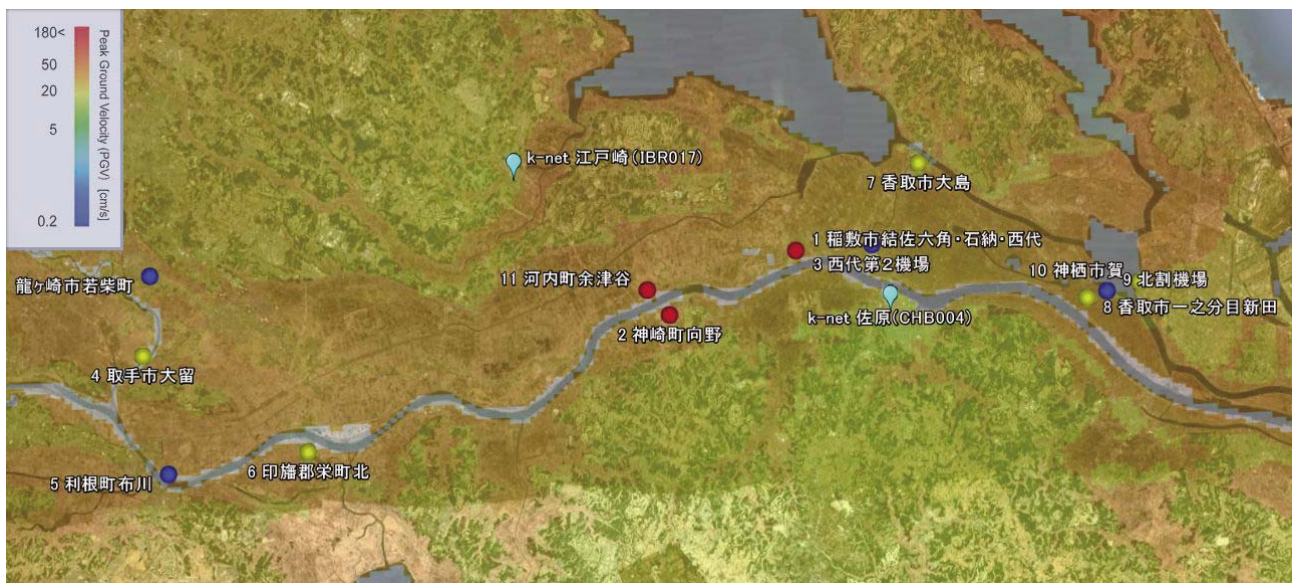


Fig. 7 調査地域の地表最大速度（PGV）分布
Distribution of the peak ground velocities (PGV) in surveyed area

水田が液状化による直接被害のため、329haの水田が用水路等の農業施設の被害のため作付け不能となった。利根川下流沿岸域における液状化の特徴は以下の通りである。

- (1) 利根川沿いの旧河道地帯に浚渫、埋立て、盛土などにより人工的に造成された水田に大規模な液状化が発生した。
- (2) 大規模な液状化が発生した地点は1987年の千葉県東方沖地震 ($M_s=6.7$) 等の過去の地震によって液状化発生が記録されている液状化履歴地点と一致する場合が多く、これらの地域では再液状化が発生したと推定される。

4 個別地区の被害状況

a 西代・石納・結佐六角地区および西代第2機場（調査番号1, 3）

稲敷市西代、結佐六角地区、香取市石納地区は利根川左岸に位置する水田地帯である。調査は2011年4～6月にかけて行った。Fig.8に調査箇所、国土交通省の地質ボーリング地点および各地区の液状化推定範囲を示す。なお、液状化推定範囲は主に水田が液状化した範囲を示し、その範囲は踏査およびGoogle earthの航空写真から推定した。Fig.9に土地条件図を示す。土地条件図から、結佐六角および石納地区において液状化が発生し



Fig. 8 調査地点と液状化発生推定範囲
 Surveyed sites and estimated areas of liquefaction

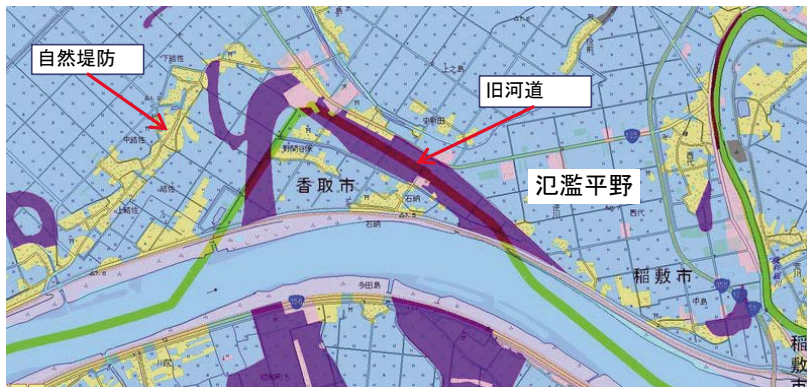


Fig. 9 土地条件図
 Land condition map

た区域と旧河道の分布がほぼ一致することがわかる。昭和30年前後に、この旧河道地帯は、利根川の浚渫砂で埋め立てが行われ、その後水田が造成された。また、この地区は1987年の千葉県東方沖地震の際にも噴砂等が多数発生し、激しい液状化が確認された地区でもある(古藤田・若松, 1988)。国土交通省(2011)が公表する「国土地盤情報検索サイト」のボーリングデータによれば、Fig.8に示す液状化が発生した地点(黄丸)の地質構造は、1m程度の水田表土の下に深さ8m程度まではN値1程度の極めて緩い砂層が、8m以深がN値10以上の砂層が分布している(Fig.10)。一方、西代地区とよく似た地質構造の香取市佐原口(利根川をはさんで西代地区の対岸に位置する)では、ボーリングによる地層構造に基づき液状化発生の検討が行われ、地表から10m程度まで分布するN値1~8の砂層の液状化評価指標 P_L 値は27と、激しい液状化の可能性があると報告されている(山田, 2011)。このことから、西代地区においても、深度約8mまでに分布する砂、シルト層において

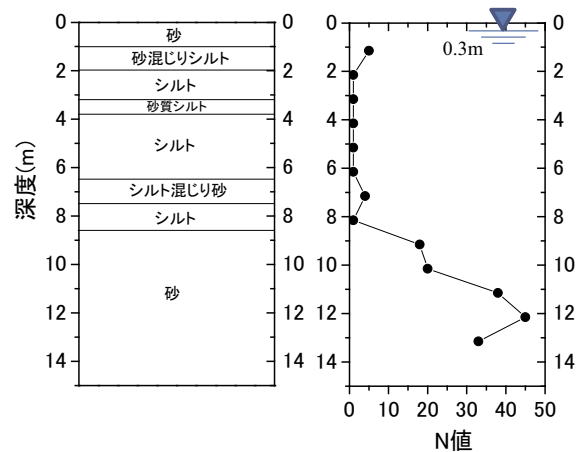


Fig. 10 西代地区の地質構造
 Geological column at Nishisiro area

液状化が発生した可能性が高いと推測できる。以下、この地区で発生した特徴的な被害について報告する。



Fig.11 西代地区の液状化水田 (地点番号 2)
Liquefied paddy in Nishisiro (No.2)



Fig.14 石納排水機場 (地点番号 5)
Drainage pumping station in Kokuno (No.5)



Fig.12 石納地区の液状化水田 (地点番号 7)
Liquefied paddy in Kokuno (No.7)



Fig.15 試掘状況 (地点番号 4)
Test trench (No.4)



Fig.13 石納地区の中央排水路 (地点番号 6)
Main drainage canal in Kokuno (No.6)

1) 水田の液状化被害

西代地区の水田の液状化の状況を Fig.11 に示す。Fig.8 の橙線で囲んだ液状化推定領域の中では、利根川に隣接する南側の水田で液状化被害が大きかった。水田の液状化の程度は中～大であった。液状化推定領域の北側では水田の液状化の程度は小さかった。液状化の程度が小さい水田の一部では稲の作付けが行われたが、液状

化の程度が大きかった南側の水田では作付け不能であった。西代および石納地区の水稲作付け不能面積は 83ha に達した。作付けができなかったのは、水田の不陸など液状化の直接被害に加えて、用水供給の起点である西代第 2 機場 (地点番号 15) が被災し、用水供給が途絶したことも原因のひとつであった。北側の水田では近傍の排水路から小型ポンプで水田への給水が行われ稲の作付けが行われたが、排水路の塩分濃度が高いため、一部水田で塩害による稲の生育不良が生じた。

石納地区の水田の液状化の状況を Fig.12 に示す。石納地区の中央には排水路が縦断しており (Fig.13)、この排水路の両側の水田が特に激しく液状化した。水田の液状化程度は中～大であった。地区内の石納排水機場周辺でも液状化が発生したが、排水機場のポンプ設備は運転可能な状態であった (Fig.14)。石納排水機場の近傍の水田では暗渠管の試掘が行われた。試掘の状況を Fig.15 に示す。掘削断面から、深さ 30～40cm の砂混じりの水田作土の下に暗緑色の砂層が分布することがわかる。このようにこの地区では水田下に飽和した砂層が広く存在する。一方、石納地区の中でも Fig.8 に「液状

化無」と示した利根川沿いの区域では、液状化被害はほとんど発生しなかった。この区域では、Fig.13 に示した排水路を堰上げし、排水路から用水を確保し、稲作が通常通り行われた。

結佐六角地区の水田液状化の状況を Fig.16 に示す。水田の液状化の程度は西代、石納、結佐六角の3地区中で最大であり、ほぼ全域の水田が激しく液状化した。このため、地区全域で水田の作付けができず、作付け不能面積は75haに達した。



Fig. 16 結佐六角地区の液状化水田 (地点番号 9)
Liquefied paddy in KessaRokaku (No.9)



Fig. 17 噴砂により埋没した排水路 (地点番号 14)
Drainages Buried by liquefied sands (No.14)



Fig. 18 排水路の蛇行 (地点番号 8)
Meandering of drainage (No.8)

2) 排水路の被害

地区内の排水路では、噴砂が排水路に侵入し排水路が砂で埋没する被害が多くみられた。噴砂で埋没した排水路では通水断面を確保できず通水障害が発生した (Fig.17)。排水路は鉄筋コンクリート杭柵工による土留護岸 (柵渠) が多く、水路底に床板が無い構造のため、排水路の底から噴砂が水路内に侵入し、排水路が砂で埋まったと推測される。5月の調査時点では、排水路の砂は重機によって排水路の外に排出されており、排水路は通水可能な状態まで応急復旧されていた。平成16年 (2004年) 新潟県中越地震では、底板を有するフルームあるいはL型水路などで、液状化により底板の破壊や躯体の傾きが発生し通水機能の回復が遅れた (浅野ら2006)。柵渠構造は、噴砂が水路の底から侵入し易い反面、砂の排出も容易な構造と考えられ、被災後の部材の再利用および応急復旧のための施工性を高めることにより、液状化の可能性が高い排水路区間の水路形式として今後の改良が期待される。

地区内では帯状に激しく液状化した領域が認められた。帯状の領域では噴砂、沈下、段差などの地盤変状の程度が他の地点に比べ大きかった。帯状の領域を排水路が通過する地点では排水路に大きな変状 (沈下、浮上、側壁の倒れ込み、段差) が見られた。このように排水路



Fig. 19 排水路の浮上、傾き (地点番号 10)
Uplifted or inclined drainage (No.10)



