



鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷

鋤田, 泰子
池尻, 大介

(Citation)

日本地震工学会論文集, 12(4):249-262

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003286>





鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷

鍬田泰子¹⁾、池尻大介²⁾

1) 正会員 神戸大学大学院工学研究科、准教授 博（工学）

e-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

2) 非会員 神戸大学大学院工学研究科、大学院生

e-mail: 115t102t@stu.kobe-u.ac.jp

要 約

東北地方太平洋沖地震は北関東の東京湾岸や利根川流域に広域な液状化を引き起こした。地表近傍に埋設されている小口径の配水管路は液状化による地盤変状で継手の抜けや漏水の被害が発生するため、管路の被害量は地盤変状を表す指標となる。利根川河口にある鹿島地域の管路被害分析の結果、管路被害が広域かつ均質に分布するのではなく、1km²相当の範囲に液状化による管路被害が集中する地域が形成されていた。本論文は、この液状化による管路被害集中地域の要因を地形履歴から分析したものである。分析の結果、現在の地形図だけでは管路被害集中地域となる箇所を特定するのは難しいが、旧版地図の併用が管路被害集中地域の特定に有効であることを示した。

キーワード： 東北地方太平洋沖地震、液状化、利根川流域、管路被害、地形変遷

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震ならびにその余震は、東北から関東の一帯で長い継続時間を伴う揺れを引き起こし、広域で液状化が発生した。安田・原田¹⁾によると東京湾岸の液状化面積は42km²に上ることが示されている。液状化面積だけでなく、液状化による路面や宅地の沈下・傾斜の程度も、過去に国内で発生した地震で経験した液状化のレベルをはるかに超えるものであった。また、過去の地震で液状化した場所で再び液状化が発生している箇所が70以上に上ることも確認されている²⁾。しかし、本地震における液状化の範囲やその程度については強震域が広域であるために十分明らかになっていない。

本研究は、利根川下流域にある茨城県神栖市、鹿嶋市、潮来市と千葉県香取市（上記の地域を、本研究では鹿島地域と呼ぶ）を対象にして、水道管路の被害分布から液状化による管路被害集中地域の空間的な広がりを明らかにし、その管路被害集中地域の要因を地形との関係から明らかにすることを試みた。

2. 研究の目的

液状化による沈下や側方流動は地中構造物や宅地に被害をもたらす。とくに液状化による地盤変状は、地震動による地盤ひずみよりも地中構造物に与える影響が遙かに大きいため、地中の線状構造物の地震対策においては適切に液状化の可能性のある場所を特定し、その地盤ひずみを評価することが重要とな

る。兵庫県南部地震以降、広域かつ高密度に敷設されている水道やガスなどの地中管路類の液状化に対する耐震設計が改訂された^{3), 4)}。水道施設耐震工法指針³⁾では、ボーリング資料から液状化判定指標を用いて液状化の可能性を判定し、液状化がある場合には兵庫県南部地震や新潟地震の実測値に基づき設計用の地盤変位・ひずみが規定されている。例えば、護岸の法線方向の地盤引張りひずみは1.2～2.0%、埋立地および河川流域の内陸部の引張りひずみは1.0～1.5%の範囲を基準に外力が設定されている。基幹施設や重要幹線の地震対策にはその箇所ごとに詳細な液状化評価の検討とその対策が必要であるが、広域かつ高密度に埋設されている管路網では、点の地盤情報よりも、その地域の地形図などの空間的な地盤情報から液状化が発生しやすい地域を絞り込み、該当地域には液状化の地盤ひずみに耐える耐震管の採用や液状化による供給停止地域を局所的に抑えるための管路網のブロック化などの対策を実施する方が有効である。また、水道施設耐震工法指針には液状化の発生しやすい旧河道や埋立地、軟弱地盤が例示されているが、先の東北地方太平洋沖地震のように揺れの地域が広域で様々な地形を有している中で、液状化地域の空間的な広がりとその微地形情報の有効性を確認することは重要である。

本研究は、液状化による管路被害と地形との関係を明らかにするにあたり、上述したように利根川下流域にある鹿島地域を対象にする。対象地域の選定理由は、本地震直後の著者らの鹿島地域の現地調査⁵⁾を通して、液状化の範囲が広く、液状化による管路や共同溝などの地中構造物への被害や、傾斜・不同沈下などの住宅への被害が甚大であったことが挙げられる。潮来市や香取市では、路面に不陸が生じ、通常の災害復旧では早期復旧が難しいことから、地上に仮設配管を設置して応急的に給水再開をしている。さらに、液状化の特徴として、広域とはいえ、液状化の範囲が1km四方の規模で局所的に限定して発生していたことが挙げられる。なお、鹿島地域の太平洋沿岸には津波が浸水したが、その範囲は対象とする市域の一部であり、管路被害の多くは地震の揺れと液状化による被害と限定されている。

液状化した地盤の地表は変状し、埋設されている水道管路に継手の抜けや管体亀裂、漏水などの被害が発生するため、管路被害率（管路延長あたりの被害件数、件/km）が高くなる。そこで、本研究では地区ごとの管路被害率の分布特性から、配水管路が密に布設され管路被害率が高い地域を管路被害集中地域と設定し、現地踏査との結果から液状化による被害であることの確認を行う。さらに、新旧の地形図との関係から液状化によって管路被害が集中した要因を考察する。

3. 鹿島地域の管路被害の特徴

本研究に先立ち、鹿島地域の水道管路網と被害点のデータベースを構築した。データベースの作成については、まず、2県4市の水道事業者から提供された各市の管路図（管種、口径情報を含む）と被害点の紙地図をスキャナでデジタル化した。次に、GIS上でそれをラスターデータとして重ねた上で、国土地理院の数値地図^{6), 7)}の道路データの加工により管路網のデータベースを作成した。図1は、分析対象地区の管路図と地震による管路被害点を示している。市町村合併前の鹿嶋市の旧大野村、潮来市の旧牛堀町、香取市の旧小見川町では、旧町村の簡易水道が継続して運用されており、市の中心部の上水道とは独立している。また、それらの被害は上水道の被害と比べて軽微であった。香取市の旧佐原町の南側では上水道供給地域から外れている。そのため、上述の旧簡易水道地域については、データベースの対象から外した。

対象地域の管種別の管路延長構成比を図2に、管路被害状況を表1に示す。対象地域の管路には配水管の他、一部送水管を含むこと、また入手した管路図の作成時期により、管路延長や管路属性構成比は水道統計⁸⁾と若干違いがあることを確認しているが、本研究では紙地図をベースにした管路情報を採用する。また、被害件数は、2011年10月の調査時点の紙地図の被害点から得られた件数としている。対象地域の中には液状化が甚大であり、地上の仮設配管によって供給している地区も含まれる。これらの地区では被害件数が明らかになっておらず、被害延長として別途算出している。

各市の配水管の管種別構成比では、鹿嶋市や神栖市にはダクタイル鋳鉄管（DIP）が6、7割程度と多い。一方、潮来市や香取市は塩化ビニル管（VP）が6割程度となる。口径については、いずれの市でも口径75～150mmの管路が大部分で、市全体の66～85%を占めている。また、鹿島地域の特徴として、管路布設時期に脆弱な石綿管（ACP）が広く利用された経緯があり、水道の布設時期が古い地域では石綿管が残り、全体の2割弱程度も残留している市がある。神栖市や潮来市では、更新時期に合わせて石綿管

から耐震管路へ更新事業が進められていた。

分析対象の4市の中では、鹿嶋市の管路被害率が0.64件/kmと最も高かった。鹿嶋市の管路被害率は2007年新潟県中越沖地震における柏崎市の水道管路被害率とほぼ同じ程度である⁹⁾。他の市でも、管路被害率0.2～0.3件/kmであり、本地震における宮城県北西部の強震地域にある市町村の管路被害率とほぼ同程度である¹⁰⁾。

