

2016年熊本地震における下水道埋設管路の 地表断層変位による被災メカニズムの考察

畠山 大治¹・庄司 学²・永田 茂³・吉見 雅行⁴

¹学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s1820928@s.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: gshoji@kztsukuba.ac.jp

³正会員 防災科学技術研究所 災害過程研究部門 主幹研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

E-mail: nagata-shigeru@bosai.go.jp

⁴正会員 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央第7)

E-mail: yoshimi.m@aist.go.jp

2016年熊本地震では下水道埋設管路に甚大な被害が生じた。これらは地震動及び液状化による被害が支配的であると考えられるが、既往の地殻内地震と比べて熊本地震では大規模な地表断層変位が観測されている。本研究では、熊本地震の熊本市及び益城町における埋設管路と地表断層変位の交差点を対象に、管種、口径、微地形区分と被害率の関係ならびに被害形態と交差角の関係について分析を行った。また、地表断層変位の観測値と被害の関係を明らかにした上で、数値計算によって求めた地表変位と被害の関係についても分析を行った。

Key Words : sewer buried pipe, the 2016 Kumamoto earthquake, seismic damage, surface rupture, damage mode, crossing angle

1. はじめに

2016年4月14日、4月16日に発生した熊本地震では、下水道埋設管路に甚大な被害が発生した¹⁾。下水道埋設管路の被害の把握という観点から、例えば文献²⁾では既往の地震被害データを統一的な観点から分析し、地震動強さおよび液状化を指標として被害予測関数の構築が行われている。この結果、被害の相違は地震動や埋設地盤の相違によることが確認されていることから、下水道埋設管路は地震動や液状化の他に様々な影響を受けることが考えられる。また熊本地震においては、Shirahama et al.³⁾によって複数の地表断層変位が確認されていることから、

熊本地震においては地表断層変位による下水道埋設管路の被害が発生した可能性が考えられる。

地表断層変位と埋設管路の被害についての既往研究として、高田ら⁴⁾は兵庫県南部地震における地表断層変位による上水道管路被害に対して、地中鋼管路の変形量とモデル化した管路の最大ひずみとの関係を解析し、最大ひずみを求める簡易的な設計式を提案している。また、長谷川・清野⁵⁾は実験と解析を行うことによって、断層横断部での上水道管路の対策工法の提案を行っている。これらはいずれも上水道管路を対象とした研究であり、下水道埋設管路を対象とした研究はまだ少ない。

以上より本研究では、熊本市および益城町において地

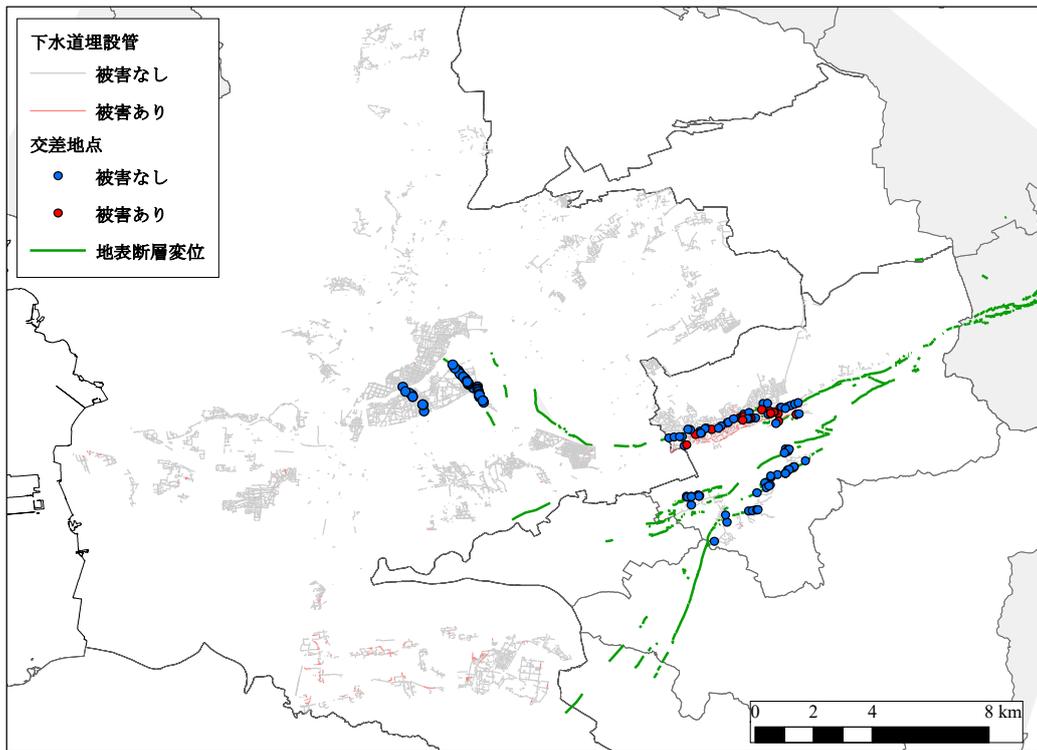


図-1 熊本市および益城町の下水道埋設管路と地表断層変位

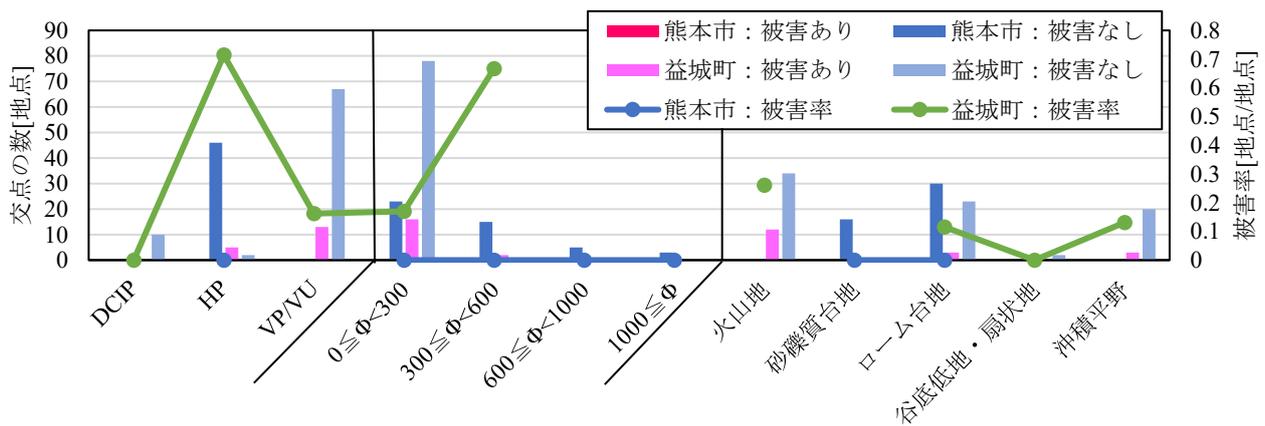


図-2 地表断層変位と管路の交差点の特徴

表断層変位と下水道埋設管路が交差した地点を対象として、その交差点の管種、口径、微地形区分と被害率の関係ならびに、被害形態及び管路と断層線の交差角の観点から被害状況の分析を行った。さらに、地表断層変位の観測値と被害の関係を解明し、地表変位の数値計算を行った結果と被害の関係についても分析を行った。

2. 分析対象とするデータおよびその特徴

対象とする下水道埋設管路は文献2)に示された熊本市及び熊本県益城町とした。文献2)で使われたデータは枝線に分類される管路の中でも、管種、口径、形状、施工年度が明らかとなっているデータであり、震災後に復旧