Fig. 20 排水路の傾き (地点番号 12)
Inclined drainages (No.12)



Fig. 21 ボックスカルバートに発生した段差（地点番号 11）
A relative gap between the box culvert and ground (No.11)

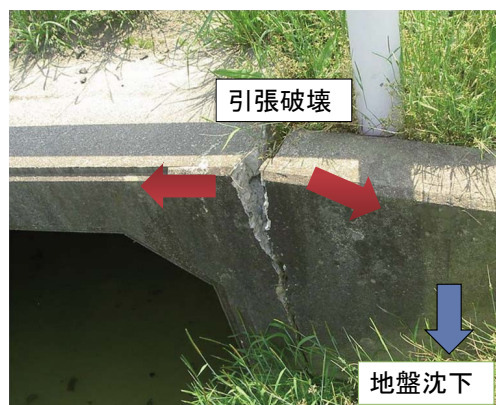


Fig. 22 本体とウイング接合部での引張破壊（地点番号 11）
Tensile failure of the joint between the main culvert and the wing wall (No.11)



Fig. 23 西代第 2 機場の被害状況（地点番号 15）
Damages of the second drainage pumping station in Nishishiro (NO.15)

の損傷の程度と地盤の変形の大きさの間には調和的な関係が見られた。石納地区での排水路の被害状況を Fig.18 に示す。排水路の構造は柵渠である。被災区間は 10m 程度であった。結佐六角地区では約 100m の区間で排水路（柵渠）が 1m 以上浮上した（Fig.19）。浮上により排水路部材は損傷したものの、5 月の調査時点では Fig.19 に示すように排水路内の砂は排出され、水路の通水機能は応急的に確保されていた。国土交通省利根機場の西側に沿って北から南に流れる排水路（柵渠）では、約 300m の区間で柵渠杭の傾きやコンクリート板の倒れ込みが発生した（Fig.20）。この区間では排水路沿いの道も大きく上下にうねっていた。この被災区間についても柵渠部材の損傷は大きいものの、調査時点では排水路内に侵入した噴砂は排出され、水路の通水機能は応急的に確保されていた。

3) ボックスカルバートの被害

ボックスカルバートや橋など杭による支持が行われている施設では、杭により施設の沈下が抑制されたため施設と周辺地盤との間で段差が生じた。結佐六角のボックスカルバートに発生した段差を Fig.21 に示す。ボック



Fig. 24 陶製暗渠管の不陸と継手での損傷
Unevenness and damages of joints of unglazed drain pipes

スカルバートと周辺地盤との境界で最大 20 ～ 30cm の段差が発生した（Fig.22）。また、ボックスカルバートのウイング部が周辺地盤と共に沈下したため、カルバート本体とウイングの接合部が引張破壊した（Fig.23）。杭支持の施設では、施設と地盤との境界部に变形が集中し、境界部に破壊が生じやすいと考えられる。一方、カ

ルバート本体には不同沈下等は発生していないことからカルバート本体の構造的な損傷は小さいと推測される。段差の発生により最も懸念されるリスクは、車などの通行の障害や段差に衝突するなどの事故の発生である。段差の発生が予測される施設では地震発生後の早期の通行規制などの安全対策と土嚢やアスファルトを用いた応急復旧方法について今後検討が必要である。また、ウイング部についても縁切りを行うなど液状化による段差の発生がカルバート本体に影響を及ぼさないような構造の検討が必要と考える。

4) 用排水機場の被害

西代第2機場の被災状況を Fig.23 に示す。機場およびその周辺に液状化が発生したため、ポンプ場建家の傾き、水路への噴砂の侵入、鋼管の支床からの抜け出し、樋門とポンプ場建家および機場と管路の接合部などにひび割れなどの被害が発生した。構造や質量が異なる構造物では、地震による応答が異なるため、その接合部に損傷が集中する傾向がある。西代第2機場は西代の水田地区へ用水を供給していたが、機場建家の傾斜、配管などの破損、民家の下にパイプラインが配管されており2次被害の恐れがあることなどからポンプの運転はできない状態にある。現在、西代第2機場の上流に新たに新西代揚水機場と幹線用水路を建設中であり、平成24年度からはこれらの施設により西代地区の水田に給水を開始する予定である。

5) 陶製暗渠管の被害

利根川下流沿岸域の水田では、排水のため田面から0.6～0.8m深に陶製暗渠管が設置されている。今回の地震により暗渠管も液状化による大きな被害を受けた。暗渠管の状態を確認するために、結佐六角地区および西代地区では試掘および管の不陸を測定するための暗渠管の

縦断測量が実施された。試掘の結果、暗渠管には最大10cm程度の不陸および管の損傷が発生していることが確認された (Fig.24)。また、暗渠管内への砂の流入なども観察された (Fig.25)。地盤の変形により暗渠管には不陸および逆勾配が発生しており、液状化水田では暗渠管の排水機能が大幅に低下していると推測された。茨



Fig. 25 暗渠管への噴砂の流入
Inflow of liquefied sands into an unglazed drain pipe



Fig. 26 ボーリングデータ地点
Location of the points of the boring survey

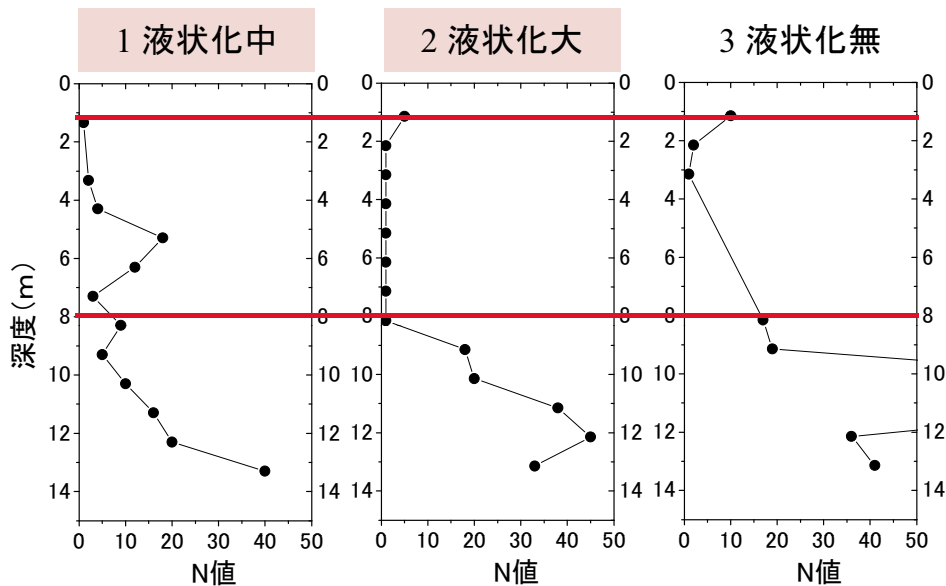


Fig. 27 N値と液状化の関係 (範囲1)
Relationship between N-value and liquefaction in Area 1

城県では、液状化水田の暗渠についてはすべて新設する方針で復旧に取り組んでいる（茨城県，2011）。

6) 地質構造と液状化の程度の関係

国土交通省（2011）が公表する「国土地盤情報検索サイト」のボーリングデータを用いて、地質構造と液状化の発生について調べた。検討対象のボーリングデータ地点と液状化推定範囲（赤線）を Fig.26 に示す。ボーリング 1～3（範囲 1）とボーリング 4～7（範囲 2）について検討を行った。結果を Fig.27～28 に示す。これらの結果から、表層から 4～8m 程度まで N 値が 1～2 の地層が存在する地点では液状化が発生しており、特に 8m 程度まで N 値 1～2 の緩い層が存在する地点での液状化の程度が大きかった。すなわち、西代地区の液状化においては、地表付近に N 値 1～2 の緩い砂層が存在し、その緩い砂層の厚さが大きい地点ほど液状化の発生の可能性及びその程度が大きい傾向があると推測される。

b 神崎町向野（調査番号 2）

神崎町向野は利根川右岸に位置する水田地帯である。

2011 年 5 月 1 日、16 日に調査を実施した。Fig.29 に調査箇所および液状化推定範囲を示す。Fig.30 に土地条件図を示す。Fig.30 から向野地区では液状化発生地点は旧河道地帯に集中したことがわかる。また、この地区は西代・石納・結佐六角地区と同様に 1987 年の千葉県東方沖地震の際に激しい液状化が確認された地点でもある（古藤田・若松，1988）。向野地区の土質構成と液状化抵抗率 F_L 値の深度分布を Fig.31 に示す（山田，2011）。Fig.31 から、この地区では深度 12m 程度まで液状化抵抗率 F_L 値が 1 以下の砂層、シルト層が存在し、非常に液状化の可能性が高い地盤であることがわかる。以下、この地区で発生した特徴的な被害について報告する。

1) 水田の被害

Fig.29 に示した液状化推定範囲の大部分は水田であり、その面積はおよそ 20ha である。向野地区の水田の液状化の状況（地点番号 1）を Fig.32 に示す。この地区の水田の液状化の特徴は、水田が全面的に液状化し、噴砂量が極めて多いことである。5 月 1 日の調査時点では、

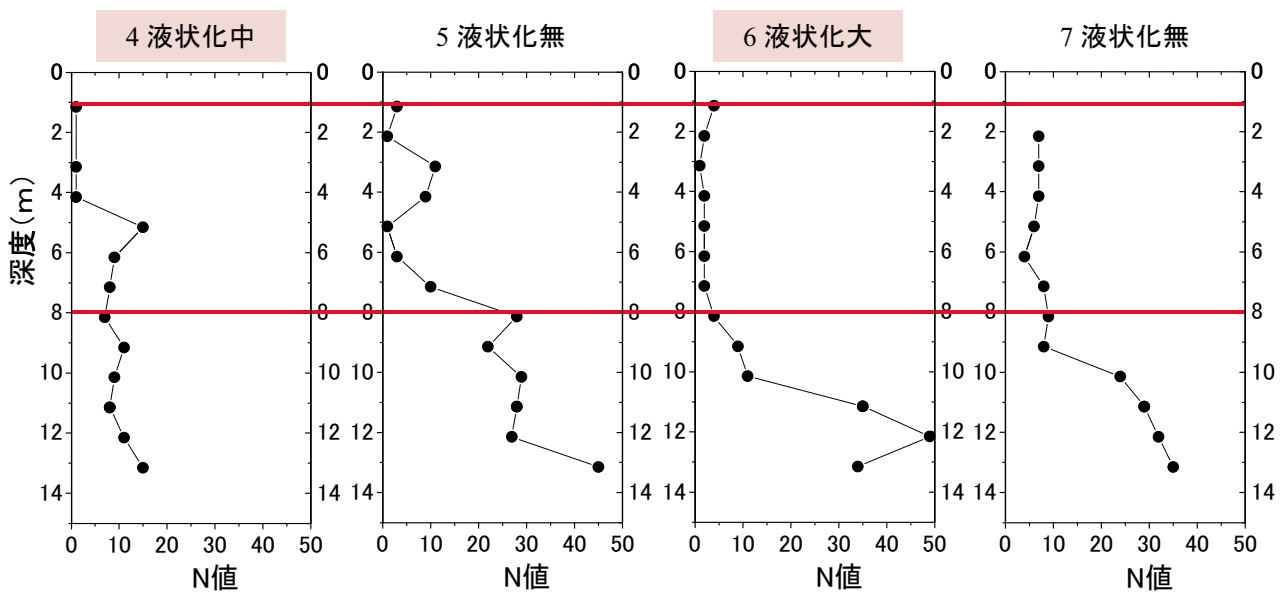


Fig. 28 N 値と液状化の関係（範囲 2）
Relationship between N-value and liquefaction in Area 2



Fig. 29 調査地点と液状化発生推定範囲
Surveyed sites and estimated areas of liquefaction



Fig. 30 土地条件図
Land condition map

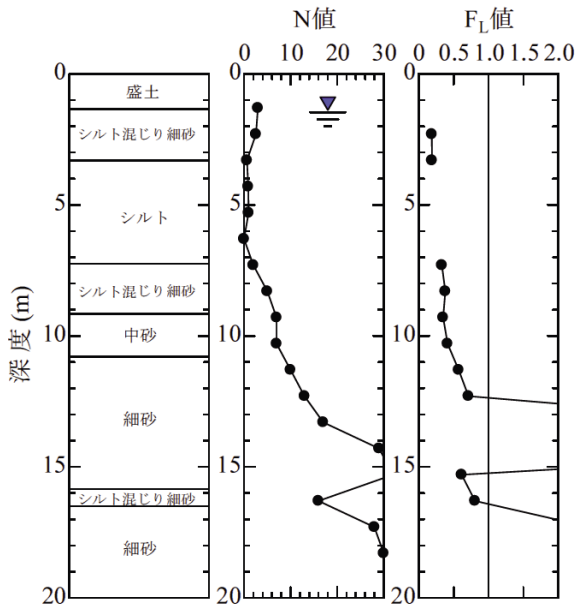


Fig. 31 神崎町向野の地質構造と F_L 値 (山田, 2011)
Geological column and F_L Value at Kono (Yamada, 2011)