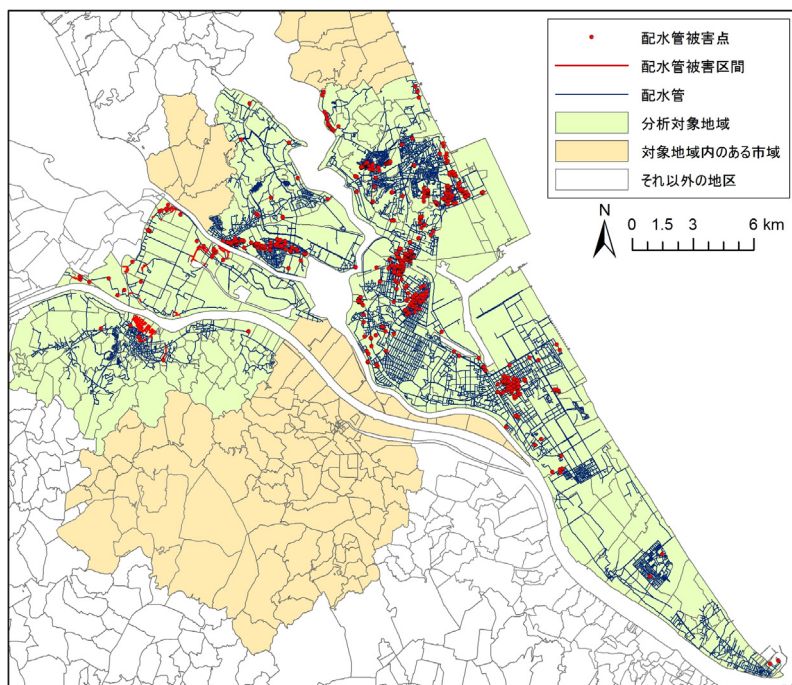
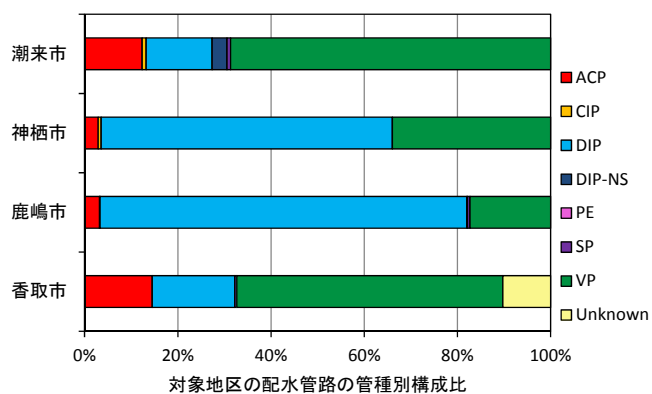


図1 分析対象地域とその地域内の管路と被害点



対象地区の配水管路の管種別構成比
(ACP：石綿管、CIP：铸铁管、DIP：ダクタイル铸铁管、DIP-NS：耐震継手のあるダクタイル铸铁管、PE：ポリエチレン管、SP：鋼管、VP：塩化ビニル管、Unknown：管種不明)

図2 分析対象地域の管種別管路延長構成比

表1 分析対象地域の管路被害状況

	管路延長 (km)	被害数 (件)	被害率 (件/km) (%(km/km))
潮来市	247	80	0.32
()内は仮設配管区間		(15.1km)	(6.1%)
神栖市	718	211	0.29
鹿嶋市	343	221	0.64
香取市	246	35	0.14
()内は仮設配管区間		(17.9km)	(7.3%)

*潮来市は未復旧による仮設配管地区を日の出4～6とした。香取市については、市のまとめた被害区間とした

図1の管路被害点からは、被害が市域全体的に均一に分散しているよりも、局所的に集中している地区が数カ所ある。定量的に管路被害集中地域を区分するため、町丁目別に管路被害率と面積あたりの管路密度の関係を示す図3を用いた。町丁目の単位は、総務省提供による行政区画（小地域）のポリゴン¹¹⁾を一単位とした。さらに、管路被害率0.3件/kmと管路密度10km/km²を目安に町丁目を4分類した。過去の地震における管路被害率では、兵庫県南部地震の神戸市で0.44件/km¹²⁾、新潟県中越地震の長岡市で0.30件/km、小千谷市で0.31件/km¹³⁾、能登半島沖地震の輪島市で0.32件/km¹⁴⁾であることから、0.3件/kmは地

震動や液状化による管路被害を合わせた市ごとの平均管路被害率といえる。また、管路密度 $10\text{km}/\text{km}^2$ は小林ら¹⁵⁾による新潟県柏崎市の人口集中地域（DID）の管路密度分布を参考にして設定した。本研究では、面的に被害率が高い町丁目を抽出するために、管路が僅かしか埋設されていないことや、広大な面積における局所的な被害に起因して被害率が高く評価されている町丁目を排除した。図4はこの地区分類によって町丁目を色分けしたものである。分類4と、町丁目の管路延長において被害や未復旧の延長が8割以上になる分類5の町丁目が複数隣接していることが分かる。そこで、隣接する複数の町丁目を合わせて表2に示すZone AからZone Gまでの7つのZoneを抽出した。このZoneに含まれる町丁目は図3の分類4に含まれている。Zone以外で分類4に属している町丁目は周辺町丁目と比べて当該町丁目のみ高い被害率になっている、または、町丁目内で管路密度が高い場所と管路被害点が多い場所とが一致しないものである。この管路被害集中地域の町丁目をまとめたものを表2に示す。