を要すると判断された管路が被害管路と定義されている。また、地表断層変位データは文献3),6)によるものとする。これらのデータを対象領域の下水道埋設管路と重ね合わせ、管路が断層を横断している箇所を点データとして抽出した結果が図-1である。図-1より熊本市では、管路と断層の交差点が46地点となり、いずれも中央区に存在したが、被害は確認されなかった。益城町では、交差点は97地点にのぼり、その中の18.6%の18地点が被害管路との交差点であり、これらの18地点の中でも10地点は秋津川と県道28号の間に存在した。以上より、熊本市では地表断層変位による下水道埋設管路の被害は発生しなかったが、益城町では、特に秋津川と県道28号の間において地表断層変位による被害が発生した可能性が高いと言える。



図-3 益城町における下水道埋設管の被害形態

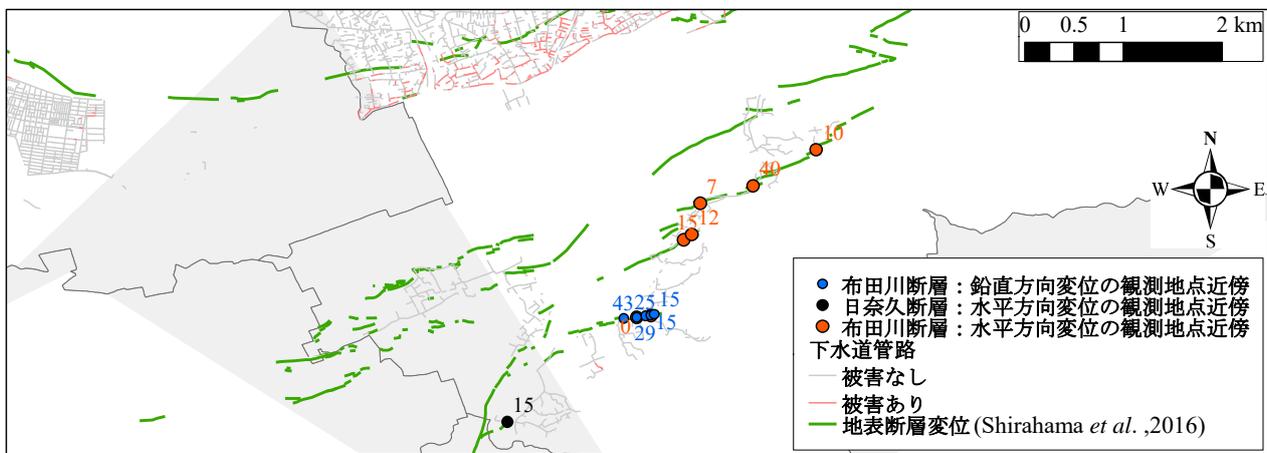


図-4 観測点の近傍に位置する交差点

表-1 観測点の近傍の交差点の変位量

	微地形区分			PGV[cm/s]				IJ	
	ローム台地	沖積平野	火山地	80-90	90-100	100-110	150-160	6.2	6.3
布田川断層	0(左右変位)	2	-	-	-	2	-	2	-
	7(左右変位)	-	1	-	-	-	1	-	1
	10(左右変位)	-	-	1	-	-	1	-	1
	12(左右変位)	1	-	-	-	1	-	-	1
	15(左右変位)	1	-	-	-	1	-	-	1
	15(鉛直方向)	2	-	-	-	2	-	2	-
	25(鉛直方向)	1	-	-	-	1	-	1	-
	29(鉛直方向)	1	-	-	-	1	-	1	-
	40(左右変位)	-	-	1	1	-	-	1	-
日奈久断層	43(鉛直方向)	1	-	-	1	-	-	1	-
	15(左右変位)	1	-	-	1	-	-	1	-

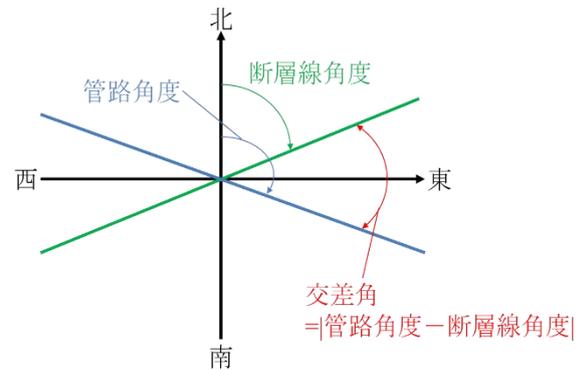


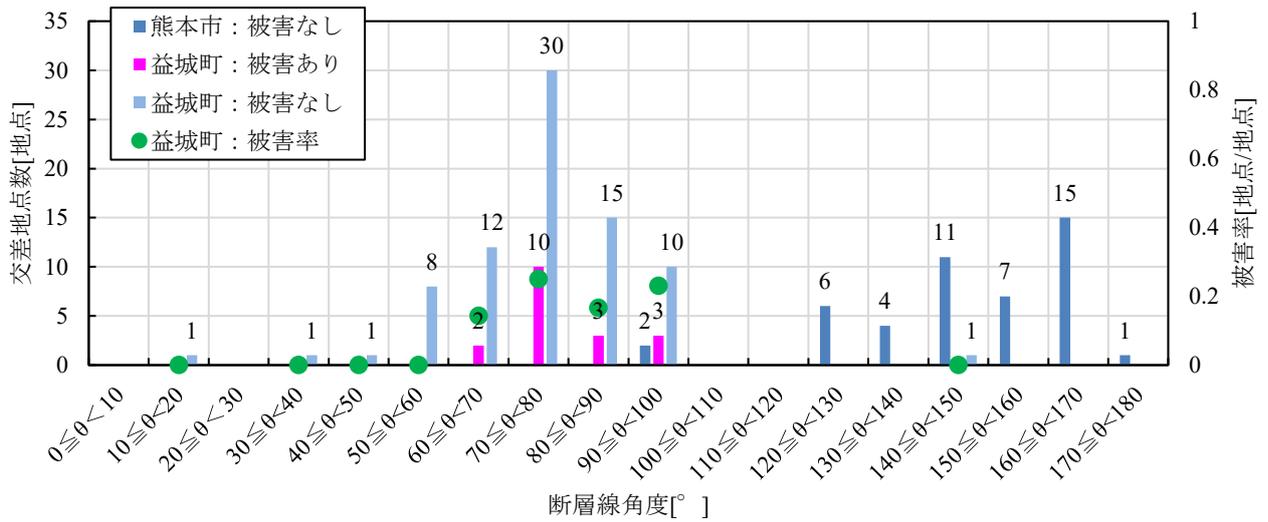
図-5 交差角の算出方法

また、これらの交差点において、管種、口径及び微地形区分ごとの特徴を精査した結果を図-2に示す。管種に関しては益城町ではVP/VU管が最も多くなった。被害率は益城町におけるHP管が0.714[地点/地点]と最も高く、VP/VU管の被害率も相対的に高い。口径に関しては、熊本市および益城町いずれも300[mm]未満の管路が多い。被害率は益城町における300[mm]以上600[mm]未満の管路が0.667[地点/地点]と最も高く、300[mm]未満の管路も相対的に高い。微地形区分に関しては、益城町の火山地に