Fig. 32 大規模に液状化した水田 (地点番号 1)
Large liquefaction of paddies (No.1)

水田に帯状に発生した噴砂がその後の風雨で拡散し、水田全体が砂漠の様な状態を呈していた。Fig.33に水田の噴砂状況を示す。噴砂の上には珪化木や粘土塊が観察された (Fig.33)。珪化木は古い樹木の化石であり、旧利根川により運搬された深度 10m 程度の砂層に埋もれていたと推定される。このような砂以外の地盤材料が地表面に噴出したことは、地盤のかなり深部で液状化が発生した可能性と液状化による地盤材料の噴出が極めて強いものであったことを示唆する。

水田の幹線暗渠 (ヒューム管) の被災状況を調査するために試掘が行われた。試掘の状況 (地点番号 4) を Fig.34 に示す。水田の下の土は粘土まじりの砂質土であり、作土と下層土の区別がつきにくい地層であった。

2) 排水路の被害

向野地区では、液状化推定範囲の北側に沿って西から東に排水路が伸びている。排水路の構造は柵渠および

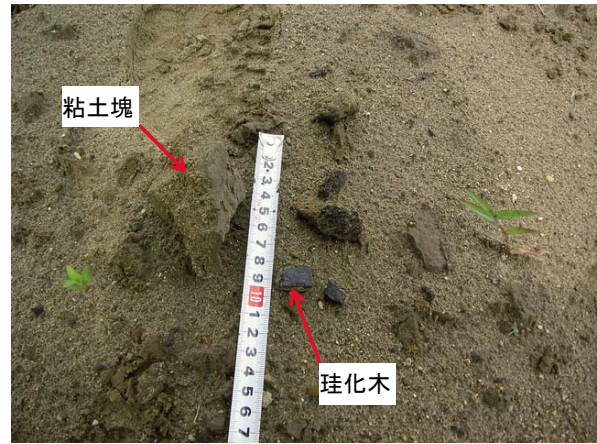


Fig. 33 地表に噴出した木化石および粘土塊 (地点番号 1)
Fossil wood and lump of clay on the surface of the liquefied sands (No.1)



Fig. 34 試掘の状況 (地点番号 4)
Test trench (No.4)



Fig. 35 噴砂で埋没した水路 (地点番号 2)
Drainages Buried by liquefied sands (No.2)

土水路 (農村公園の中) である。この排水路では、地盤の液状化により約 1km にわたり、噴砂の侵入、柵渠の傾きなどが発生した。5 月 1 日の調査時点では一部区間が噴砂により埋没しており通水不能な状態であった (Fig.35)。その後、6 月 15 日の調査時点では、噴砂は水路内から排除されており、水路部材は傾いているものの、通水機能は回復していた (Fig.36)。他の地点 (地点番号 3)



Fig. 36 排砂後の水路の状況（地点番号 2）
Drainages after discharge of the sands (No.2)



Fig. 38 トイレ建家に発生した段差（地点番号 5）
A relative gap between the public lavatory and ground (No.5)



Fig. 37 排水路の倒れ込み（地点番号 3）
Inclination of drainages (No.3)



Fig. 39 橋の端部に発生した段差（地点番号 6）
A relative gap between the bridge and ground (No.6)

でも排水路の倒れ込みが発生していたが、砂の排出により通水機能は回復していた（Fig.37）。

3) その他の施設の被害

農村公園では、公園のトイレ建家（地点番号 5）とその周辺地盤との間に最大 40cm 程度の段差が生じた（Fig.38）。建家は排水路側がやや大きく沈下する不同沈下が生じていた。また、この建家から 10m ほど離れた排水路にかかる橋では、橋と周辺地盤の間にトイレ建家と同様な段差と損傷が発生していた（Fig.39）。これらは、結佐六角地区で発生したボックスカルバートの段差と同じく杭支持された施設の沈下が抑制されたために発生したと推測される。ただし、この建家ではボックスカルバートでは見られなかった不同沈下が生じており、液状化が発生する地区では、直接基礎などの杭形式を含めた施設の沈下対策の検討が必要と考える。

c 取手市大留，利根市布川，栄町北（調査番号 4，5，6）

小貝川と利根川合流地点付近の 3 地区の被災状況を調査した。調査は 2011 年 4 月 24 日に行った。常磐線が小貝川を渡る小貝川鉄橋を起点に、小貝川と利根川の合流点を経由し、利根川沿岸の栄町北まで調査した。調査

地域の微地形と過去の液状化履歴地点を Fig.40 に示す。図中の「1923.9.1」と表示された青いプレスマークは関東大震災の際に液状化履歴地点である（若松，2011）。また、微地形の分布については地震ハザードステーションから kml ファイルを入手し描画を行った（防災科学技術研究所，2011）。Fig.40 から取手市大留（調査番号 3）は後背湿地に、利根町布川（調査番号 4）および印旛郡栄町北（調査番号 5）は自然堤防に区分された微地形に属することがわかる。

1) 取手市大留（調査番号 4）

大留（おおどめ）地区は小貝川の右岸に位置する。小貝川の堤防沿いの水田および宅地約 2ha が液状化の被害を受けた。Fig.41 に液状化発生推定区域を示す。Fig.42 に土地条件図を示す。液状化の領域は、土地条件分類からは、氾濫平野、自然堤防に属する。国土交通省の国土地盤情報検索より入手した液状化発生地点近傍のボーリング柱状図からは、地表面から 1～4.5m に N 値 2～3 のシルト層、4.5～6.5m に N 値 5 を越えるシルト層、8m より深くなると N 値 1 のシルト質粘土が存在する。また、同ボーリングデータから地下水水位は 7 月の観測値で地表面から 0.5m と極めて浅い。この地区では、古関



Fig. 40 調査地域の微地形と調査地点
Relationship of locations of surveyed sites and microtopography



Fig. 41 液状化発生領域
Estimated area of liquefaction



Fig. 43 液状化した水田
Liquefied paddies

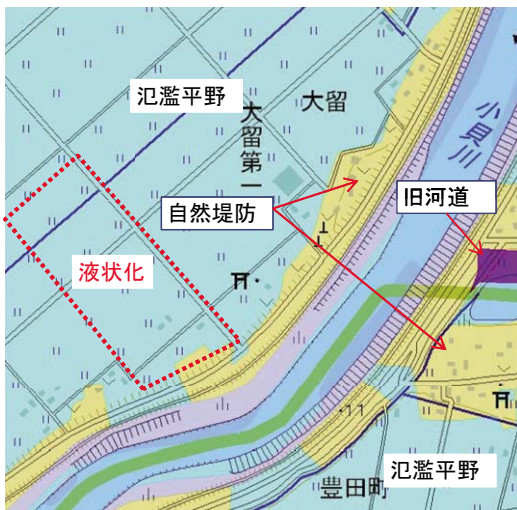


Fig. 42 土地条件図
Land condition map

ら (2011) の現地調査が行われており、採取された噴砂の粒度は均等係数が小さく、「特に液状化の可能性があり (液状化判定 A)」と判定されている。また、小貝川の対岸に位置する旧河道地帯では液状化の程度が小さいことが報告されている。

地区内では、水田の噴砂と電柱の傾き (Fig.43)、道路の亀裂・陥没 (Fig.44)、排水路への砂の侵入および排水路の浮上 (Fig.45)、排水路側壁の倒れ込み、パイプラインの損傷などの被災が見られた。調査時点でパイプラインについては塩ビ管を用いた応急復旧が進められていた。また、側壁の倒れ込みが発生した排水路では、木製の切梁を設置した応急復旧が進められていた (Fig.46)。

2) 利根町布川 (調査番号 5)

布川 (ふかわ) 地区は利根川の左岸に位置する水田地帯である。被災発生地点を Fig.47 に示す。土地条件図



Fig. 44 道路の陥没
Cave-in on the road



Fig. 45 排水路の浮上
Uplift of drainages



Fig. 46 木製切梁による排水路の応急復旧状況
Restoration of damaged drainages with wooden support struts



Fig. 47 調査地点
Surveyed sites

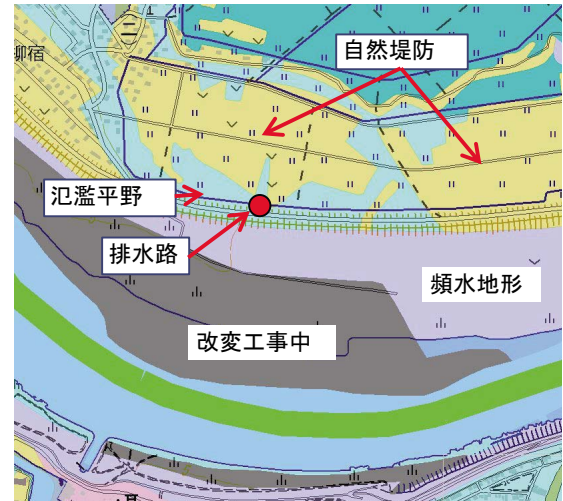


Fig. 48 土地条件図
Land condition map



Fig. 49 堤防法面の亀裂 (川裏)
Cracks on the slope of the bank (on the side of the landward)

を Fig.48 に示す。本地区では、利根川の堤防が 460m にわたり沈下し、堤体に亀裂、はらみだしなどが発生した。川裏の法面に発生した亀裂を Fig.49 に示す。亀裂からは堤体材料と思われる砂が観察された (Fig.50)。川表の河川敷には多くの噴砂が確認されたが、川裏の水田地帯には噴砂はほとんど観察されなかった。このことから、排水路が位置する川裏の水田では西代地区などのように大規模な液状化は発生していないと推定される。

川裏の堤防法尻に沿ってコンクリート矢板護岸排水路が設けられていた。排水路では、堤防法尻部のはらみだ

しによる偏圧を受け、矢板の倒れ込みなどの損傷が発生した (Fig.51)。矢板部材の損傷は、矢板本体、笠コンクリートの曲げ破壊などが観察された。Fig.52 に曲げ破