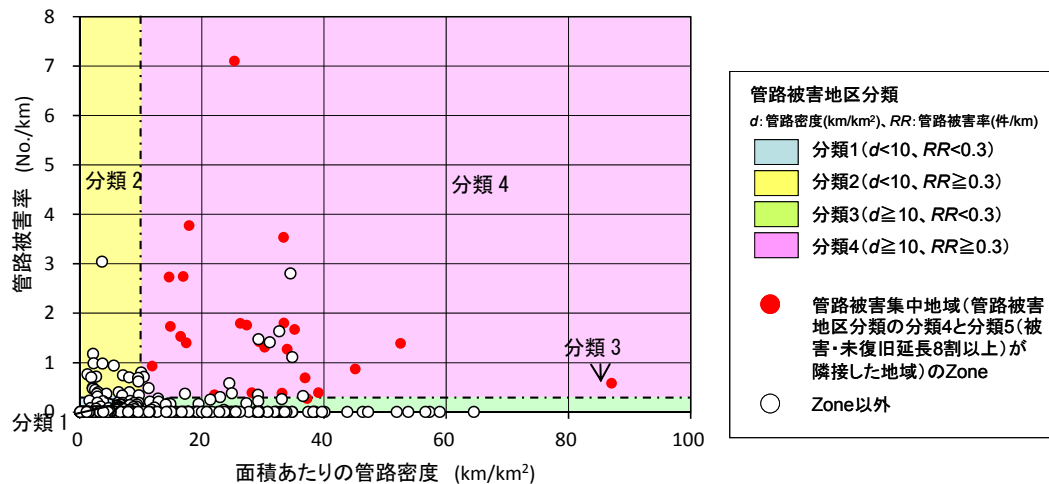


図3 対象地区の町丁目の管路被害率と管路密度の関係

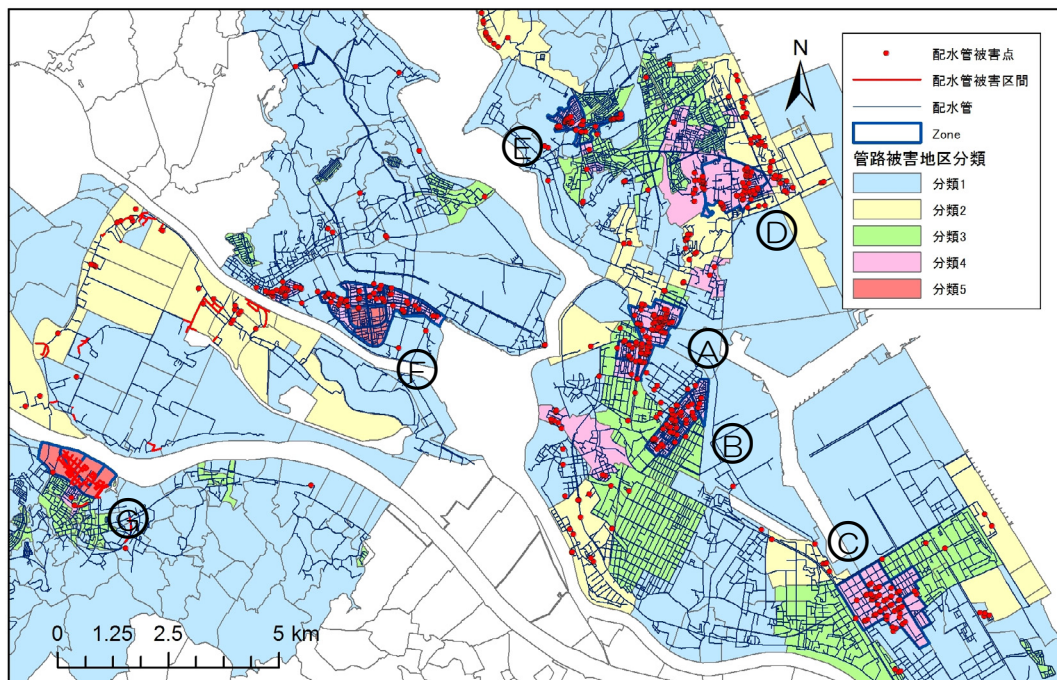


図4 管路被害地区分類と管路被害集中地域のZone

(注： 管路被害地区分類 分類1：管路密度 $<10\text{km}/\text{km}^2$ 、管路被害率 $<0.3\text{件}/\text{km}$ 、分類2：管路密度 $<10\text{km}/\text{km}^2$ 、管路被害率 $\geq 0.3\text{件}/\text{km}$ 、分類3：管路密度 $\geq 10\text{km}/\text{km}^2$ 、管路被害率 $<0.3\text{件}/\text{km}$ 、分類4：管路密度 $\geq 10\text{km}/\text{km}^2$ 、管路被害率 $\geq 0.3\text{件}/\text{km}$ 、分類5：被害または未復旧管路区間/管路延長 >0.8)

管路被害集中地域は、著者らの現地踏査からいずれも液状化の噴砂が確認されたことが報告されている⁵⁾。つまり、管路被害集中地域の被害は液状化に起因するものであり、ある範囲をもった液状化が管路被害の集中を引き起こしたといえる。本研究ではこの地域を「液状化による管路被害集中地域」と設定し、以降の分析を行う。表2は液状化による管路被害集中地域のZoneごとの面積と管路延長を示している。この面積は、図3の区分線の値や対象地域の行政区分によって左右され必ずしも一意的に決まらないが、本研究で設定したZoneの面積は1～2km²に限られていた。ただし、分類2の地域でも局所的な液状化による噴砂があったことに留意されたい。

表2 液状化による管路被害集中地域のZoneの一覧

Zone	地区名	対象町丁目	面積 (km ²)	管路延長 (km)
A	掘割	神栖市掘割2、3丁目、居切；鹿嶋市長栖	1.18	22.7
B	深芝	神栖市深芝、深芝南1、2、3丁目、平泉	0.98	28.7
C	知手	神栖市知手団地、知手中央6、7、8、9、10丁目	2.23	30.4
D	平井	鹿嶋市大字平井	1.28	19.1
E	緑ヶ丘	鹿嶋市宮中、宮下1、2、3丁目	0.58	15.2
F	日の出	潮来市日の出1、2、3、7、8丁目	1.94	33.5
G	佐原	香取市佐原イ、ロ、ホ	1.13	10.4

4. 液状化による管路被害集中地域の地形変遷

液状化による管路被害集中地域の地形特性を調査するため、国土地理院の縮尺25,000分の1の土地条件図¹⁶⁾、¹⁷⁾と1880年代に作成された明治前期測量2万分の1迅速測図¹⁸⁾を合わせて比較する。土地条件図は、土地の微細な高低と表層地質によって区分した地形分類や低地について1mごとの地盤高線、防災施設などの分布を示した地図である¹⁹⁾。使用した土地条件図は1978年、1979年に刊行されたものであるが、それ以降更新されていない。対象地域では、1928年に鰐川干拓事業が完了し、1969年に鹿島港が開港し、1973年に鹿島臨海工業団地造成事業の工事が完了している²⁰⁾。潮来市の内浪逆浦干拓事業も1950年に完了し、1979年に土地区画整理事業が完了している²¹⁾。鰐川干拓、潮来干拓などの大規模な造成事業が完了し、それ以降に大規模な造成等による改変がない。そのため、以降では迅速測図と新旧の地形・土地利用の変化を比較するために、便宜上、地形分類された土地条件図を「現地形図」と呼ぶ。対象地区は利根川下流域にあるため、過去100年間とはいえ河川の堆積作用や人工改変による地形変遷が著しい。

液状化による管路被害集中地域にある管路の属性（管種・口径）による被害の受けやすさにもばらつきがある。図5に示す管路属性別の管路延長比では、Zone AからZone Eまではダクトイル鋳鉄管（DIP）

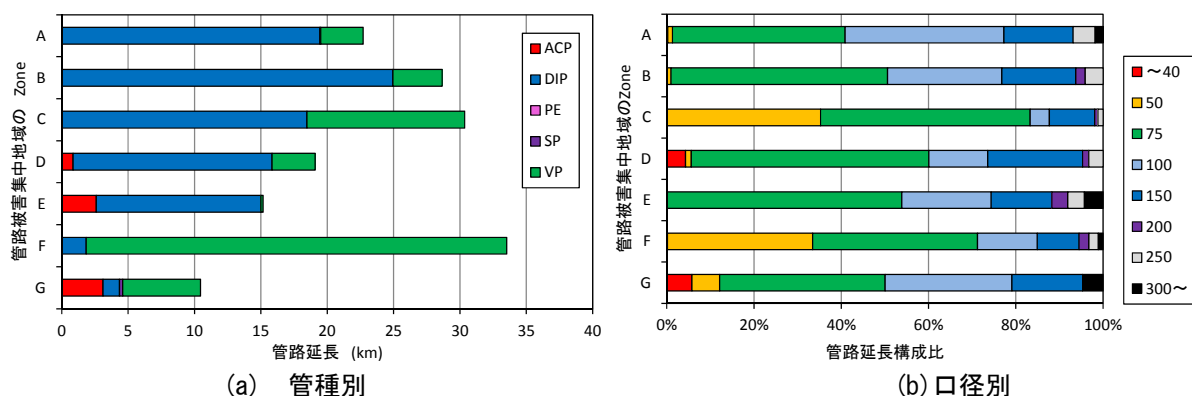


図5 液状化による管路被害集中地域のZone別の管種・口径構成

が管路の大部分を占めるのに対し、Zone Fでは塩化ビニル管（VP）が多く、Zone Gでは石綿管（ACP）と塩化ビニル管（VP）が多い。管路の被害予測手法²²⁾では補正係数で管種の脆弱性を評価しており、塩化ビニル管（VP）の脆弱性に対して、一般継手のダクタイル鋳鉄管（DIP）のそれは0.3倍で、VPが脆弱であるとされている。さらに、ACPはVPに対して2.5倍被害が受けやすいとされている。それを参考にとすると、Zone GやZone Fは他のZoneと比べて管路が脆弱である。また、小口径であるほど被害が受けやすいとされているが、口径φ100mm以下の管路の比率はいずれのZoneでも7割程度であり、Zoon間で口径の特徴に大きな差異はない。