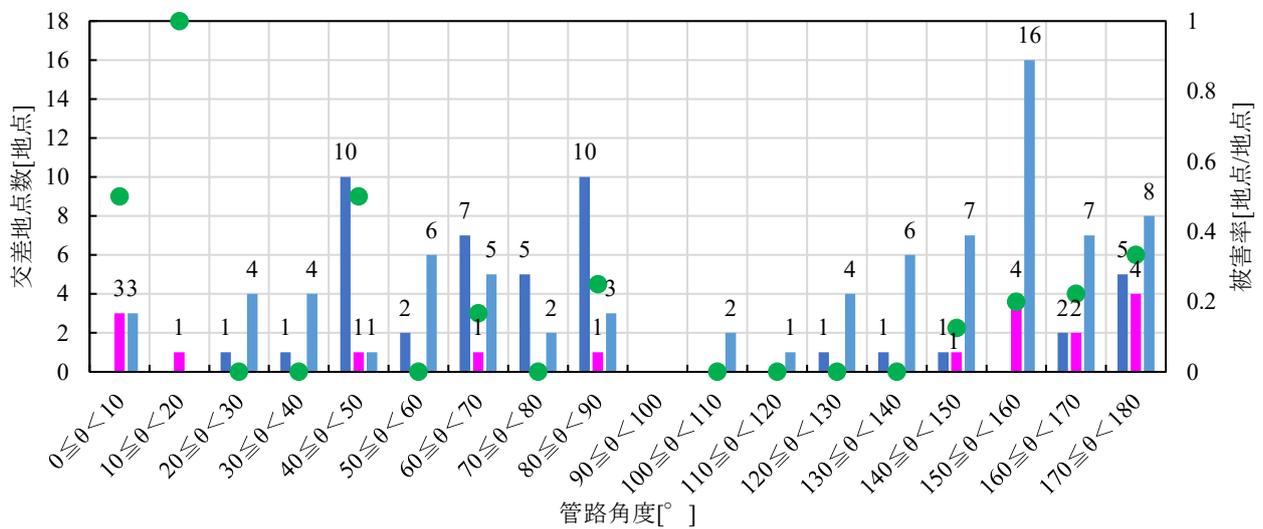
おける管路が最も多い。被害率も益城町の火山地において0.261[地点/地点]と最も高く、ローム台地と沖積平野においても相対的に高い。

3. 被害形態の分析および観測値と被害の比較

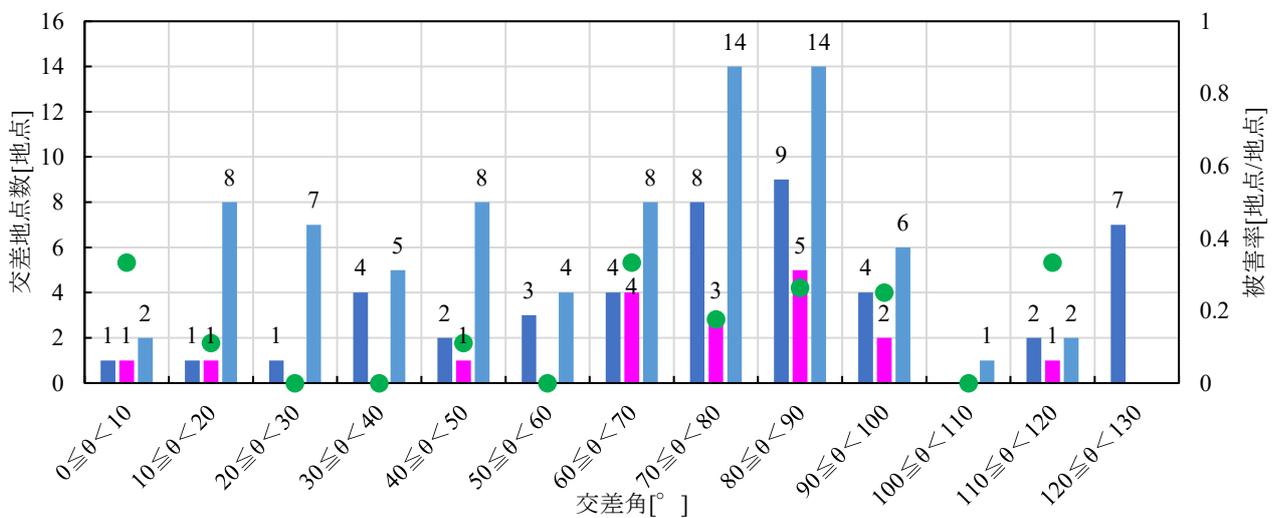
地表断層変位と管路の交差点について益城町においては図-3のように被害形態の詳細が判明しているため、



(a) 断層線角度の分布と益城町における被害率



(b) 管路角度の分布と益城町における被害率



(c) 交差角の分布と益城町における被害率

図-6 管路と断層線の交差角の地点数と被害率

表-2 交差角と被害形態との関係

	0 ≤ 0 < 10	10 ≤ 0 < 20	20 ≤ 0 < 30	30 ≤ 0 < 40	40 ≤ 0 < 50	50 ≤ 0 < 60	60 ≤ 0 < 70	70 ≤ 0 < 80	80 ≤ 0 < 90	90 ≤ 0 < 100	100 ≤ 0 < 110	110 ≤ 0 < 120	総計
たるみ		1			1		1	1				1	5
円周方向亀裂・継手ずれ									1				1
亀裂・破損								1					1
亀裂・破損・継手ずれ								1		1			2
破損	1								1	1			3
破損・亀裂							1		1				2
破損・取付部破損									1				1
モード不明							2		1				3
総計	1	1			1		4	3	5	2		1	18

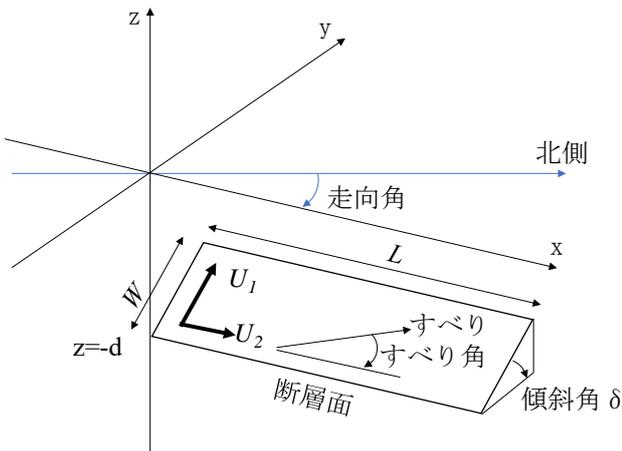


図-7 モデルとする断層 (文献7) Fig.1.に加筆

表-3 計算パラメータの設定

	布田川断層(#2)	日奈久断層(#1)
断層の数 ¹⁰⁾	189	
	9×14	9×7
断層の幅、長さ[km] ¹⁰⁾	2×2	
断層パラメータ[°] ¹⁰⁾	走向	235
	傾斜	65
	すべり角	177~263
上端深さ[km] ¹⁰⁾	1.988~17.205	
P波、S波速度[km/s]	P波	5.8
	S波	3.4
計算格子数	1040×800	
メッシュサイズ[m]	50	

益城町を対象に地表断層変位の管路の交差点における被害形態を分析した。被害形態については、1スパン当たり複数の被害形態が記録されている場合はこれらを切り分けて分析した。図-3より、交差点の被害形態としては破損が全体の37.5%と最も多く、次いで亀裂、たるみが全体の20.8%と多いことが明らかとなった。また、地表断層変位の観測地点³⁾近傍に位置する交差点を図-4に示し、表-1のように整理した。ここでは観測地点の半径25m以内に位置する交差点のみを対象として、布田川断層に沿った鉛直及び水平方向変位、日奈久断層に沿った水平方向変位のそれぞれの値について分析した。いずれも単位は[cm]であり、鉛直方向変位は南側を上盤とした場合を正の値、北側を上盤とした場合を負の値と