Fig. 50 亀裂から観察された堤体材料 (川裏)
Cracks with a step and bank materials (on the side of the landward)

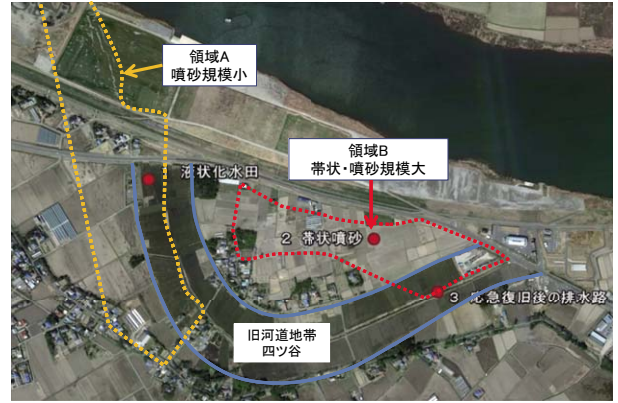


Fig. 53 調査地点と液状化発生推定範囲
Surveyed sites and estimated areas of liquefaction



Fig. 51 コンクリート矢板型排水路の倒れ込み (川裏)
Inclination of concrete pile drainages (on the side of the landward)

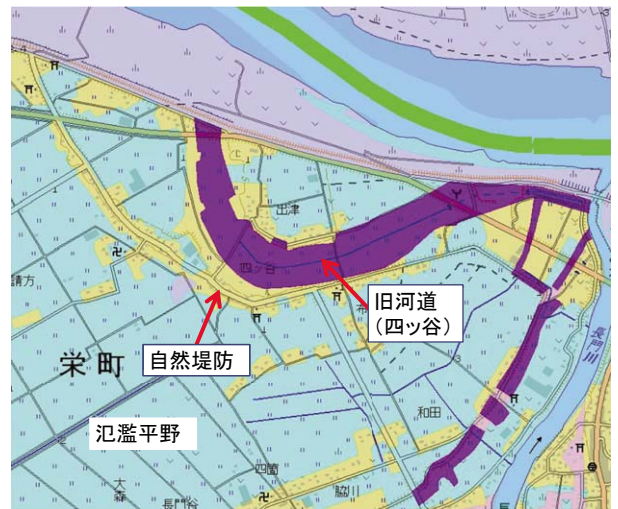


Fig. 54 土地条件図
Land condition map

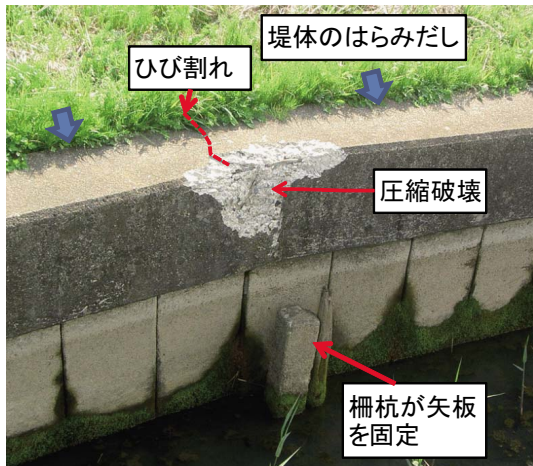


Fig. 52 笠コンクリートの損傷
Cracks of the concrete cap

壊が発生した笠コンクリートを示す。堤防から矢板型水路に土圧が作用し水路壁が水路内側に変形したが、柵渠の杭により水路が固定支持され、Fig.52に示すように杭の部分で笠コンクリートが曲げ破壊に至ったと推測される。笠コンクリートが設置された矢板型水路では、質量が大きな天端の笠コンクリートに慣性力が集中し、矢板の倒れ込みによる被害が発生し易くなると考えられる。

このような損傷形態は平成16年(2004年)新潟県中越地震の際にも観察された(浅野ら, 2006)。なお、この地区では、排水路内への噴砂の侵入などは発生しなかったため、矢板の損傷が発生しても排水路の通水機能に低下は見られなかった。

3) 印旛郡栄町北(調査番号6)

栄町北地区は利根川の右岸に位置する水田、宅地帯である。被災発生地点をFig.53に示す。土地条件図をFig.54に示す。液状化はFig.53に示す領域AおよびBで発生した。地区内には、旧河道地帯である四ツ谷地区があるが、領域Aと重なる一部区域で液状化の発生が見られたものの、液状化の程度は小さかった。領域Aでは水田への噴砂が認められたが、その程度は小さく、水田、道路などの不陸、亀裂もほとんど観察されず、農業水利施設の損傷も見られなかった。また、電柱の傾きも見られなかった。液状化の程度が小さいことから、調査時点ではレーキで田面を均し、代かきの準備が進められていた(Fig.55)。一方、領域Bでは、帯状に地面の亀裂、噴砂が発生しており、水田、道路などの陥没、電柱の傾き、排水路への噴砂の侵入などの被害が観察さ



Fig. 55 液状化水田と代かきの状況（地点番号 1）
View of a soil puddling of a liquefied paddy (No.1)



Fig. 58 侵入した土砂を排出することで応急復旧した排水路（地点番号 3）
Restoration of drainage with discharge of the sands (No.3)



Fig. 56 領域 B で発生した帯状の噴砂（地点番号 2）
Strip zones of liquefied sand (Area B) (No.2)



Fig. 59 調査箇所と液状化推定範囲
Surveyed sites and estimated areas of liquefaction



Fig. 57 水田に発生した帯状の噴砂（地点番号 2）
Strip zones of liquefied sand on a paddy (No.2)

れた。Fig.56 に上空からみた亀裂および噴砂の状況を示す。この地域の液状化の特徴としては、地表面に大きな亀裂が発生し、その亀裂に沿って噴砂が発生し、その領域に地盤の変形も集中することになった (Fig.57)。激しく液状化を起こした帯状の領域を道路、水路などが横断する地点では、水路や道路に段差の発生による損傷が見られた。また、排水路の一部は噴砂で埋没したが、調査時点では砂の排出を終え、応急復旧がなされていた

(Fig.58)。

d 香取市大島（調査番号 7）

大島地区は利根川の右岸に位置する水田、宅地地帯である。2011 年 5 月 1 日に調査を行った。液状化の発生範囲、被災調査地点および千葉県東方沖地震における液状化履歴地点を Fig.59 に示す。土地条件図を Fig.60 に示す。Fig.59 と Fig.60 から液状化発生推定範囲と自然堤防の分布がほぼ一致することがわかる。また、地区内に液状化履歴地点が確認できることから、今回の液状化が再液状化であったこともわかる。大島地区では、道路陥没、電柱の傾きなどが観察されたが被災の範囲は限定的であった。水田の液状化の程度は小さかった。液状化した水田の様子を Fig.61 に示す。この水田では噴砂の発生が部分的であったため、ロータリー耕耘により田面を均平化し、代かきの準備が行われていた。地域内では

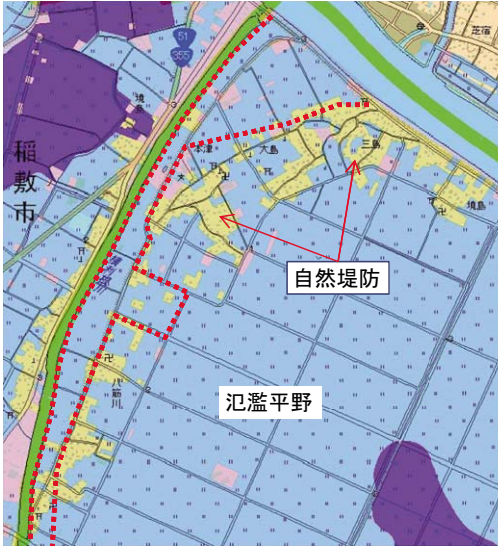


Fig. 60 土地条件図
Land condition map



Fig. 61 液状化した水田 (地点番号 1)
Liquefied paddy (No.1)



Fig. 62 掘り出された柵渠のコンクリート板 (地点番号 2)
Excavated concrete plates used in concrete pile canal (No.2)

排水路（柵渠）の倒れ込み，水路内への噴砂の侵入も発生したが，被災が発生したのは地域のごく一部であった（Fig.62）。地区内では，用水不足から排水路から給水を行っている水田が散見された（Fig.63）。湖東小学校横では幅 50cm 程度の亀裂の発生および校庭での激しい噴



Fig. 63 排水路から水田への給水 (地点番号 3)
Water supply to paddy from drainage (No.3)



Fig. 64 校庭に発生した亀裂と噴砂 (地点番号 4)
Cracks and liquefied sands on the Schoolyard (No.4)



Fig. 65 道路の陥没箇所 (地点番号 5)
Cave-in on the load (No.5)

砂が認められた。この地点は地区内では地盤の変状が大きな地点であった（Fig.64）。千葉県東方沖地震で液状化が発生した地点近傍では道路が約 100m にわたり陥没していた（Fig.65）。この道路陥没地点周辺の水田は作付け可能であるが，地区内では最も液状化の程度が大きかった。

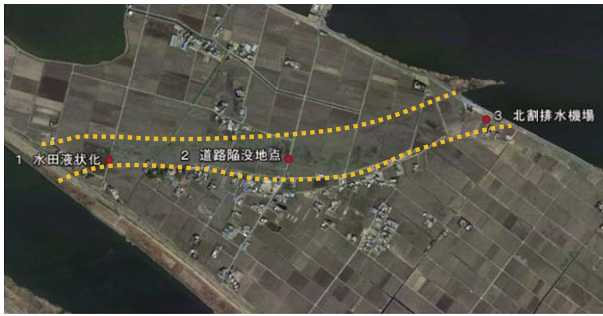


Fig. 66 調査箇所と液状化推定範囲
Surveyed sites and a estimated area of liquefaction



Fig. 69 道路陥没の状況（地点番号 2）
Cave-in on the road (No.2)



Fig. 67 土地条件図
Land condition map



Fig. 70 北割排水機付近の堤防の沈下（地点番号 3）
Settlement of bank around the Kitawari pumping station (No.3)



Fig. 68 液状化した水田（地点番号 1）
Liquefied paddy (No.1)



Fig. 71 柵渠の沈下・傾き（北割排水機付近）（地点番号 3）
Settlements and inclination of the concrete pile canals (around the Kitawari pumping station) (No.3)

e 香取市一之分目新田および北割機場（調査番号 8, 9）

一之分目（いちのわけめ）新田地区は利根川左岸と外浪逆浦に挟まれた水田、宅地地帯である。2011 年 5 月 18 日に調査を行った。液状化推定範囲、調査地点および液状化履歴地点を Fig.66 に示す。また、土地条件図を Fig.67 示す。Fig.67 から液状化が発生した範囲がほぼ旧河道地帯と一致することがわかる。この地域での水田の液状化の程度は小さかったが、Fig.66 に示す地点番号 1～3 の地点など部分的に道路陥没、電柱の傾き、堤防の沈下などが観察された。調査地点 1 における水田の液状化の状況を Fig.68 に示す。水田の液状化の程度は中