4.1 Zone A 掘割

Zone Aである神栖市掘割、鹿嶋市長栖の管路被害の分布に現地形図、迅速測図を重ねたものを図6に示す。掘割では液状化によって宅地が路面よりも沈下し、2011年10月の調査時でも200世帯には仮設配管で水供給されていた。また、長栖の東部では地震後、鹿島港から来襲した津波によって一部浸水した⁵⁾。

現地形図ではZone A一帯は盛土地であるが、掘割2丁目の南側は同じ盛土地であるにも関わらず被害がほとんど発生していない。一方、迅速測図では、北浦から利根川に合流する鰐川が掘割・居切の内陸まで浸食しており、管路被害点が集中している地域は約100年前には河川であったことがわかる。長栖の北東部で過去に水田利用されていた箇所でも管路被害が集中している。また、その南西部は草が生える沼地であった。過去に河川や地下水位が高い水田、沼地であった場所は現在を埋め立てられている。また、前述したようにZone Aより西側の鰐川は、1928年に干拓事業が完了して現在は干拓地となっている²⁰⁾。現在は干拓地で、迅速測図で鰐川であった地点のボーリング資料によるとTP+2.5mの地表からGL-1mに2mの厚さで細砂（N=5）、その下位にシルト混じりの細砂（N=5～10）が3m、その下位には25mの厚さで細砂（N=40）が堆積している。このため、液状化は表層の5、6mの地盤が液状化したと考えられる。

迅速測図で水圏環境が明らかになり、旧河川地域で被害が発生していることがわかったが、迅速測図で水田かつ現地形図で盛土地になっている長栖の北東でも液状化が発生しており、この二つの地形図からでは明らかにならなかった。しかし、江戸時代のはじめに記された長栖の小字図²³⁾には長栖と居切の間の掘割川から分岐して北東方向に延びる堀が形成されており、この堀を埋め立てた場所で管路被害が発生している。そのため、迅速測図の陸地での管路被害は、部分的な堀の埋め立てが一つの要因と考えられる。

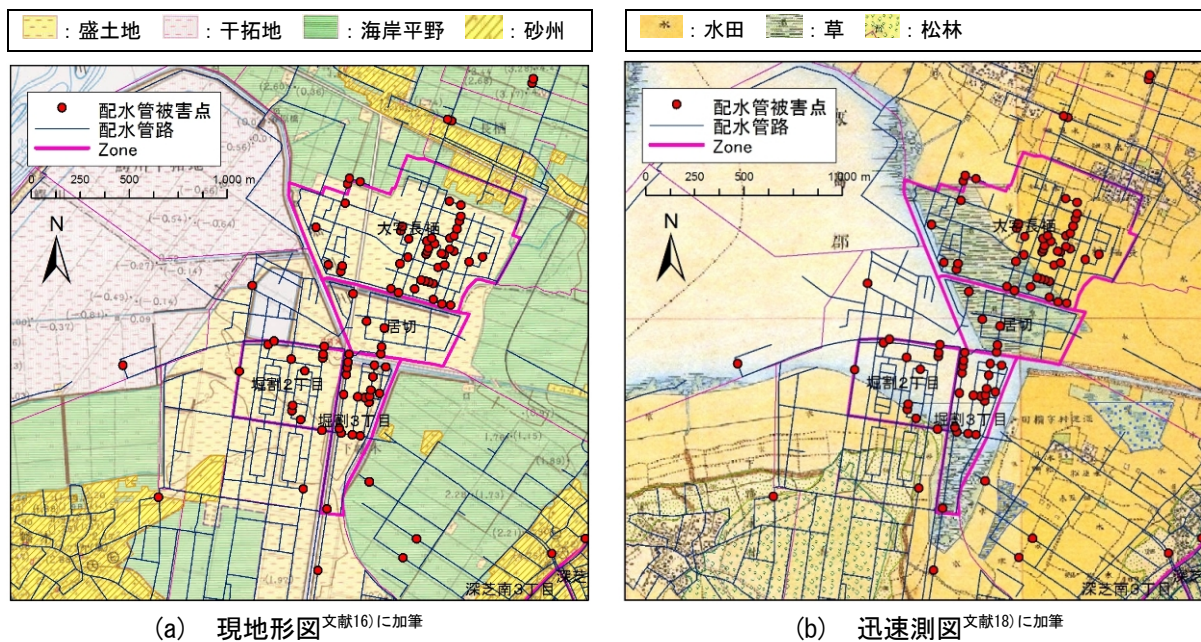


図6 Zone A（掘割地域）の管路被害と地形図との関係

4.2 Zone B 深芝

図7はZone Bである神栖市深芝の管路被害の分布に現地地形図、迅速測図を重ねたものである。Zone Bの一角は鹿島工業団地の造成に合わせて宅地開発された地域である。地区内の小学校校庭では、地震によって一帯に液状化の噴砂がみられた⁵⁾。また、宅地の傾斜も多数確認できた。

現地地形図では、Zone Bは砂州・砂堆の地盤であり、一般的にはよく締まった地盤であると認識される。また、迅速測図でも一角が松林で周辺と比べて大きな違いはなく、両地形図から管路被害集中地域になる要因を見つけるのは難しい。しかし、Tsukamoto et al.²⁴⁾による調査では、Zone B周辺は昭和40～60年代に砂利の採取場があった場所であり、周辺のボーリング資料では、表層近くにN値が5以下の砂層が6～7m程度堆積していることが示されている。そのため、自然地盤ではなく砂利採取後の埋め戻し土が液状化したものと考えられる。現地地形図、迅速測図から液状化の要因となるものを見つけることができなかったのは、砂利採掘等による人工的な改変が現地地形図に反映されていないことも挙げられる。