している。水平方向変位は右横ずれを正の値、左横ずれを負の値としている。交差点の中で観測値を有する地点は13地点存在し、いずれも変位は正の値、無被害の管路との交差点であった。また、管種はVP/VU管、口径300[mm]未満の管路であった。表-1より、布田川断層沿いでは、右横ずれの変位が0~15[cm]および40[cm]生じているがいずれも無被害であった。鉛直方向変位も15~43[cm]とやや大きな値となっているがいずれも無被害であった。日奈久断層沿いでは、右横ずれの変位が15[cm]生じた地点の近傍に1点のみ交差点があり、これも無被害であった。

なお、布田川断層沿いで右横ずれの変位が10[cm]以下を示す2地点においてはPGV=100~110、150~160[cm/s]と高い値を示す。一方、それ以外の布田川断層および日奈久断層沿いにおける11地点では、右横ずれの変位が0及び12~43[cm]とやや大きい値を示しており、PGVについても80~100[cm/s]とやや高い値を示した。

4. 管路と地表断層変位の交差角

埋設管路と断層変位との交差角が管路被害に及ぼす影響について分析を行った。分析手順としては、まず断層変位のラインデータと埋設管路のラインデータにおいて北を基準とした方位角を算出した。ここで断層変位のラインデータは50mメッシュの格子に基づいて分割し、分割したラインごとに、ラインの始点と終点を結ぶ線の方位角を算出した。埋設管路のラインデータについては、スパンごとに方位角を算出した。この方位角の差を図-5に示すように計算し、地表断層変位と埋設管路の交差角と定義した。また、交差角を10°刻みで分類し、被害管路との交差点が存在した益城町においてのみ、それぞれの分類ごとに被害管路との交差点数を全交差点数で除した被害率を算出した。図-6に地表断層変位の断層線角度、管路角度、およびそれらの交差角を示す。また、交差角ごとに管路の被害形態についてのデータを照らし合わせて比較を行った結果を表-2に示す。

図-6より、断層線角度については、熊本市においては

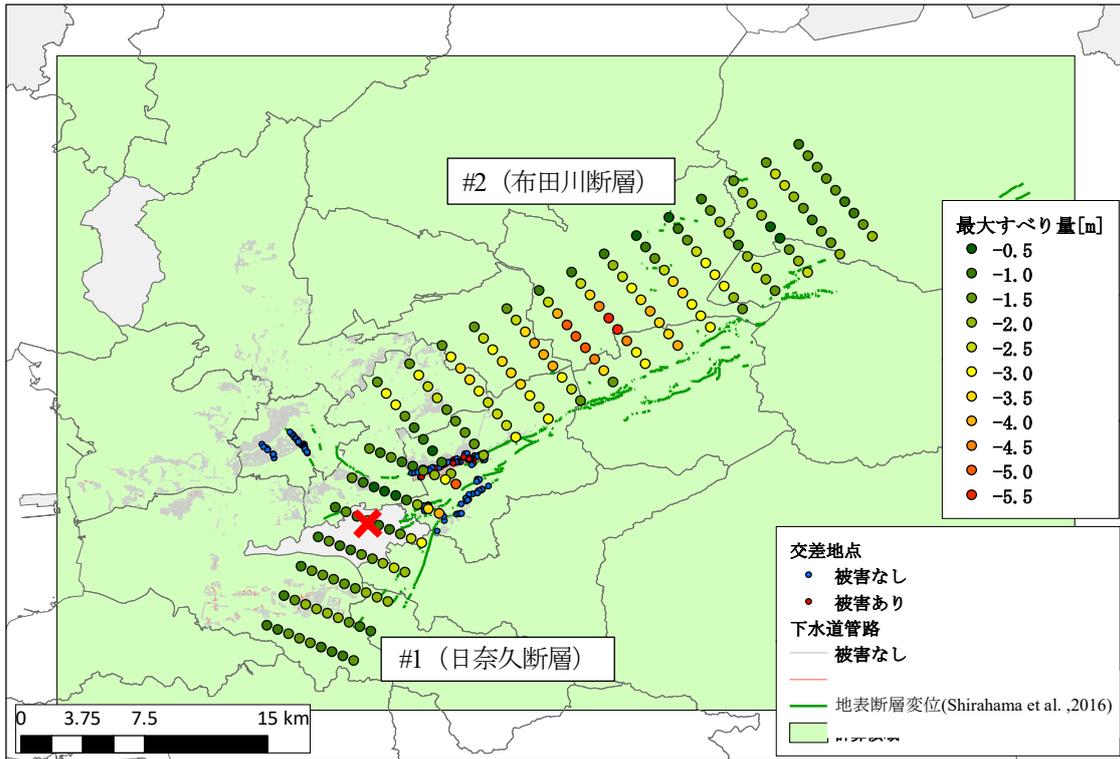


図-8 地表変位の計算領域と震源モデル

120~170[°]の範囲に集中しており、益城町では50~100[°]の範囲に集中している。管路角度については、熊本市および益城町いずれも40~90[°]および140~180[°]の範囲に比較的ばらついている。交差点数については、熊本市および益城町いずれも交差角70~90[°]の交差点が多く存在している。被害率については、交差角が60~100[°]の時に0.176~0.333[地点/地点]と高い値を示す。なお、0~10[°]および110~120[°]の時も被害率が高いが、交差点が少ないことが原因の一つと考えられるため、管路被害は交差角が直角に近い60~100[°]の時に多く発生したといえる。表-2より、たるみ被害については全域的に確認できるが、破損や亀裂、ずれなどの被害は図-6において被害率が比較的高かった60~100[°]の範囲に複数確認された。

5. 地表変位の計算

地表断層変位の観測地点³⁾のデータに基づくと、益城町の被害が集中している領域での地表断層変位量を詳細に分析することができないため、数値計算によって地表変位を求めることが必要となる。本研究では食違い弾性理論に基づくOkada⁷⁾による計算手法を用いることによって、地表変位を求める。

ここで、震源を点震源としてモデル化した上で、地盤全体を無限等方弾性体と仮定し、地盤中に断層すべりが

生じた場合の変位 $u_i(x_1, x_2, x_3)$ は、Steketee⁸⁾によって次のように与えられている。

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_i \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_l^j}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_l^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_l^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (1)$$

ここで δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 λ, μ はラメ定数、 Σ は断層面、 v_k は断層面上における方向余弦で $v_k = (0, -\sin \delta, \cos \delta)$ と表される。 u_l^j は断層面上の点 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) において、大きさ F の力の j 成分によって点 (x_1, x_2, x_3) に発生する変位の i 成分である。

Okada⁷⁾の手法では、図-7に示す座標系および断層、パラメータを設定する。ここで、 x, y は計算対象位置の座標、 d は点震源の深さ、 δ は断層面の傾斜角、 U_1, U_2, U_3 は断層走向方向、断層傾斜角方向、およびそれらに垂直な方向のすべり成分である。さらに、断層すべりによる半無限弾性体の応答を考える場合には、 u_l^j と F の関係⁹⁾に基づいて式(1)を変形する。

以上を踏まえて、 $\Delta u_j = (U_1, 0, 0)$ 、つまり横ずれ断層の場合において、 $(0, 0, -d)$ に存在する点震源による地表の変位は、Okada⁷⁾により以下のように示されている。