であった。また、調査地点 2 における道路陥没および電柱の傾きを Fig.69 に示す。調査番号 3 の北割排水機では外浪逆浦の堤防の沈下、排水路（柵渠）の傾きなどが観察された (Fig.70, Fig.71)。

f 神栖市賀（調査番号 10）

賀（が）地区は外浪逆浦に面する水田地帯である。2011 年 5 月 18 日に調査を行った。液状化推定範囲、調査地点を Fig.72 に示す。Fig.72 に示した範囲内には液状

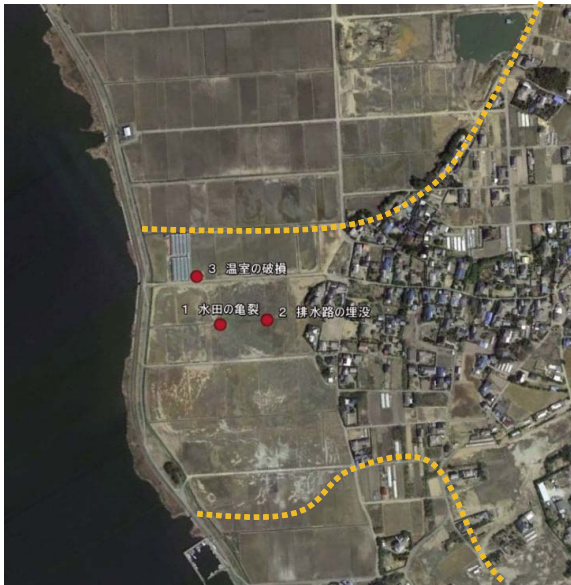


Fig. 72 調査箇所と液状化推定範囲
 Surveyed sites and a estimated area of liquefaction



Fig. 73 土地条件図
 Land condition map

化履歴地点は存在しない。**Fig.73** に土地条件図を示す。土地条件図には **Fig.72** の液状化推定範囲を赤線で重ねて示す。水田が液状化した領域は標高 1 ~ 2m の後背湿地 (青色) に分類される。後背湿地の陸側には標高 5m 程度の砂州性低台地が広がる。Google earth の航空写真からは、この砂州性台地一帯で液状化の発生が確認された。一方、**Fig.73** に示した外浪逆浦に沿った干拓地、液状化発生地域以外の後背湿地では大規模な液状化は確認できなかった。

液状化した水田 (**Fig.72** の調査番号 1) では、長さ 150m、幅が最大 30cm 程度の亀裂、亀裂に沿って噴砂および噴砂口が帯状に分布していた (**Fig.74**)。また、帯状に分布する噴砂帯と畦畔が交差する地点では、約 20cm の段差が観察された。噴砂口の中には直径 5m を越える大規模なものも存在した (**Fig.75**)。水田の多くでは約

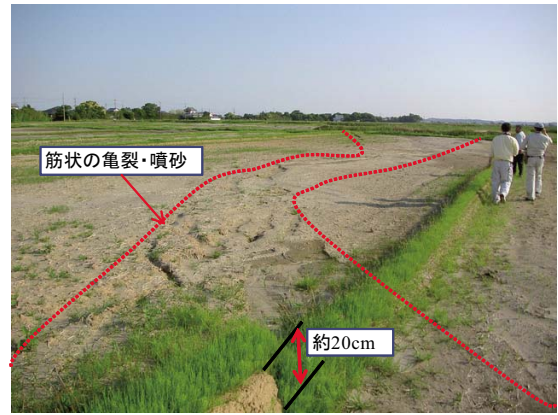


Fig. 74 帯状の亀裂・噴砂の発生状況 (地点番号 1)
 View of strip zone of cracks and liquefied sands (No.1)



Fig. 75 大規模な噴砂孔 (地点番号 1)
 A large hole of sand boils (No.1)



Fig. 76 フルム排水路の傾きと水路内への砂の侵入 (地点番号 2)
 Inclination of flume canals and inflow of liquefied sands (No.2)

20 ~ 30cm の不陸が発生しており、田面のほとんどが砂で覆われた水田も見られた。このような水田での液状化の程度は大と推定された。水路の被害としては、フルム型排水路の傾きと水路内への噴砂の侵入が観察された (**Fig.76**)。液状化水田の傍らには 2 棟の温室が設置されていたが、基礎の不同沈下などにより温室の一部に破損が見られた。液状化水田では、今年度の稲の作付けは見送られた。その原因は、水田の復旧に土木工事が必要であることに加えて、パイプラインが破損したため、用水

の供給ができなかったことによる。

g 河内町余津谷（調査番号 11）

余津谷（よつや）地区は西代・石納・結佐六角地区から西に 5km 程離れた利根川左岸に位置する水田地帯である。この地区では、液状化により石綿管に大きな被害が発生した。ここでは、石綿管の被害状況について報告する。

1) 液状化地区における石綿管の被害

余津谷地区では旧河道地帯に大規模な水田液状化が発生した（Fig.77）。液状化により石綿管路にも大きな被害が発生した。地区では用水確保のために応急復旧工事が実施された。使用されていた石綿管の管径は 100 ～ 400mm，内水圧は最大 0.2MPa 程度である。石綿管は昭和 40 年代に施工されており供用年数は約 40 年である。

復旧工事の際に確認された石綿管の漏水箇所を Fig.78 に示す。Fig.78 には石綿管の配水区域を青線で、液状化が激しかった液状化水田区域（田面高低差 ± 5cm 以上）を桃色線で、土地条件図から推定した液状化推定範囲を橙線で記入した。全長 5.7km の石綿管路では 82 箇所の漏水箇所が発見された。漏水箇所は Fig.78 に示すように液状化水田区域に集中した。液状化水田区域では地盤変状も大きく、石綿管に発生する変形・応力も他の地点に較べ増大することから石綿管の損傷と漏水が集中したと推定される。石綿管 1km 当たりの管の被害件数を被害率と呼ぶ。余津谷地区全体の被害率が 14 件 /km であるのに対し、液状化水田区域の被害率は 52 件 /km と地区全体の被害率の約 3.7 倍となった。このように、液状化が発生した地盤では石綿管の被害率が急増した。一方、平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震における水道用石綿管の被害率は 2.6 件 /km と報告されている（厚生労働省，2007）。液状化水田の石綿管の被害率は兵庫県南部地震の被害率の約 20 倍と極めて大きい。兵庫県南部地



Fig. 77 水田の液状化
Liquefied paddy Occurrence of water leakage

震の石綿管の被害率は良好な地盤での被害件数を含む値であるが、余津谷地区の液状化水田における被害率は液状化が発生した地盤における被害率である。余津谷地区における被害率が非常に大きな値になったのは、液状化が発生した余津谷地区の地盤変位・変形が兵庫県南部地震のそれに較べて格段に大きかったためと推測される。さらに、石綿管の耐震性が低く、管の経年による材料劣化が激しいことも被害を拡大した要因の 1 つと考えられる（厚生労働省，2008）。

2) 石綿管の被害

地区内の地震による石綿管の破損状況を確認するために、4 箇所を試掘と管頂標高の縦断測量が行われた。石綿管の縦断測量結果から、地表面に段差が発生している区間では地中の石綿管にも縦断方向の段差が発生しており、地中の石綿管の変形と地表面の変状には調和的な関係が見られた。地表面に段差が発生している 50m の区間における地中の石綿管の上下移動量の差は約 80cm に達した。このことは、地表面の変状が大きな場所では地



Fig. 78 石綿管パイプラインの漏水確認箇所
Locations of water leakage of asbestos pipes



Fig. 79 枝管への分岐部での漏水
Water leakage at the joint of branch pipe



Fig. 81 石綿管のせん断破壊
Shear failure of an asbestos pipe

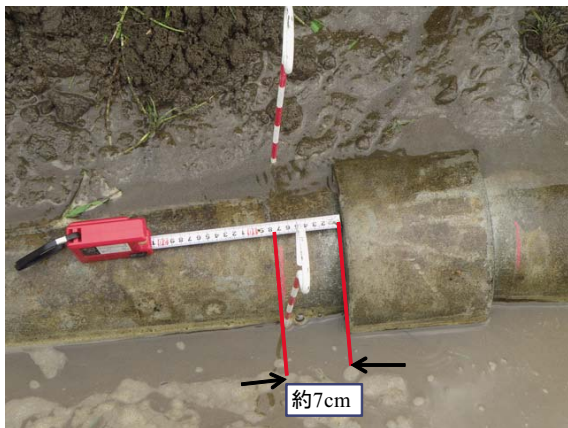


Fig. 80 カラー継手部での管の抜けだし
Joint excessive extracted in a connection ring Shear failure

中の管路の変形も大きい可能性を示す。試掘で観察された石綿管の破損形態を Fig.79 ~ Fig.81 に示す。Fig.79 は管の分岐位置におけるカラーチーズの抜け出しと漏水状況を示す。Fig.80 はパイプ継ぎ手部分におけるカラーの抜け出しによる漏水状況を示す。管の継ぎ手および分岐部分には地震による管の変形が集中するため、破損が発生し易いと考えられる。管の耐震性を向上させるためには、継ぎ手部および分岐部分の強化が必要と考える。Fig.81 はせん断破壊した石綿管を示す。せん断破壊した管周辺の地盤が大きく変形している様子は試掘では確認されなかった。このことは、地盤に発生するわずかな変位によって石綿管が破損する可能性を示唆しており、石綿管の耐震性の低さを表すものと考えられる。

V 考察

1 液状化の発生と微地形の関係

地盤に液状化が発生すると水路の地震リスクは増加する。地震リスクを低下させるためには、液状化発生地点をあらかじめ予測し、水路の減災対策を立てる必要がある。若松 (2011) は過去の液状化発生履歴を分析し、土地の微地形および過去の液状化履歴が液状化の発生と関

係することを明らかにした。Fig.82 に若松 (2011) が作成した微地形および液状化履歴と今回の調査地点の中で大規模な液状化が確認された地点を重ねた図を示す。旧河道、自然堤防に属する微地形および過去の液状化履歴地点と今回の液状化発生地点が良く一致することがわかる。このような微地形の情報に対象範囲が盛土、埋立てなどの人工地盤であるか否かの情報を付け加えることで、液状化発生予測精度を向上させることが可能と考える。しかし、ある範囲における液状化の可能性が示されたとしても、その範囲内を通過する水路のどの区間が最も液状化の被害リスクが大きいのかについて、これらの情報のみで予測することは困難である。今回の調査からも明らかのように、地盤が液状化した場合の水路被害と地盤変状の間には調和的な関係がある。このことは、最も液状化の程度が大きくなる範囲を予測することで、水路の被害が大きくなる区間の予測が可能であることを示す。地盤の液状化の程度を判定する方法については、現在研究が進められているが、地盤を非破壊に広域的に探査できる点では、S波速度を用いた表面波探査から表層地盤構造を求め液状化の程度を予測する手法 (欽田ら, 2011)、常時微動計測結果から地盤の液状化の程度を推定する手法 (中村ら, 2011) などが有望と考えられる。

2 開水路の地震被害の特徴

開水路の地震被害に関する報告では、被害と地盤の関係が指摘されている。液状化が発生した場合の水路被害の報告としては、昭和 58 年日本海中部地震 (秋田県, 1985)、平成 5 年 (1993 年) 北海道南西沖地震 (安中ら, 1995)、平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震 (浅野ら, 2006)、平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震 (林田ら, 2008) がある。液状化以外の要因による水路被害の報告としては、平成 7 年兵庫県南部地震 (兵庫県, 1996)、平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震 (森ら, 2008)、平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震 (常住ら, 2009) がある。