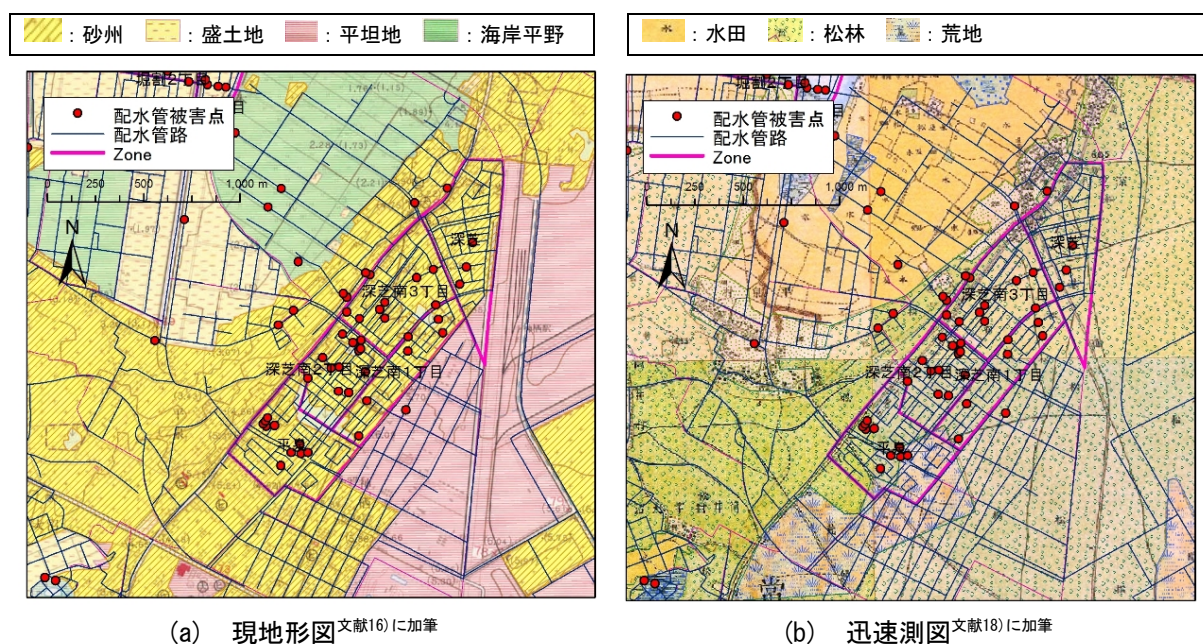


図7 Zone B（深芝地域）の管路被害と地形図との関係

4.3 Zone C 知手

図8はZone Cである神栖市知手の管路被害の分布に現地地形図、迅速測図を重ねたものである。Zone Cの周辺一帯では住宅と田畑が多い。宅地の被害や路面の不陸が確認できた。畑の土は、自然堆積土と思われる粒度が均質な砂であった。知手6丁目、7丁目は小高い砂丘となっており、その背後地盤で液状化が集中している。管路被害が集中している箇所は、現地地形図では砂洲と平坦地、迅速測図では松林である。過去の航空写真²⁵⁾では、1960年代から徐々に住宅が増えているが、急速な宅地造成があった地域ではない。しかし、神栖市域に広がる砂礫層は息栖層と名づけられており、息栖砂は良質の土木建築材料として利用されている²⁰⁾。神栖市水道課によると神栖市域では、Zone Bと同様の砂利の採取場が多数あったと言われており、Zone Cでも砂利採取後の埋め戻し土が液状化した可能性が高いと考えられるが、Zone Cについては、今後も地盤の改変履歴を調査する必要がある。

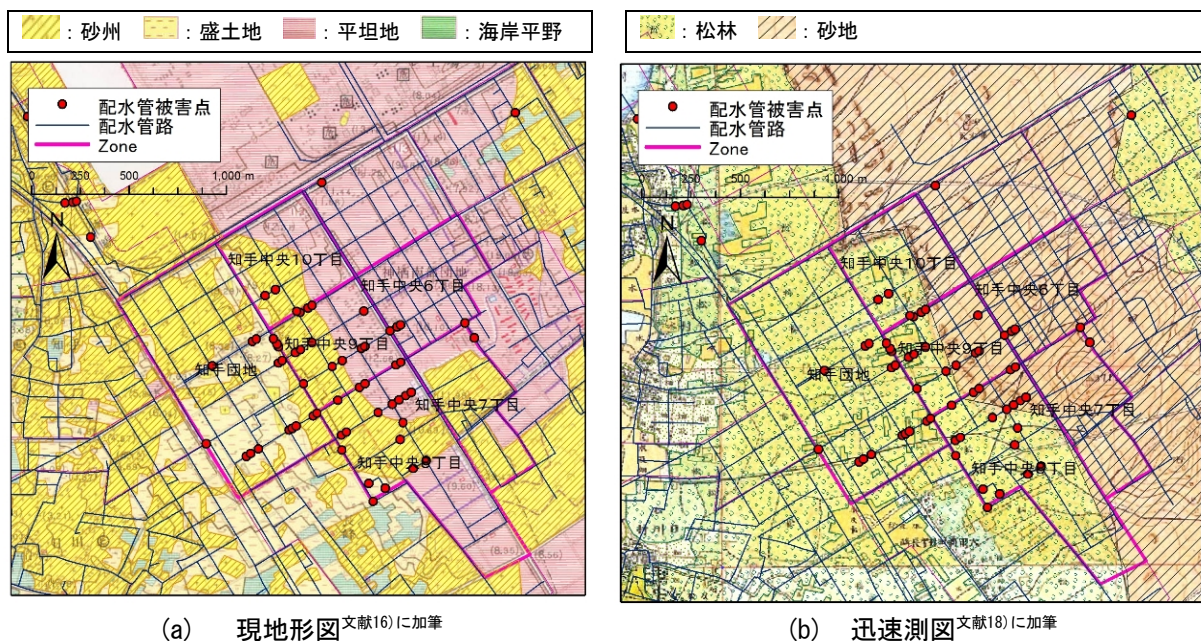


図8 Zone C（知手地域）の管路被害と地形図との関係

4.4 Zone D 平井

図9はZone Dである鹿嶋市大字平井の管路被害の分布に現地形図、迅速測図を重ねたものである。Zone Dでも管路被害は多いが、Zone Dの東側にある太平洋側の砂丘の後背湿地でも管路被害が集中している。Zone Dの西側には南北に段丘が形成されており、Zone Dは段丘と海側の砂丘との間にある水はけの悪い後背湿地といえる。昔から湿地帯であったが、近年、市街地開発のために宅地造成が進んでおり、地震時の液状化によって築浅の住宅が傾斜していた。現地形図では、砂州の一帯に凹地・浅い谷ができてい

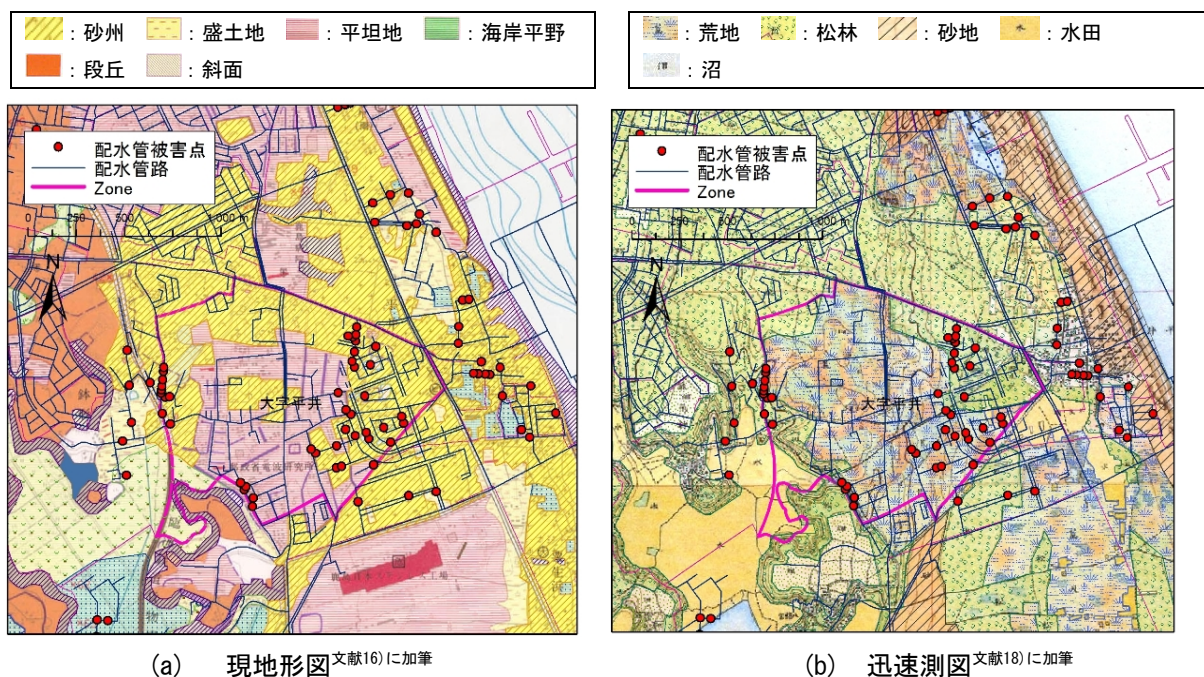


図9 Zone D（平井地域）の管路被害と地形図との関係

るところに被害点が多い。また、旧版地図である迅速測図では、荒地と表記されており、湿った環境を好む低木林が広がっていた。軟弱な地盤で、地下水位が高いことが液状化につながったと考えられる。しかし、Zone Dの中央にある、迅速測図では荒地、現地形図では平坦地となる箇所では管路被害が少なかった。