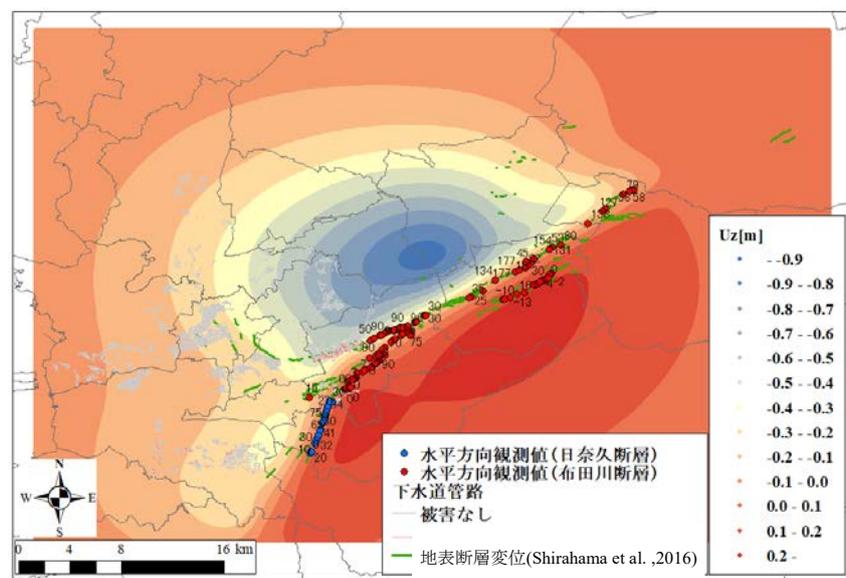
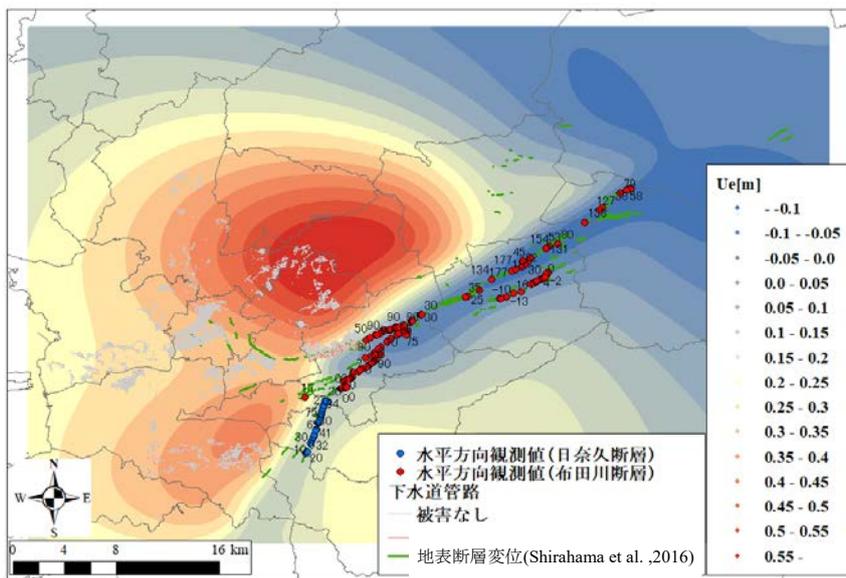
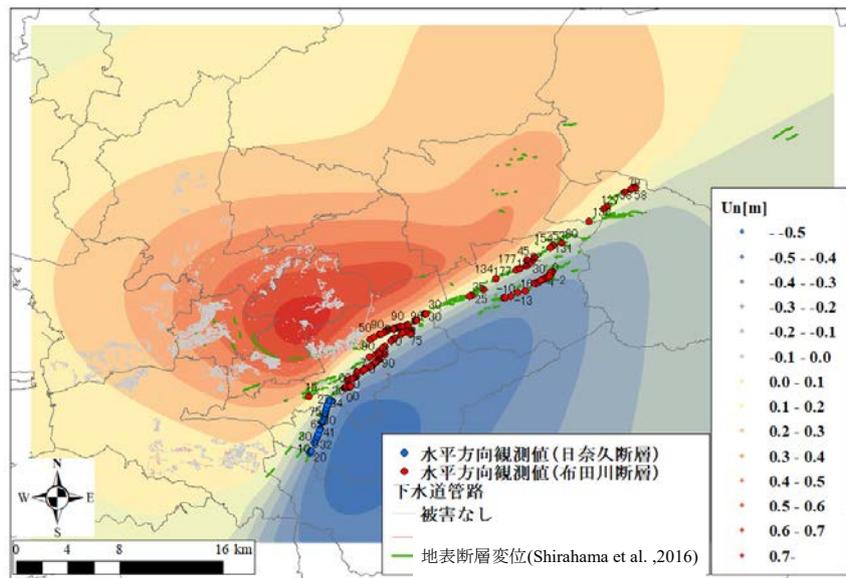


図-9 地表変位の計算結果

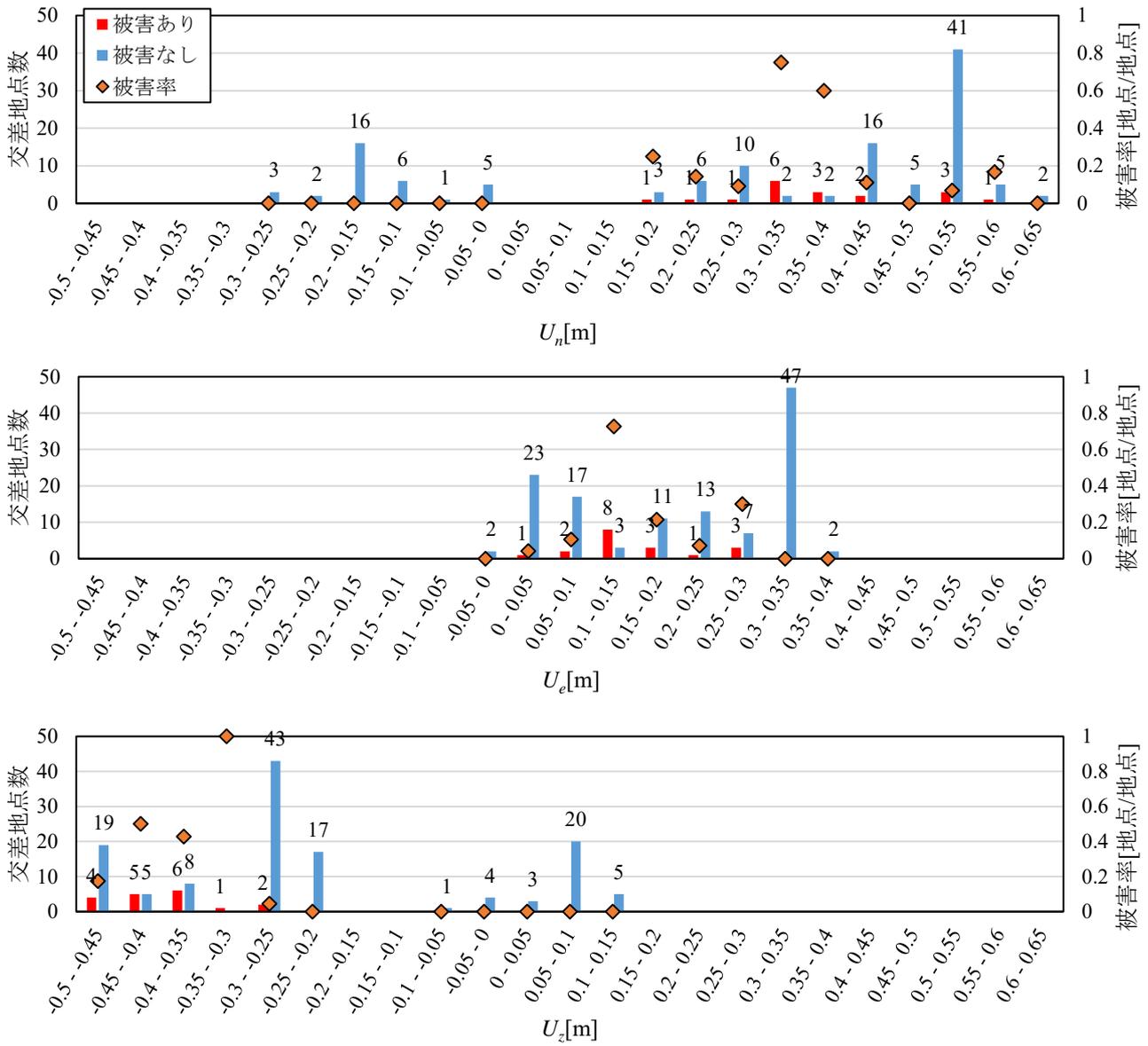


図-10 計算結果と交差点の分布

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3x^2q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \end{cases} \quad (2a)$$

