

地表断層変位に対する上・下水道管路の フラジリティ特性の解明

皆川 大雅¹・庄司 学²

¹学生会員 筑波大学 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s2020876@s.tsukuba.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 筑波大学教授 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@kz.tsukuba.ac.jp

2016年熊本地震では内陸地殻内地震特有の強震動が観測されると共に、複数の断層帯に沿って多くの地表断層変位が観測された。熊本県の上・下水道管路はこの地震で甚大な被害を受けており、この被害の要因は強震動および液状化が支配的ではあるが、多くの地域で観測された地表断層変位による作用も考慮する必要がある。本研究においては、熊本地震で被災した益城町の上水道埋設管路および熊本市・益城町の下水道埋設管路の内、観測された地表断層変位線との距離をもってデータを抽出し、水処理系管路の断層変位に対するフラジリティ特性を分析した。

Key Words : *ground surface deformation, water distribution pipeline, sewer buried pipeline, fragility*

1. はじめに

2016年4月14日、16日に発生した熊本地震によって、熊本県の上・下水道埋設管路は甚大な被害を受けた¹⁾。これらの被害は内陸地殻内地震特有の強震動やこれに伴い発生した液状化現象、地表断層変位などが組合さった複合作用が作用した結果であると考えられる。特に、地表断層変位はShirahama et al.²⁾や文部科学省³⁾による調査で複数観測されており、布田川断層帯において最大で2.2mほどの右ずれ変位量が確認されている。

この地震で観測および推定された地表断層変位の観点から、多くの研究がなされている。熊本地震で被災した益城町の上水道埋設管路に対して、鍛田・竹内⁴⁾はその管路被害と地表断層変位の横断箇所との関係を分析している。畠山ら⁵⁾は熊本市および益城町の下水道埋設管路に対して、管種や口径の管路属性や埋設されている微地形をもってデータを分類し、観測された地表断層変位量を用いて被害を統計的に分析している。奥津ら⁶⁾は益城町の通信埋設管路に対して、観測された地表断層変位からの距離および交差角を評価指標として被害分析を行っている。

また、断層変位に対する埋設管路の耐震性に関して、例えば、高田ら⁷⁾は地震断層を横断する埋設管路を3次元シェルでモデル化・解析を行い、管路の曲げ角度と管

路最大ひずみとの関係を簡易的に算出できる設計式を定めている。長谷川・清野⁸⁾は断層を横断する水道用鋼管を対象として断層横断対策工法を開発し、耐震設計法の提案を行っている。これとともに、土木学会地震工学委員会・断層変位を受ける地中管路の設計手法に関する研究小委員会では主に上水道埋設管路の断層変位に対する耐震性確保に関わる様々な観点からの研究がおこなわれている。

本研究においては熊本県益城町の上水道埋設管路と熊本市および益城町の下水道埋設管路を対象として、埋設管路被害と地表断層変位量の関連を分析した。なお、これらの被害の断層変位による作用に着目するため、文献2)により観測された地表断層変位線と交差した管路データのみを抽出した。その後、敷設管路の水平角度を基に管路に作用した地表断層変位量とその管路の管軸および管軸直角方向にベクトル変換し、各方向変位量の一定区間ごとに敷設データ、被害データおよび被害率を算出した。

2. 分析対象とする埋設管路データ

(1) 分析対象とするデータ

本研究で分析を行う埋設管路データは、上水道管路に

表-1 分析データ数

対象管路		上水道管路[件]	下水道管路[件]	
対象地域		益城町	熊本市	益城町
敷設管路	被害なし	4852	84902	5505
	被害あり	216	2276	509
交差箇所	被害なし	154	138	122
	被害あり	12	8	21
空中写真との重なり	被害あり	8	0	17

おいては益城町、下水道管路においては熊本市および益城町に敷設されているものである。これらのデータは災害査定資料に基づくものであり、継手部ならびに管体部の損壊、亀裂、たるみならびに蛇行などの被害モードが確認された管路を被害として定義している。なお、下水道管路に関しては上記の被害モードにより管路の流下機能が損なわれ滞水が生じた管路も同様に被害として定義する。以上より、本研究においては文献 2) により提示された地表断層変位の観測線と交差した埋設管路を対象として分析を行った。