4.5 Zone E 緑ヶ丘

図10はZone Eである鹿嶋市の鹿島神宮駅周辺の管路被害の分布に現地形図、迅速測図を重ねたものである。土地区画整理事業により図中に示す大字宮中、大字宮下は、平成22年、緑ヶ丘1～4丁目に変更されている。緑ヶ丘は段丘上に形成された住宅地で、現地形図からも分かるように周囲が丘陵地で谷が形成されているため、谷筋の集水域にあたる。一方、宮下1～3丁目では、JR臨海大洗鹿島線の鹿島神宮駅周辺の高架橋基部で液状化が発生し、多くの噴砂痕が確認された⁵⁾。現地形図では、JR線に沿った谷筋は盛土地盤となっている。一方、迅速測図では、Zone Eの大部分は水田になっている。谷底低地であることで地下水位が高く、液状化しやすい地盤であったと考えられる。現地形図や迅速測図で示されているZone Eの谷底低地の地形は、これまでも指摘されてきた³⁾液状化が発生しやすい条件であったといえる。

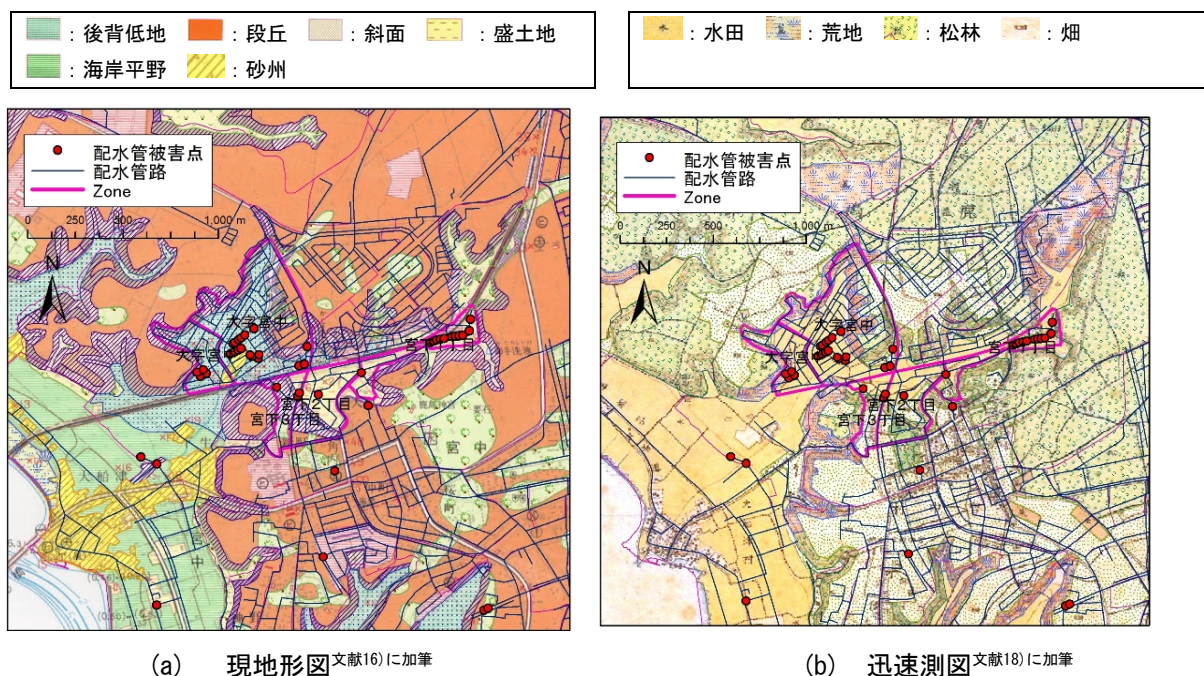


図10 Zone E（緑ヶ丘地域）の管路被害と地形図との関係

4.6 Zone F 日の出

図11はZone Fである潮来市日の出の管路被害の分布に現地形図、迅速測図を重ねたものである。Zone Fの日の出は甚大な液状化が発生した地域⁵⁾で、Zone Fの南部（日の出4、5、6丁目と8丁目の南部）では、被害確認・復旧工事がなされておらず、地上に仮設配管が設置されているため、南部に管路被害点が無い。しかし、Zone Fの南部の管路被害率は、北部のそれをはるかに超えると考えられる。Zone Fは現地形図では盛土地であり、迅速測図では内浪逆浦と呼ばれる内水湖であった。1941年に内浪逆浦干拓事業が着工し、戦後1950年に農地開発として水田化された。その後、1970年から鹿島工業団地の建設にあわせた住宅供給のため逆浦土地区画整理事業として宅地造成され、1979年に事業が完了した経緯がある²¹⁾。