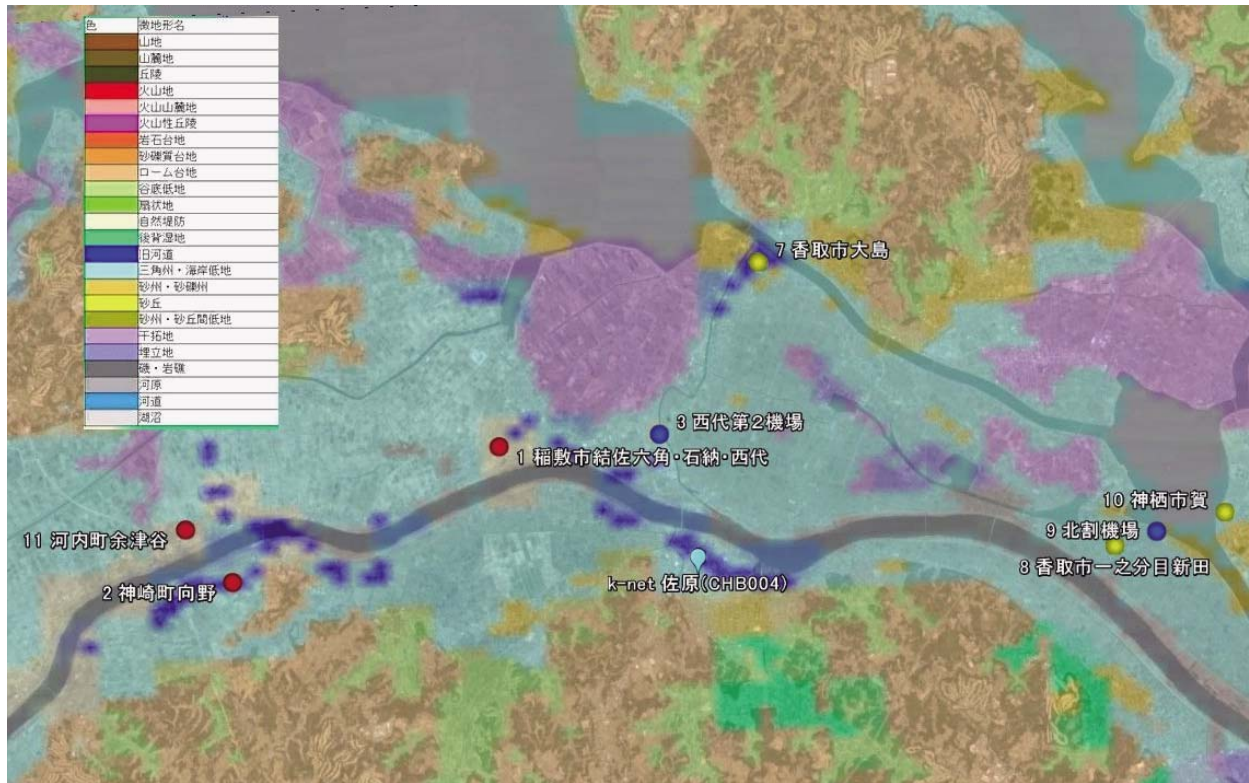


Fig. 82 微地形と液状化による水路損傷の関係

Relationship between the occurrence of canal damage due to liquefaction and the distribution of microtopography

a 地盤の液状化を要因とする水路被害

これらの報告から、液状化が発生した場合の水路被害の特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 日本海中部地震では、震源に近い秋田市、青森県深浦市で震度Vの強震を観測し、日本海に面した能代市周辺、大潟村を中心とする旧八郎潟において開水路の被害が発生した。被害は、軟弱地盤地区に集中し、大潟村干拓地の被害が甚大であった。水路の被災形態としては、コンクリート矢板型水路の倒れ込み、コルゲートフルームの浮き上がりなどが多く発生した。一方、水路本体が破壊した被害は少なく、液状化などの地盤の変状が原因となり水路に沈下、傾き、水路への土砂が発生し、通水断面が確保できなくなる被害が見られた（秋田県、1985）。
- (2) 北海道南西沖地震では、函館市近郊に位置する大野地区幹線水路でブロック積み水路の崩落、L型ブロック水路の倒れ込み、目地部における食い違いが発生した。被災が発生した水路の地盤にはゆるい砂層が存在しており、この砂層が被災原因の一つと推定されている（安中ら、1995）。
- (3) 平成16年（2004年）新潟県中越地震では、液状化が発生した地区の水路被害が甚大であった。液状化発生地区では、水路本体の損傷が軽微であっても、周辺地盤から土砂が水路内に流入するなどして通水性能が低下する事例が多くみられた。一方、液状化により水路部材が破損した被害は少なく、無損傷の部材は再利用された。

液状化の発生が無い地点における水路損傷としては、水路側壁の曲げひび割れ、鋼矢板水路の座屈などが発生したが、このような損傷により通水障害が発生した地点は少なく、応急復旧により通水が可能であった（浅野ら、2004）。

- (4) 能登半島地震では、砂丘地帯、干拓地、埋立地といった地盤が良好でない地点で柵渠の倒れ込み、フルーム水路の目地を開きなどの被災が発生した。水路被害の状況は、部材の破壊は少なく、地盤の変形により構造物としての形状が維持できなくなる（U字溝継目の開き、柵渠のコンクリート板の脱落）損傷が大部分であった（林田ら、2007）。

b 地盤の液状化以外の要因による水路被害

一方、液状化が発生しない場合の水路被害をまとめると次のようになる。

- (1) 兵庫県南部地震では、農業用水路の被害は東播地区と淡路島に集中した。東播地区においては、水路のほとんどが管水路であり、開水路の被害は少なかった。一方、淡路島では、水路近傍の法面崩壊によって多くの開水路が被災した。被災した水路は、山地の法面に隣接するものに多く、平地に設置されたものは被害が少なかった（兵庫県、1996）。
- (2) 新潟県中越沖地震では、柏崎市を中心に関水路の被害が発生した。地盤に液状化が発生していない水路被害の特徴は、現場打ち三面張り水路に発生した目地部の損傷であった。目地部が損傷した水路では通水性能には

大きな低下は見られなかった。この他に、コンクリート柵渠の崩落、コンクリート2次製品の目地のずれも見られた。コンクリート2次製品については躯体自体の破損が少ないため、復旧に際しては既設躯体の再利用が可能であった(森ら, 2008)。

(3) 岩手・宮城内陸地震では、岩手県一ノ関周辺の水路被害調査が行われた。この地震では、地盤災害が多く見られ、水路の被災も水路部材の破損など構造的な被災はほとんどなく、斜面崩壊やトンネルの落盤などの地盤災害に起因するものが大部分を占めた。主な水路被災としては、斜面崩壊による水路トンネル出入口での水路の土砂による埋没、水路トンネル内部の崩落であった(常住ら, 2009)。

c 地震による水路被害の特徴

以上述べた開水路の既往の地震被災事例から、地震による水路被害の特徴をまとめると、次のようになる。

(1) 震度5以上の地震では水路に損傷が発生する可能性がある。

(2) 地震による水路の損傷は地盤条件と密接に関係する。液状化や地盤災害の可能性が高い地盤条件では、通水障害に至るような大きな被害が水路に発生する可能性が高い。一方、良好な地盤では通水障害に至るような大きな被害が発生する可能性は低い。

(3) 水路の周辺地盤に液状化や斜面崩壊などの大きな変状が生じると、水路が構造的に健全であっても、水路躯体に沈下、傾き、周辺地盤との段差、水路内への土砂流入などが発生し、通水機能を喪失するケースが多い。一方、水路側壁の曲げ破壊、継目部の剥落など水路部材の構造的な損傷が単独で発生しても、通水障害の原因となることは少なく、通水機能の損失に至ることは少ない。

このように、地震による水路の損傷要因としては、①地震動の大きさ、②地盤条件、③水路構造の3つを考慮する必要がある。

3 水路などの地震の損傷とその対策の考え方

a 排水路への噴砂の侵入

今回の調査から、底板の無い柵渠、矢板型水路が設置された地盤が液状化し噴砂が発生すると、噴砂が水路内に侵入し、最悪の場合は通水障害が発生することが明らかになった。排水路の一部では田面に噴出した砂が風雨により排水路に侵入したケースも見られたが、大部分の排水路では Fig.83 のように、地盤の液状化により水路底から噴砂が吹き上げるように水路内に侵入し、排水路が埋没したと考えられる。底板の無い水路ではこのような噴砂の侵入を防ぐことは極めて難しい。噴砂の侵入を防ぐ方法としては、たとえば水路底の土質材料をセメント系固化材料などにより固化する対策が考えられるが、水路底を固化することにより、流動化した地盤材料の圧力が固化された水路底全体に作用することも想定され、その場合、水路躯体の浮上・沈下、傾きが発生する可能

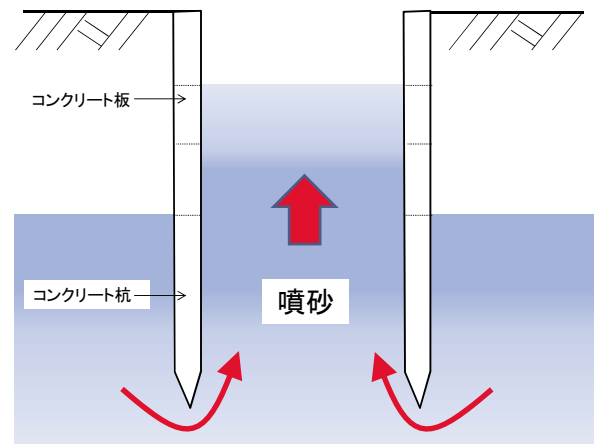


Fig. 83 排水路への噴砂侵入の想定図

Assumption figure of the inflow of liquefied sand into a concrete pile drainage canal

性もある。特に液状化の程度が激しい地点ではその傾向が著しいと推測される。固化を行う場合は、地下水位、液状化発生層の位置及び層厚などを考慮した対応が必要となろう。一方、排水路に侵入した砂は被災後1~2ヶ月で重機により水路外に排出され、排水路は完全とはいえないまでも通水機能を回復した。このことは、柵渠や矢板型水路は、砂の侵入に対する抵抗力は小さいが、早期復旧性には優れる構造と考えられる。柵渠、矢板構造の排水路への噴砂の侵入対策としては、これらの構造が有する早期復旧性を生かし、損傷後の部材の再利用性を高めるとともに重機による砂の排出が行い易い構造を検討する必要がある。また、構造面以外にも、砂の排出を考慮した道路設計など応急対策の体制の確保も重要な課題と言える。部材の再利用を計るためには、コンクリート板を短スパンかつ軽量化し、部材の損傷をできるだけ少なくする、地盤の変形に追従可能な靱性の高い材料を使用するなどの方法が考えられる。

b 液状化による水路の浮上、倒れ込み

今回の地震では、柵渠構造の排水路において水路躯体の浮上、側壁の倒れ込みなどの被害が発生した。水路の浮上、倒れ込みの原因の想定図を Fig.84 に示す。液状化により地盤材料が流動したとすると、水路躯体には自重を除けば Fig.84 に示す2つの力が作用すると考えられる。すなわち、浮力と流動化した地盤材料からの力である。液状化した砂の密度は $1.8 \sim 2.0\text{g/cm}^3$ と考えられ、鉄筋コンクリートの密度 2.5g/cm^3 に比べると小さい。浮力と自重の釣り合いのみを考えれば、底板の無い柵渠は沈下し、箱型構造のフルーム型水路は液状化の範囲、内水位などの荷重条件によって異なるが浮上あるいは沈下する。いずれの場合も作用外力として浮力のみを想定すれば水路は均一に沈下または浮上すると考えられる。ところが、今回の柵渠形式の排水路では、水路の片側の側壁が持ち上げられるような損傷形態が何カ所も観察され