$$I_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \quad (3a)$$

$$I_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \quad (3b)$$

$$I_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \quad (3c)$$

$$I_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[-xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \quad (3d)$$

$$I_5^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \quad (3e)$$

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta \quad (3f)$$

$$q = y \sin \delta - d \cos \delta \quad (3g)$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2 \quad (3h)$$

同様に縦ずれ断層の場合には以下のように示される。

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3xpq}{R^5} - I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3ypq}{R^5} - I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3dpq}{R^5} - I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta\Sigma \end{cases} \quad (2b)$$

ただし、 $\Delta\Sigma$ は断層表面要素である。式(2a)および(2b)の変数については以下の通りである。

震源断層モデルは図-8に示すようなAsano and Iwata¹⁰⁾のモデルを適用する。このモデルは南北側の日奈久断

層と北東側の布田川断層の2つの断層で構成されており、それぞれに断層の走向や傾斜などのパラメータが表-3のように設定されている。なお、表-3においてP波、S波速度は地震調査研究推進本部の地下構造データ¹¹⁾を参考に、熊本地震の震源位置におけるP波、S波速度を適用した。計算を行う領域は、管路、地表断層変位、震源モデルがすべて含まれるような東西方向52[km]、南北方向40[km]に広がる領域とし、50[m]メッシュに分割して計算を行った。

以上より、図-9に示すように南北方向への変位を表す U_n 、東西方向への変位を表す U_e 、鉛直方向への変位を表す U_z の3方向の変位を算出した。これらはそれぞれ北側、東側、鉛直上向きを正としている。この計算結果と、管路と断層変位の交差点数を照らし合わせて比較を行い、変位を0.05[m]刻みで分類した上で、それぞれの区分で被害率を算出した結果を図-10に示す。図-10より、交差点が集中しているのは、 U_n に対しては0.15~0.6[m]、 U_e に対しては-0.05~0.35[m]、 U_z に対しては-0.5~-0.2[m]の変位である。被害率に関しては、 U_n に対しては0.3~0.4[m]、 U_e に対しては0.1~0.3[m]、 U_z に対しては-0.45~-0.3[m]の変位が生じる場合に被害率が相対的に高くなっている。このように変位の成分によって交差点の分類および被害の様子が異なることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究では、熊本市および益城町において地表断層変位と下水道埋設管路が交差した地点を対象として、管種、口径、微地形区分と被害率の関係ならびに、被害形態及び管路と断層線の交差角の観点から被害状況の分析を行った。さらに、地表断層変位の観測値と被害の関係を解明し、地表変位の数値計算を行った結果の推定値と管路の被害の関係についても分析を行った。

- (1) 管路と断層の交差点は熊本市では46地点となり、益城町では97地点にのぼった。後者の中の18地点が被害管路との交差点であった。この18地点はHPおよびVP/VU管、600[mm]未満の口径、火山地、ローム台地、沖積平野の微地形区分に分類されるものである。その中でHP管、口径300[mm]以上600[mm]未満、火山地に分類される管路で被害率が相対的に高かった。益城町における交差点の被害形態としては、破損が全体の37.5%と最も多く、次いで亀裂、たるみが全体の20.8%と多いことが明らかとなった。
- (2) 交差点近傍の地表断層変位の観測値データに基づけば、布田川断層沿いでは右横ずれの変位が0~15[cm]および40[cm]生じ、鉛直方向変位が

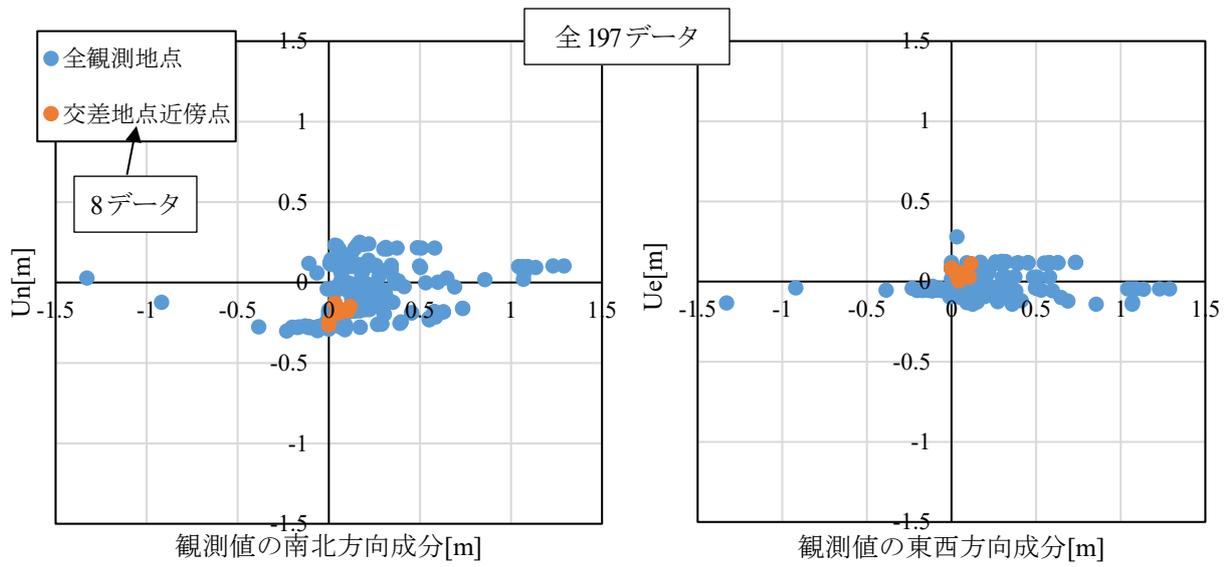
15~43[cm]生じていた。日奈久断層沿いにおいては、右横ずれの変位が15[cm]生じた地点の近傍に1点のみ交差点があった。これらすべての地点において管路は無被害であった。

- (3) 交差角と管路被害の関係については、交差角が60~100[°]の時に被害率が0.176~0.333[地点/地点]と高い値を示し、被害形態は破損や亀裂、ずれなどの被害が複数確認された。
- (4) 地表変位の推定値に基づけば、交差点に生じた南北方向変位 U_n が0.3~0.4[m]、東西方向変位 U_e が0.1~0.3[m]および、鉛直方向変位 U_z が-0.45~-0.3[m]の場合において被害率が相対的に高い。