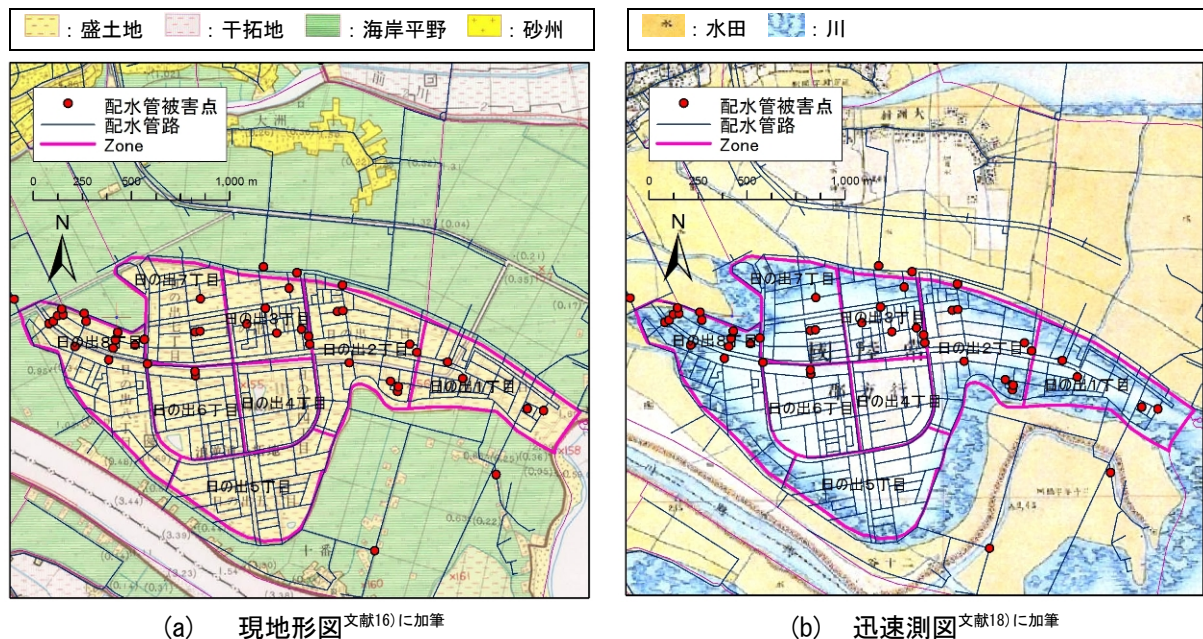


図11 Zone F（日の出地域）の管路被害と地形図との関係
 （地区図中の下半分（日の出4～6丁目と8丁目の南半分）は液状化が甚大なため管路被害箇所未調査）

液状化した日の出3丁目のボーリング資料では、厚さ0.5mの盛土の下位にGL-4mまで細砂（N=5～15）が堆積し、その下位に2mの厚さでシルト混じりの細砂がN<5で堆積しており、GL-9m以下になるとN>30の細砂になる。橋本・安田²¹⁾によるZone Fを南北に走る測線の断面図では、Zoneの北部では沖積砂質土層の下層に洪積砂質土層が堆積しているが、南部では沖積砂質土層の間に5m近い厚さの沖積粘性土層があることを示している。上述のボーリングは北部と南部の境界位置にあり、シルト混じりの細砂は沖積粘性土層の北縁にあたると考えられる。Zone Fでは、橋本・安田²¹⁾が示すように沖積粘性土層より上層にある沖積砂質土層の地盤が液状化したと考えられる。現地形図では液状化による管路被害集中地域となることを予測するのは難しいが、迅速測図を合わせてみればZone Fは広域な干拓地であることがわかり、液状化しやすい地域であることが想定できる。

4.7 Zone G 佐原

Zone Gである香取市佐原の管路被害の分布に現地形図、迅速測図を重ねたものを図12に示す。Zone Gは旧佐原市の市街地の国道356号線から利根川までの区間である。このZoneには、宅地とともに市役所もあり、路面の液状化だけでなく周辺の掘割で側方流動が発生し、掘割は堰き止められた。この地区の液状化が甚大であったことから水道管路は復旧されず、2011年3月末の段階で地上仮設配管が早期に設置されている⁹⁾。図に示すように、被害点ではなく、Zone内の管路の大部分が被害管路として災害査定の対象となっている。

現地形図では、Zone Gは盛土地と表示されているが、国道よりも内陸側の地域でも同じ盛土地があり、現地形図からは国道の南北でその違いはない。しかし、迅速測図では現在の国道が河岸であったことが明瞭であり、液状化した地区の管路は1880年代には利根川の中にあつたことが確認できる。これらのことから、現地形図では判断できないが迅速測図を用いることで液状化による管路被害集中地域を推定できる可能性がある。

市役所地区内のボーリング資料によると、表層からGL-0.5mまで砂質の盛土があり、GL-6mまでN<5の細砂が6mの厚さで堆積しており、その下位に2mほどの厚さでシルトが挟まれ、さらにその下位にもN=10程度の細砂がGL-13m近く堆積している。盛土ならびに利根川沿岸に堆積した表層の10m程度の砂層が液状化したものと考えられる。

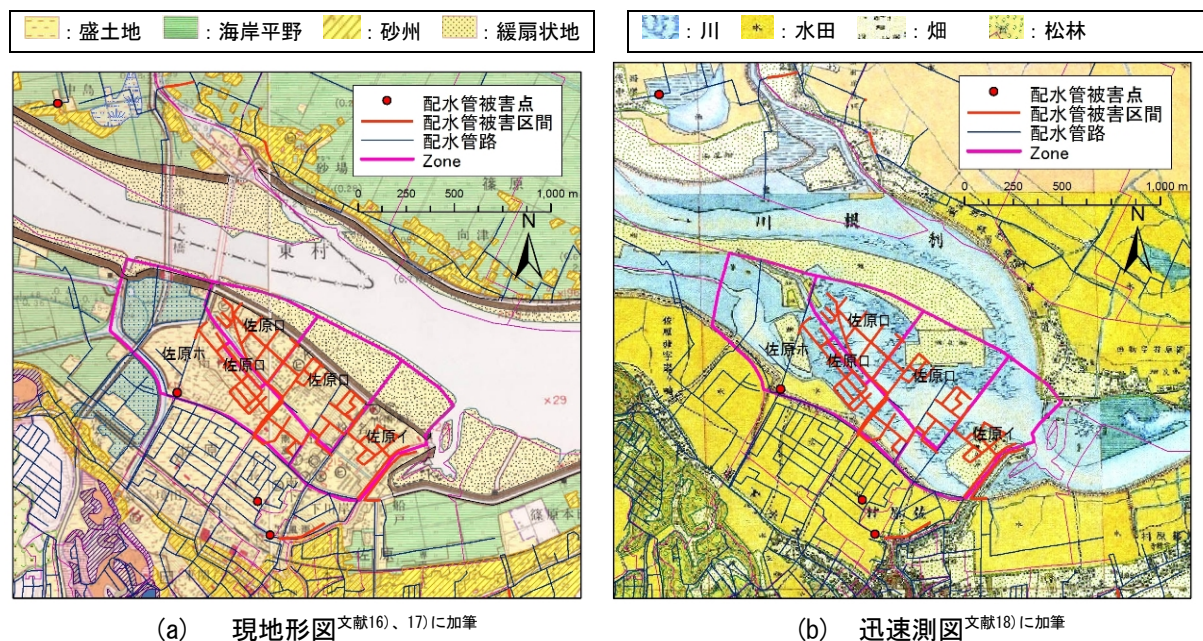


図12 Zone G（佐原地域）の管路被害と地形図との関係

5. 液状化による管路被害集中地域の地形的要因

表3に液状化による管路被害集中地域と設定したZoneの管路延長、被害件数、管路被害率と、現地形図・迅速測図の地形条件と液状化の要因について考察した結果を示す。Zone 以外の地域では管路被害率が0.19件/kmであるのに対して、Zone内の管路被害率が1～3件/kmであり、Zone内ではそれ以外の地区と比べて6～17倍近く被害が大きくなることが分かった。地震動による管路の脆弱性が各Zoneで異なっているが、Zone間の相対的な管路の脆弱性よりも液状化による路面の不陸程度によって被害率が影響されると考えられる。

Zoneの特徴として、7地区中2地区（Zone A、G）は旧河川の埋立地であり、1地区（Zone F）は旧湖沼の干拓地上の盛土である。そこでの液状化後の地盤変位は大きく、管路被害率が高い、もしくは復旧できず仮設配管をした地域になる。また、後背湿地や狭隘な谷底平地の盛土地盤（Zone DとE）では、一区間の管路上に連続して被害が発生している。これらの地区は、現地形図では同じ地形区分にある周辺地盤と区別がつかず、液状化による管路被害集中地域となる場所が特定しにくい。迅速測図などの旧版地図を参照することでその範囲を限定することができる。また、砂利採掘場の埋め戻し土が液状化したと考えられる2地区（Zone BとC）は、新旧の地形図で人工的に改変された地盤であることを識別することができなかった。埋め戻し土の締め固め基準を徹底するとともに、人工改変地であることの説明が必要と考えられる。

本研究では管路被害率0.3件/km以上で管路密度10km/km²以上の町丁目が複数隣接している地域を管路被害集中地域と設定し、それぞれの地域で液状化があることを確認した。本研究で提示した液状化による管路被害集中地域の地盤は、いくつかのボーリング資料を参照する限り、液状化しやすい地盤であったことは確かである。それとともに、同様な液状化しやすい地盤条件が1～2km²の空間的な広がりをもって分布していたことが、軟弱地盤の盆地を形成し、震動ならびにその後の液状化による地盤変位を増大させ、地中構造物の被害の多数集中発生につながった。本地域は、液状化による永久変位が大きく、管路被害情報も充実していることから、今後は液状化地盤での永久変位と管路被害との関係についても明らかにしていく必要がある。