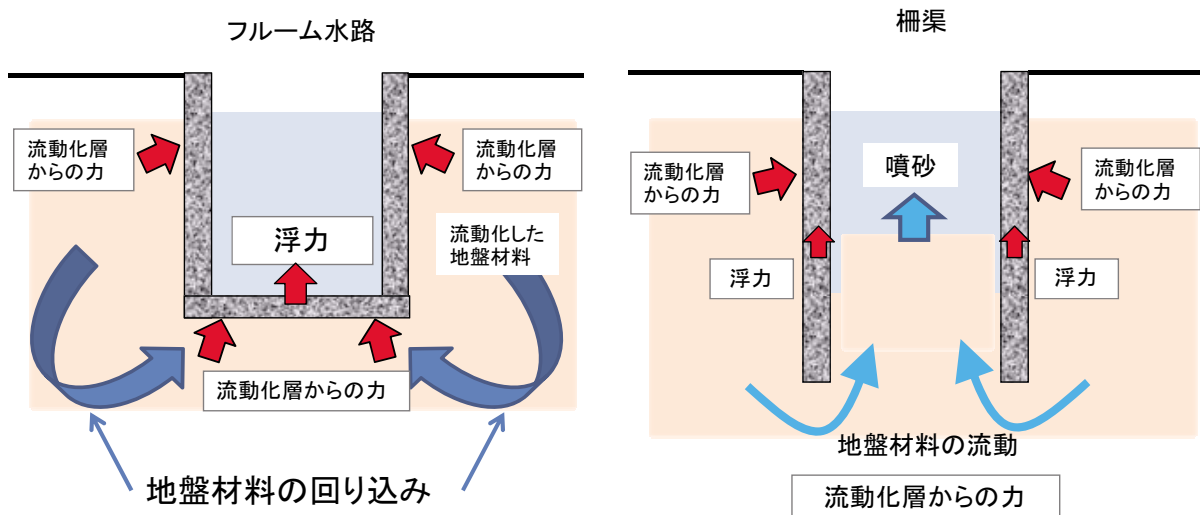


Fig. 84 水路の浮上、倒れ込みの原因の想定図
Assumption figure of the cause of the uplift and inclination of a canal due to liquefaction

た。このような水路の変形は自重と浮力のみでは説明が困難であり、流動化した地盤からの複雑な力の作用が原因と考えられる。川端ら（2005）は、パイプラインの浮上に対して浮力だけでなく地震時の地盤と構造物の動的相互作用が重要な役割を果たしていることを指摘している。川端らは管の見かけの密度と地盤の密度を等しくした条件で地震時の管と地盤の変形を個別要素法により解析し、繰り返しのせん断変形が発生する地盤では地盤と見かけの密度が等しい管でも浮上が起こることを明らかにした。さらに、管の浮上メカニズムとして、①地盤がせん断変形すると地盤から管を押し出すような接触力が管に作用する、②地盤の間隙比が変化すると、地盤内に粗密が発生し、密の部分が管の沈下支える効果を発揮する、③周辺地盤が管の下に潜り込むような動きをすることで管を浮上させる、と報告している。以下、地盤と構造物の動的相互作用を一つの着眼点とし、今回の液状化による水路の浮上および倒れ込みの原因について考察する。

1) フルーム型水路の浮上、倒れ込みについて

フルーム型水路は箱形の構造のため、底板が無い柵渠に比較すると大きな浮力が作用する。このため、柵渠に較べ浮上しやすい構造といえる。地震動により周辺地盤に繰り返しせん断変形が発生すると水路には前に述べた管の挙動と同じく、①地盤の圧縮方向と直角方向に地盤から接触力が作用する、②地震動を受けると地盤の一部が密となり水路の沈下を抑制する、③流動化した地盤材料が水路の下に潜り込むように移動する際に水路に上向きの力を作用させる、などがくり返されることにより、水路が浮上あるいは傾くと想定される。①～③の作用が水路に働くとすれば、水路が斜め上方に移動するような変形も説明することが可能である。また、地盤内の各点の密度、地下水位等はばらつくため各点の液状化の程度も

当然異なる。さらに、地震動の入力方向および大きさも変化する。このような地盤内の液状化の程度のばらつき、地震動の方向が一定でないことなどの原因も加わり、水路がある方向に卓越して変形し、最終的に周辺地盤と相対的に浮上しかつ傾くような変形状態に至ると考えられる。このような水路の挙動は平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震においてもフルーム水路において観察されている。

2) 柵渠形式の水路の浮上、倒れ込みについて

柵渠形式の水路は液状化した地盤に比較すると密度が大きいので、地盤との動的相互作用を考慮しなければ沈下が発生しやすい構造といえる。柵渠は杭でコンクリート板が支持される構造である。この杭構造を考えれば、柵渠の倒れ込みは、①液状化により地盤の支持力が低下し、流動化した地盤材料からの力が杭に抵抗できず杭に沈下、傾きなどの変形が発生する、②杭が変形すると杭からコンクリート板が外れ落下する、③コンクリート板が落下すると杭に作用する力のバランスがくずれさらに杭が変形する、など進行的に進むと考えられる。一方、柵渠の浮上については、液状化により部材に作用する浮力が増加するとともに、周辺地盤材料が柵渠の下を滑り込むように水路内に流れ込む際に上向きの力を受け浮上したと想定される。

3) 今後の液状化対策について

上で述べたような浮上や傾きなどの大きな変形が水路に発生するためには、周辺地盤が激しく流動する必要がある。しかしながら、液状化によりどの程度の大きさの地盤材料の流動が発生し、流動層からどの程度の力が水路に作用するかについては、未解決な課題である。そのため、地盤が流動化した場合の最適な水路の液状化対策については現段階では十分示されていない。もちろん、水路周辺の液状化層を完全に固化するなど液状

化の発生を完全に防止する対策の実施は可能であるが、地震リスクがそれほど大きくない水路区間ではコスト面で現実的ではない。今後は、災害リスクを一定以下に抑さえ、通水機能を確保しつつある程度の地盤の変形を許容するような水路の液状化対策が必要と考える。具体的には地盤の部分的な改良による液状化対策工法および変形を許容する新しい水路構造の開発が重要である。

4 地盤条件からみた地震時の水路の損傷と耐震対策方針

地震に対する水路の被害形態を地盤の良否によって分類し、地震リスクの大きさと耐震対策方針をまとめた図を Fig.85 に示す。地震リスクとは被災による施設の再建設費など直接的損失と用水停止による収量の減少など間接的損失を合計した総合的損失を意味する。液状化または地盤災害の可能性の高い地盤に設置された水路では、地震時に水路に発生する損傷の程度は大きく、水路に通水障害が発生する可能性も高い。一方、良好な地盤の水路では、水路に発生する損傷の程度は小さく、通水障害が発生する可能性は低い。以下、地盤条件ごとの水路の損傷形態と耐震対策方針について述べる。

a 液状化の可能性が高い地区の水路の耐震対策方針

液状化の可能性が高い地盤における水路の地震被害としては、噴砂などによる水路の埋没、水路の浮上・沈下、側壁の倒れ込み、杭支持施設と周辺地盤との段差などが想定される。これらの損傷により、水路には通水障害が発生する可能性が高く、水路の地震リスクは大きい。ただし、地震リスクの大きさは、水路の用途、構造などによって変化する。例えば、柵渠構造の排水路などでは、噴砂により通水障害が発生しても、水路から砂を排出す

ることで通水機能の早期回復が可能である。一方、ポンプ場建屋の傾きによりポンプが運転不能なるなどの被災では早期の応急復旧が難しく、配水地域全体に甚大な影響が発生する。このような水路の地震リスクの大きさを考慮すれば、液状化の発生の可能性が高い地区に設置された水路の耐震戦略および対策方針は次のようにまとめられる。

(1) 地盤の再液状化の可能性が高く、水路の損傷が水路周辺資産に重大な影響を与える可能性が高い区間または配水区域全体の給水に影響を及ぼすと予想される区間では、地震リスクを減少する戦略を選択し、水路の耐震化、強化復旧対策を行う。

(2) 液状化により水路周辺の資産に重大な影響を与える可能性が小さく、給水への影響が部分的に留まると予想される区間では、地震リスクを保持する戦略を選択し、事後の応急対策を基本とした2次災害の防止と早期の用排水機能の回復を優先した対策および体制の確保を行う。

(3) 用水供給の起点となる排水機場など被災の影響が水路システム全体及ぶような区間、施設については水路の耐震化、強化復旧対策を行う。

b 地盤災害の可能性が高い地区の水路の耐震対策方針

地盤災害による水路の損傷形態を地盤災害の規模によって小規模、大規模被災の2つの形態に分類する。小規模な地盤災害とは、水田の法面の崩落など、規模が小さく範囲も限定的な水路の被災を意味する。水田法面の崩壊では、土砂による埋没や流出などの被害が発生するが、土水路やコルゲート管などを応急的に設置することにより、早期の通水が可能なが多い。これは、地盤災害が発生し易い中山間地帯では、農地面積が比較的小

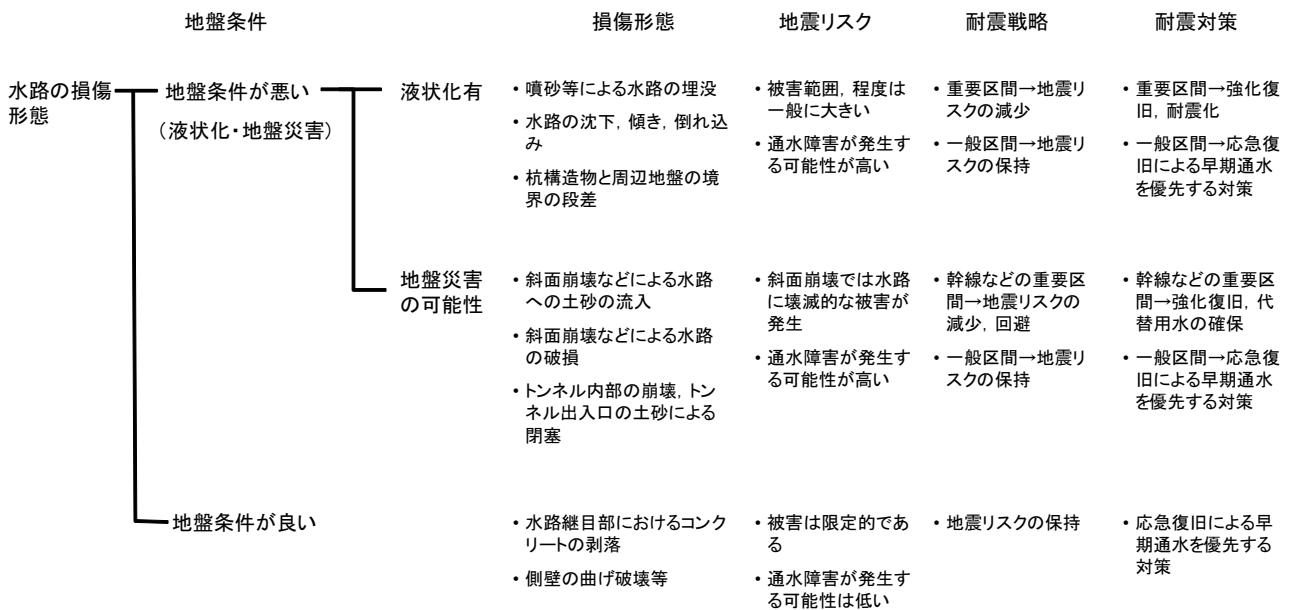


Fig. 85 地盤条件と水路の損傷形態および耐震対策方針

Ground conditions, damages of canals and concepts of the countermeasures of earthquake