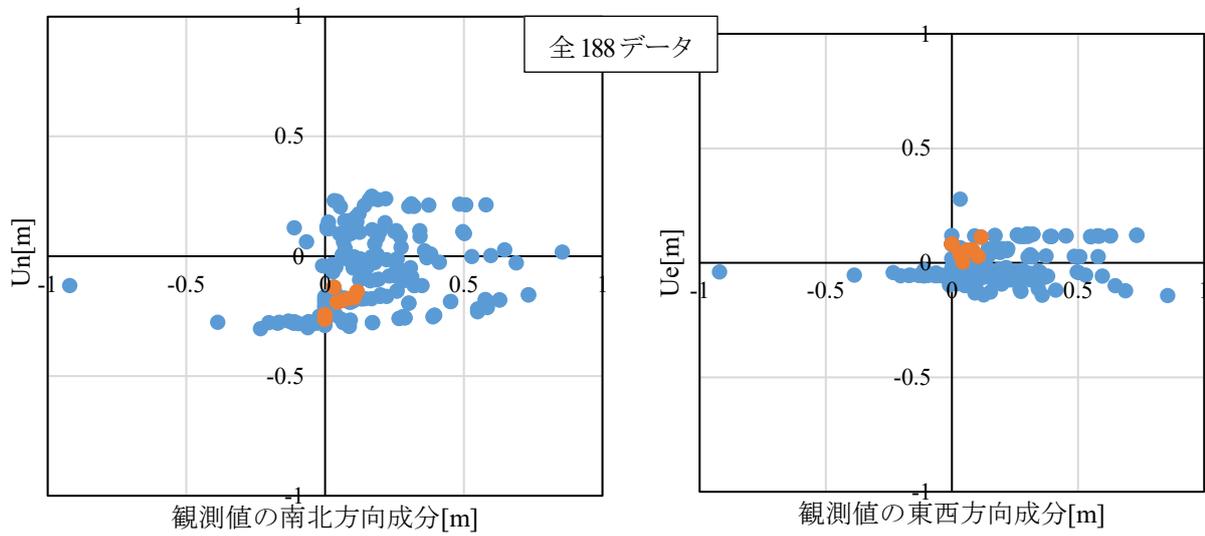
謝辞：本研究を実施するにあたり、熊本県土木部土木技術管理課および熊本市上下水道局に熊本地震における管渠被害データの提供をして頂きました。また、関東学院大学理工学部土木学系の若松加寿江先生には微地形区分データの提供をして頂きました。ここに関係各位に対して厚く御礼申し上げます。

付録 観測値および工学的基盤相当の地盤での残留変位と数値計算結果の比較

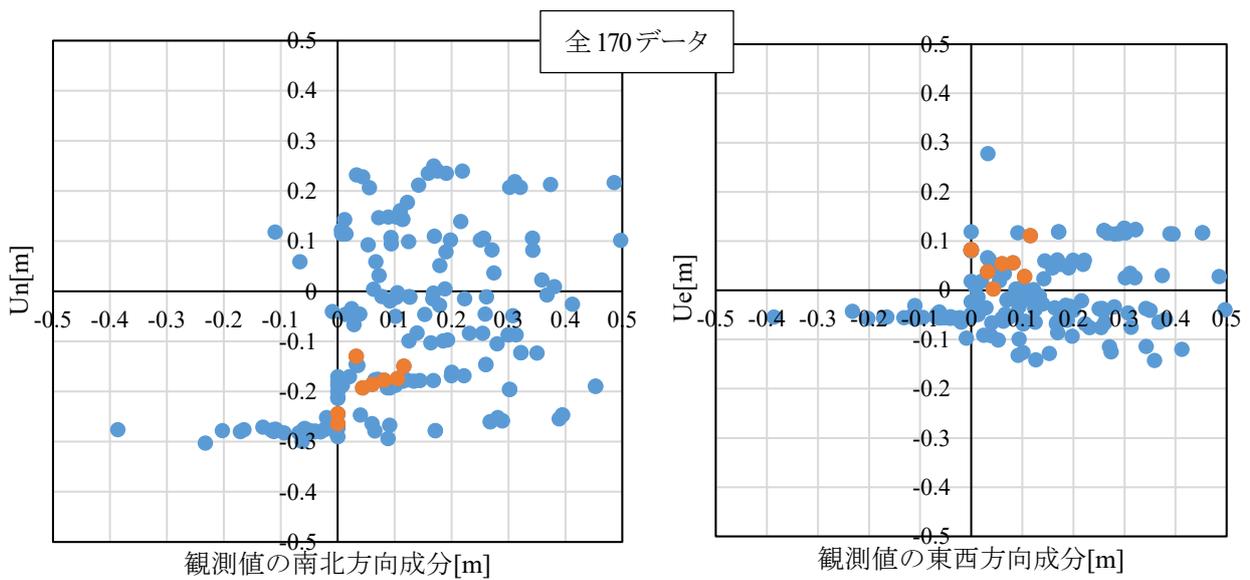
全交差点に対して、断層変位の観測値と計算結果の比較を行った結果を付図-1に示す。また、観測値と計算結果とのいずれにおいても絶対値をとることにより、断層の方向を考慮せずに変位量のみを比較した結果を付図-2に示す。付図-1と付図-2においては、全観測値、1[m]以下の観測値、0.5[m]以下の観測値のみとしてそれぞれ抽出した場合の比較を行った。また、図-3に示した観測地点近傍に位置する交差点については色を区別して示している。なお、観測値は断層変位に沿った方向の変位量であるのに対して、計算値は南北方向および東西方向の変位量であり、変位の方向が異なるため、観測値を南北ならびに東西の成分に分けて比較を行った。