表3 分析対象地区の管路被害状況

Zone	地区名	管路 延長 (km)	管路被害 (件) [被害延長 (km)]	管路 被害率 (件/km) [被害率 (%)]	Zoneの 現地形図／迅速測図 の表記	液状化要因の考察
A	掘割	22.7	75	3.30	盛土地／河川	旧河川の堆積砂層ならびに埋め立て土が液状化した
B	深芝	28.7	40	1.40	砂州／松林	砂利採掘場の埋め戻し土が液状化した
C	知手	30.4	54	1.78	砂州／松林	砂利採掘場の埋め戻し土が液状化した
D	平井	19.1	43	2.25	砂州／荒地	段丘と砂丘の間の後背湿地で液状化した
E	緑ヶ丘	15.2	37	2.44	後背低地・盛土地／ 水田	谷底低地で液状化した
F	日の出	33.5	38	1.13	盛土地／内水湖	旧湖沼の干拓地において、旧湖沼の堆積砂質土が液状化した
G	佐原	10.4	1 [8.4km]	— [80.6%]	盛土地／河川	旧河川の堆積砂層ならびに埋め立て土が液状化した
Zone 総計		160	288	1.80		
Zone以外総計		1,379	259	0.19		

注) Zone Fの被害不明区間とZone Gの被害区間延長のデータを除く

6. まとめ

本研究は、東北地方太平洋沖地震における利根川河口の鹿島地域を対象にして、水道管路の被害分布から液状化による管路被害集中地域の空間的な広がり进行を明らかにした。さらに、液状化による管路被害集中地域となった範囲の液状化の要因について新旧の地形・土地利用から分析した。本研究の結論は、以下の通りにまとめられる。

- ・ 管路被害率0.3件/km以上で管路密度10km/km²以上の町丁目が複数隣接している地域を管路被害集中地域と設定した。それぞれの地域で液状化が発生していることを確認し、液状化による管路被害であったと考えられる。この液状化による管路被害集中地域は鹿島地域内に7ヵ所あることがわかり、いずれも約1～2km²の限定された地域であった。
- ・ 液状化による管路被害集中地域は、旧河川を埋め立てた地盤や干拓地の盛土地盤と、後背湿地や狭隘な谷底平地の盛土地盤、砂利採掘場の埋め戻し土が液状化した人工改変地であることが明らかになった。自然地盤の埋め立て地区については、現地形図では同じ地形区分にある周辺地盤と区別がつかず、液状化による管路被害集中地域となる場所が特定しにくい、迅速測図などの旧版地図を参照することでその範囲を限定することができることがわかった。
- ・ 本研究で設定した液状化による管路被害集中地域内ではそれ以外の周辺地区と比べて管路被害率が6～17倍大きくなることが分かった。
- ・ 液状化による管路被害集中地域の地盤は、液状化しやすい地盤であったことは確かであるが、それとともに、同様な液状化しやすい地盤条件が1～2km²の空間的な広がりをもって分布していたことが、軟弱砂層の盆地を形成し、震動ならびにその後の液状化による地盤変状を増大させ、地中構造物の被害の多数集中発生につながったと考えられる

謝 辞

本論文の執筆にあたり、茨城県神栖市・鹿嶋市・潮来市と千葉県香取市から水道管路の被害情報とボーリングの資料を提供していただいた。また、本研究の一部は、平成23年度財団法人鴻池奨学財団研究助成費「液状化地盤におけるライフライン施設被災メカニズムの解明（代表者 銚田泰子）」に支援されている。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 安田進、原田健二：東京湾岸における液状化被害、地盤工学会誌、59-7（642）、pp.38-41、2011年
- 2) 若松加寿江：2011年東北地方太平洋沖地震による再液状化現象、第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集、Paper No. 6-056、2011年
- 3) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、2009年版、2009年
- 4) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針、2001年
- 5) 銚田泰子、片桐信：水道施設の被害、土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書、10章、2011年、61p.
- 6) 国土地理院：数値地図25000（空間データ基盤）茨城、2002年
- 7) 国土地理院：数値地図25000（空間データ基盤）千葉、2002年
- 8) (社)日本水道協会：水道統計、2007年
- 9) 小長井一男、末富岩雄、澤田純男、尾上篤生、豊田浩史、銚田泰子、高田至郎、田村敬一、岩田秀治、橋本隆雄、家村浩和：2007年新潟県中越沖地震の被害とその特徴、土木学会地震被害調査小委員会、2006年～2010年に発生した国内外の地震被害報告書、2010年
- 10) 銚田泰子、岡本祐：東北地方太平洋沖地震における断水長期化の解明、地域安全学会論文集、No.17、2012年（印刷中）
- 11) 総務省：地図で見る統計（統計GIS）、（<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>）
- 12) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災水道復旧の記録、pp. 29、1996年
- 13) 新潟県中越地震水道現地調査団（厚生労働省健康局水道課）：新潟県中越地震水道被害調査報告書、2005年
- 14) 平成19 年(2007 年)能登半島地震水道施設被害等調査団(厚生労働省健康局水道課)：平成19 年(2007 年)能登半島地震水道施設被害等調査報告書、2007年
- 15) 小林朋美、山崎文雄、永田茂：地震被害想定のための都市基盤データに基づく上水道延長分布の推定、地域安全学会論文集、No.15、pp.163-168、2011年
- 16) 国土地理院：1:25,000 土地条件図 潮来、1979年
- 17) 国土地理院：1:25,000 土地条件図 佐原、1978年
- 18) 国土地理院：明治前期測量2万分1フランス式彩色地図、農業環境技術研究所の歴史的農業環境閲覧システムから複製版を利用（<http://habs.dc.affrc.go.jp/>）
- 19) 国土地理院：土地条件図とは（http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lc_index.html）
- 20) 神栖町：神栖の歴史、1984年
- 21) 橋本隆雄、安田進：2011 年東北地方太平洋沖地震による潮来市日の出地区の液状化被害分析、第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集、Paper No. 6-156、2011年
- 22) (社)日本水道協会：地震による水道管路の被害予測、1998年
- 23) 鹿嶋市：鹿嶋市史地誌編、2005年
- 24) Tsukamoto, Y., Kawabe, S., Kokusho, T., Araki, K.: Soil Liquefaction observed at areas located along the lower stream of Tonegawa river during 2011 Great East Japan earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 2012, pp.731-738
- 25) 国土地理院：「国土変遷アーカイブ空中写真閲覧システム」（<http://archive.gsi.go.jp/airphoto/>）

（受理： 2012年 3月28日）

（掲載決定： 2012年 8月21日）

Liquefaction-Induced Pipeline Damage Concentration and Landform and Land Use Changes in the Kashima Region

KUWATA Yasuko ¹⁾ and IKEJIRI Daisuke ²⁾

1) Member, Associate Professor, Kobe University, Dr. Eng.

2) Graduate Student, Kobe University

ABSTRACT

The 2011 Tohoku, Japan earthquake caused extensive liquefaction to the coastal area of the Tokyo Bay and to the lower banks of the Tone River in North Kanto region. Since underground water pipeline is pulled out at the joint part due to the liquefied ground deformation, the number of pipeline damage would be an indicator of the liquefaction severity. Referring to the analysis of pipeline analysis in the Kashima region along the lower banks of the Tone River, the pipeline damage was not homogeneously distributed but concentrated locally in the size of 1 km². This study analyzes this concentration area from the landform and land use change. The damage concentration area was able to be clarified by using the old topographical maps compiled in 1880's though it was difficult to specify it by present topographical maps.

Key Words: The 2011 Tohoku earthquake, Liquefaction, Lower bank of Tone River, Pipeline damage, Landform and land use change