さく水路も小規模のものが多いため、その復旧作業が比較的容易なことが 1 つの理由である。さらに、中山間地域では、溪流からの取水が可能である地区も多く、代替水の確保の面からも地震リスクを減少することができる。このように、小規模な地盤災害による水路損傷では、通水障害が発生する可能性は高いものの早期復旧と代替水の確保が可能な場合が多く、その地震リスクは比較的小さいと推測される。耐震対策としては、地震リスクを保持する戦略を選択し、早期の用配水機能の回復を目的とする応急復旧対策を優先的に実行できる体制を構築することが有効と考える。

大規模な地盤災害とは、がけ崩れなどによる斜面崩壊などにより数 10m 以上の区間で水路の崩落、埋没、トンネルの内部崩壊、出入口の閉塞などが発生する被災を意味する。斜面崩壊による水路の流出、トンネルの崩壊などは復旧に時間がかかることから、代替ルートのない重要幹線にこのような被災が発生すると、長期間の通水障害が発生し甚大な損失が発生する可能性が高い。すなわち、大規模な地盤災害が重要路線に発生した場合、その地震リスクは極めて大きい。したがって、このような路線では、地震リスクの減少あるいは回避という戦略を選択し、土木的手段によりリスク減少が可能な区間には耐震化などの対策を、土木的手段によりリスク減少が困難あるいは多額の費用が必要な区間については、地震リスクを回避するための迂回ルート、代替水源などの検討が有効と考える。

c 良好な地盤に設置された水路の耐震対策方針

良好な地盤に設置された水路の損傷形態としては、水路継目部のコンクリートの剥離、継目のずれ、側壁の曲げ破壊など、その被害の範囲は限定的で被害の程度も小さい。これらの損傷により、水路に通水障害が発生する可能性は低く、良好な地盤に設置された水路の地震リスクは一般的には小さい。したがって、良好な地盤に設置された水路では、地震リスクを保持する戦略を選択し、損傷後の事後対策を優先し、2 次災害の防止と早期の用排水機能の回復が可能な対策および体制を確保することが有効である。ただし、水路の破壊が周辺に大きな影響を及ぼす家屋に隣接した水路、幹線道路、鉄道と水路の交差点などについては、発生するリスクの大きさを評価し、必要であれば耐震化などの対策を進めることが必要と考える。

VI 結 言

本稿では、東日本大震災で被災した開水路を中心にその被災状況について報告した。線状施設である開水路、パイプラインでは上流側での損傷が下流側の通水に影響を与える。すなわち、水路では 1 箇所損傷が水路システム全体に影響を及ぼす。特に圧力水が流下するパイプラインでは、この傾向が顕著である。開水路、パイプ

ラインの耐震化を進めるには、この特徴を良く理解した上で対策を行う必要がある。すなわち、水路システム全体で、その区間が損傷した場合、被害が大きくなる（代替水手段が無く、復旧日数なども長くなる）脆弱地点を抽出し、各地点の優先順位付けを行い、重要地点から耐震化、強化復旧対策を実施することが重要である。具体的には、液状化の可能性が高い水路では、応急復旧により通水機能を回復できる可能性が高い区間では、損傷がある程度許容するが早期の通水機能の回復が可能となる対策を、施設の損傷が水路システム全体に大きな影響を与える用排水機場、分水施設などでは強化復旧対策を行うのが望ましいと考える。液状化の可能性が少ない水路では、通水障害が発生する可能性が低いことから、被災後の早期の応急復旧を優先した体制の整備が重要となる。パイプラインについては、1 箇所損傷が水路システム全体に影響を及ぼす影響が大きいことから、重要ルートを選定し、ルート全体を強化復旧する対策が有効と考える。

参考文献

- 1) 秋田県 (1985) : 昭和 58 年日本海中部地震－農地・農業用施設の災害と復旧－
- 2) 浅野勇・向後雄二・林田洋一・井上敬資 (2006) : 平成 16 年 (2004 年) 新潟中越地震による農業用水路の被害, 農村工学研究所技報, 205, 47-59
- 3) 防災科学研究所 (2011) : 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 4) 中央大学國生研究室 (2011) : 2011 年東北地方太平洋沖地震__各地の加速度・速度応答スペクトル (2011.06.17 公開), http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/doshitu/eq_reports/earthquake_reports.html
- 5) 林田洋一・増川晋・有吉充 (2008) : 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による水路等コンクリート構造物の被害調査, 農村工学研究所技報, 208, 43-59
- 6) 東日本大震災復興対策本部 (2011) : 被災者等の状況 (11 月 14 日更新), <http://www.reconstruction.go.jp/topics/2011/09/000046.html>
- 7) 兵庫県南部地震技術検討委員会 (1996) : 平成 7 年兵庫県南部地震農地・農業用施設に係る技術検討報告書, 119-123
- 8) 茨城県 (2011) : 液状化水田の復旧方針, 平成 23 年 8 月
- 9) 川端俊典・大石順司・中瀬仁・毛利栄征・内田一徳 (2005) : 繰返し単純せん断を受ける埋設管の浮上メカニズム, 農業土木学会論文集, 239, 59-66
- 10) 気象庁 (2011) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震について (第 49 報, 平成 23 年 7 月 8 日発表), <http://www.jma.go.jp/jma/press/index.html?t=1&y=23>
- 11) 気象庁気象研究所 (2011) : 断層すべり分布の推定－近地強震波形を用いた震源過程解析, <http://www.mri->

- jma.go.jp/Dep/sv/2011tohokutaiheiyo/
- 12) 国土交通省国土地理院 (2011) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動について (平成 23 年 3 月 19 日発表), http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tohoku2.html,
 - 13) 国土交通省 (2011) : 国土地盤情報検索サイト, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>
 - 14) 近藤始彦 (2011) : 農研機構平成 23 年度フィジビリティ・スタディ研究会資料, 2011 年 5 月 23 日
 - 15) 古藤田喜久雄・若松加寿江 (1988) : 千葉県東方沖地震による液状化現象とその被害, 土と基礎, 36-12, 19-24
 - 16) 厚生労働省 (2007) : 平成 18 年度管路の耐震化に関する検討会報告書, 平成 19 年 3 月
 - 17) 厚生労働省 (2008) : 水道の耐震化計画等策定指針, 平成 20 年 3 月
 - 18) 鍛田泰子・池尻大介・三浦みなみ・上仲亮・金乗洙・澁谷啓 (2011) : 東北地方太平洋沖地震第 2 次調査団 (茨城県), http://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1053&Itemid=29
 - 19) 森 丈久・森 充広・渡嘉敷勝・中矢哲郎・増川 晋・田頭秀和 (2008) : 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震による農業用水路被害と災害調査, 農村工学研究所技報, 208, 89-101
 - 20) 中村豊・齋田淳・佐藤勉 (2011) : 2011 年東北地方太平洋沖地震による東京湾岸地域などでの液状化被害と 1990 年前後に計測した常時微動測定結果の比較, http://www.sdr.co.jp/110311tohoku-eq/n_report/20110311_n-report_liquefaction.html
 - 21) 農林水産省 (2011a) : 東日本大震災について～東北地方太平洋沖地震の被害と対応～ (11 月 11 日発表), <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/index.html>
 - 22) 農林水産省 (2011b) : 津波により流失や冠水等の被害を受けた農地の推定面積 (平成 23 年 3 月 29 日発表), <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/index.html>
 - 23) 境 (2011) : 発生した地震動の性質 - 2011 年東北地方太平洋沖地震, <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113g.htm>
 - 24) 産業技術総合研究所 (2011) : 地震動マップ即時推定システム, <http://qq.ghz.geogrid.org/QuakeMap/>
 - 25) 東京大学地震研究所 (2011) : 2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震 (地震動分布から直接見る震源断層の破壊過程), 平成 23 年 3 月 28 日
 - 26) 東京大学古関研究室 (2011) : 東北地方太平洋沖地震 (2011 年 3 月 11 日) 調査報告 千葉県周辺での地盤災害 2011_8.1 (第 1 報), <http://soil.iis.u-tokyo.ac.jp/Investigations-j.htm#Tohoku2011>
 - 27) 常住直人・森丈久・田中良和・高木強治 (2009) : 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による水路等コンクリート構造物の被害調査, 農村工学研究所技報, 第 209 号, 139-152
 - 28) 若松加寿江 (2011) : 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版
 - 29) 山田雅一 (2011) : 首都圏における液状化被害状況, 日本大学理工学部理工学研究所講演会第 6 回講演会「東日本大震災復興支援研究プロジェクト」キックオフシンポジウム資料
 - 30) 安中正実・谷茂・毛利栄征 (1996) : 平成 5 年 (1993 年) 北海道南西沖地震による農地・農業用施設の被害調査報告, 農業工学研究所報告, 35, 111-142

Damage to Irrigation and Drainage Canals Along the Tone River downstream by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

ASANO Isamu, TOKASHIKI Masaru, MORI Mitsuhiro and NISHIHARA Masahiko

Summary

A lot of irrigation and drainage facilities along the Tone River downstream were damaged by the 2011 Tohoku earthquake. The National Institute for Rural Engineering (NIRE) surveyed the damage of the facilities from April to June after the earthquake occurrence for the purpose of grasping the general image of the damage and analyzing the cause of the failure. From the damage survey on the facilities due to liquefaction in Toride city, Kawachi town, Tone town, Inashiki city, Kamisu city in Ibaraki prefecture, Sakae town, Kozaki town, Katori city, in Chiba prefecture, the followings were summarized.

- 1) The heavy damage on the facilities caused by liquefaction was confirmed in Inashiki city in Ibaraki prefecture, Kozaki town in Chiba prefecture.
- 2) The type of observed damage to farmland and the agricultural facilities are classified into following categories. (1) Sand boiling, ground cracking in rice paddy by liquefaction, (2) Inflow of liquefied sands into drainage canals, (3) Uplift, inclination and fracture of drainage canals, (4) Relative gaps between the facility and ground with a pile foundation, (5) Water leakage of asbestos pipes.
- 3) Although water flow was failed due to inflow of liquefied sands into the drainage canals, it was observed that water flow was restored between one to two months after the earthquake.
- 4) The heavy damage of asbestos pipes was observed in Yotsuya site in Inashiki city. Damage rate of pipes in the extreme liquefaction-hazard area was 3.7 times in all the water distribution area. The rapid increase in damage rate of pipes by liquefaction was suggested in the low earthquake resistance of asbestos pipes.
- 5) To improve the earthquake resistance of irrigation and drainage facilities, it is important to ensure the comprehensive approach to the earthquake-resistant taking into account the seismic risk and the importance of the facility.

In this survey, it is found to cause serious damage to the facilities by liquefaction. The observed sites will be surveyed in detail and the countermeasure of earthquake resistant of each facilities will be discussed in future.

Keywords : the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, earthquake damage, liquefaction, irrigation and drainage canals, field survey