(a) 全観測値を対象に比較

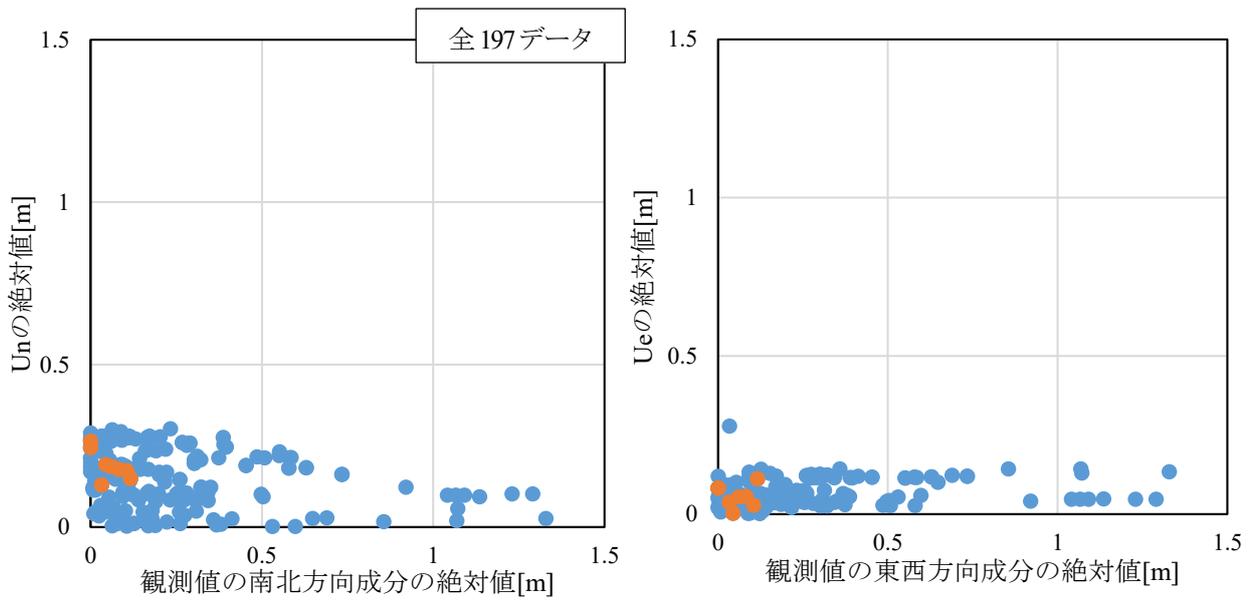


(b) 1[m]以下の観測値のみを対象に比較

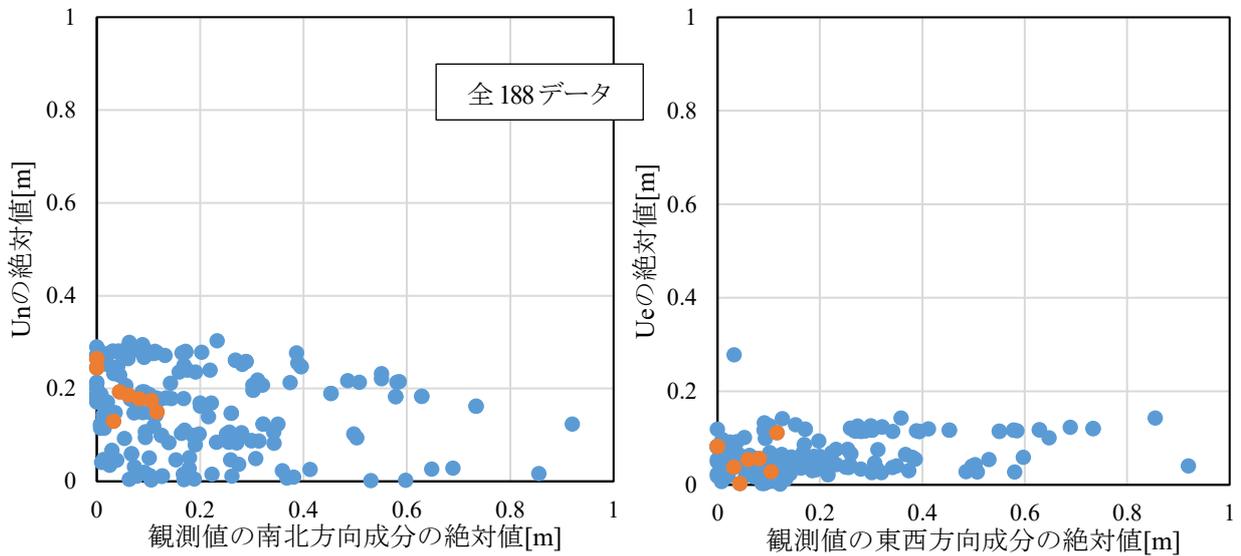


(c) 0.5[m]以下の観測値のみを対象に比較

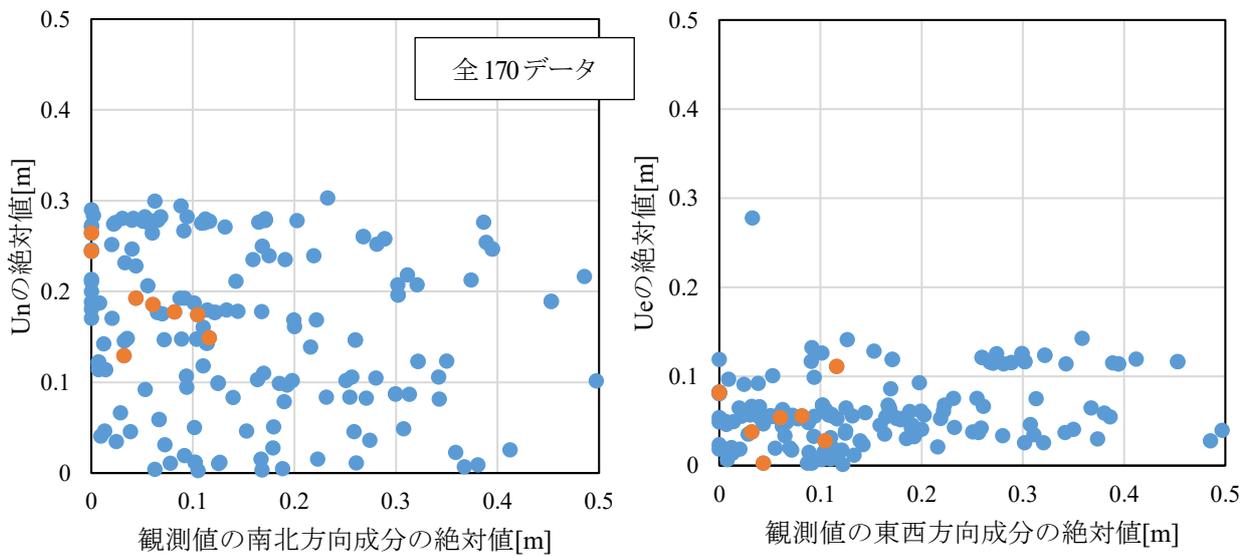
付図-1 地表変位の観測値と計算結果の比較



(a) 全観測値を対象に比較



(b) 1[m]以下の観測値のみを対象に比較



(c) 0.5[m]以下の観測値のみを対象に比較

付図-2 地表変位の観測値と計算結果の絶対値の比較

参考文献

- 1) 国土交通省：熊本県熊本地方を震源とする地震について（第 28 報），<http://www.mlit.go.jp/common/001130271.pdf> (2017 年 4 月 4 日参照)
- 2) 畠山大治, 庄司学, 永田茂：下水道埋設管路の地震被害データに対する統一的な整理・分析と解釈, 土木学会論文集, A1S-0932, 2019 年.
- 3) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D., and Miyakawa, A. : Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:191, DOI 10.1186/s40623-016-0559-1, 2016.
- 4) 高田至郎, Hassani, N., 福田克己：断層を横断する地中管路の設計法の提案, 土木学会論文, No.668, 1-54, pp.187-194, 2001.1.
- 5) 長谷川延広, 清野純史：断層横断管路の耐震設計手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4 (地震工学論文集第 34 卷), pp.I_659-I_665, 2015
- 6) 文部科学省：平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成 28 年度成果報告書, 3.1 章, https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/kumamoto_sogochousa/h28/h28kumamoto_sogochousa_3_1.pdf
- 7) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154, 1985.
- 8) Steketee, J. A.: On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Canadian Journal of Physics*, 36, pp. 192-205, 1958.
- 9) Press, F.: Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, *Journal of Geophysical Research*, 70, pp. 2395-2412, 1965.
- 10) Asano, K. and Iwata, T. : Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, 68:147, DOI 10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- 11) 地震調査研究推進本部：全国 1 次地下構造モデル (暫定版), https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki_dat/.

SEISMIC DAMAGE MECHANISM OF SEWER BURIED PIPES BY SURFACE RUPTURES IN THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Daichi HATAKEYAMA, Gaku SHOJI, Shigeru NAGATA and Masayuki YOSHIMI

In the 2016 Kumamoto earthquake, sewer buried pipes were severely damaged. Although these damages are considered due to ground motion and liquefaction, large-scale surface ruptures have been observed in the Kumamoto earthquake compared to the past crustal earthquakes. In this study, we revealed the characteristics of the affected pipes by surface ruptures from view of points of pipe types, diameter and classification of microtopography in Kumamoto City and Mashiki City in the 2016 Kumamoto earthquake. And we analyzed the relationship between the damage modes and the crossing angle for the crossing points of the buried pipes. Moreover, we computed the displacements at the surface ruptures, and clarified the relationship between calculation results and damaged pipes.