(2) 上水道埋設管路

益城町における敷設管路、被害地点および地表断層変位線のデータを重ね合わせ、敷設管路が地表断層変位線と交差した箇所を同定した。その上で、この交差した箇所に対して、a) 敷設管路に沿って作成した 2m メッシュデータを用い上水道埋設管路を分割(以下、分割管路)し、b) 分割管路の両端座標に基づいて北を 0° とした敷設角度 θ を算出することで各交差点の敷設角度 θ と定義する。次に、地表断層変位により被害を受けたと考えられる被害地点に対しては、a) 被害地点と地表断層変位線の最短距離を求め、その距離が 5m 以内となる被害地点を抽出し、b) 各被害地点に最も近い分割管路の敷設角度 θ を被害地点の敷設角度 θ として定義する。ここで、被害率 R_w は被害箇所数 N_{wd} を交差点数 N_w で除したものと以下のように定義する。

$$R_w = \frac{N_{wd}}{N_w} \quad (1)$$

(3) 下水道埋設管路

熊本市および益城町における敷設管路、被害管路および地表断層変位線のデータを重ね合わせ、管路が地表断層変位線と交差した箇所を同定した。交差した敷設管路および被害管路のそれぞれ 1 スパンを分析対象とする。交差した箇所の敷設角度 θ は被害有無に関わらず、1 スパンの両端座標に基づき算定する。ある一定領域にお

る被害なしスパンの累積延長を敷設延長 L_s 、被害ありスパンの累積延長を被害延長 L_{sd} として定義し、被害率 R_s は被害延長 L_{sd} を敷設延長 L_s で除したものと以下のように定義する。

$$R_s = \frac{L_{sd}}{L_s} \quad (2)$$

3. 空中写真による被害の検証

2 章で抽出した被害地点および被害スパンに対して、皆川・庄司⁹⁾を参考とし 9 枚の空中写真を用いて地表断層変位が作用したか否かを目視により確認した。その結果、上水道については表-1 に示す 11 箇所の交差箇所から 8 箇所、下水道については益城町の 21 箇所の交差箇所から 17 箇所がそれぞれ抽出された。

上水道については、8 箇所の内 1 箇所において被害箇所直近で道路部の亀裂が見られ、他 7 箇所においては被害点付近の道路部に補修跡が確認された。したがって、全 8 箇所において道路下に埋設されている上水道管路部に対して地表断層変位による被害が生じた可能性が高いと判断した。

益城町の下水道については、17 箇所の内 11 箇所において付近に道路亀裂などの被害が見られたが、他の 6 箇所では道路上に変状は観察されなかった。この要因としては、下水道の場合は 1 スパンで滞水が生じたものも被害として定義されているため、交差点点では被害が顕在化しておらず、交差点点を含めた 1 スパン内のいずれかの地点で被害が発生していたためと推察される。本研究においては、上記のような被害スパン付近に道路亀裂などが観測されなかった場合であっても、当該スパンに地表断層変位が作用した結果、たるみ・蛇行などの被害が生じ、滞水被害が生じたものとして分析に含める。

4. 地表断層変位量の推定

布田川断層に沿った鉛直および水平方向変位、日奈久断層に沿った水平方向変位が観測されたが、これらの変位は上・下水道埋設管路の被害が集中している益城町中心部や熊本市においては観測されておらず、分析対象とする領域に作用し得た地表変位を特定するには十分ではない。したがって、上記地域に作用した地表断層変位を特定するために、食違い弾性理論に基づく Okada¹⁰⁾の計算手法を用いて地表変位の空間分布を推定する。この手法は震源断層モデルから得られるパラメータを用いて、地表地盤の静的変位量を算出するものである。熊本地震

の震源断層モデルは複数提案されており、その中から文献5)を参考に、国土地理院モデル¹⁰⁾を選定する。

(1) 地表地盤の静的変位量の算出方法

震源を点震源としてモデル化し、地盤全体を無限等方弾性体と仮定した時、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Steketee¹²⁾によって提案された次式により計算できる。なお、図-1に示す座標系および断層パラメータを設定し、図-1において、 x, y は計算する地表変位の座標、 d は点震源の深さ、 δ が断層面の傾斜角、 U_1, U_2 および U_3 は断層走行方向、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。

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (3)$$

ここで、 δ_{jk} 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_i^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) に生じる変位の i 成分である。

次に、断層すべりによる半無限弾性体の応答を考える場合、Press¹³⁾により u_i^j と F の関係が以下のように示されている。

$$\begin{cases} u_1^1 = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{R - \xi_3} - \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right\} \\ u_2^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)^2} \right\} \\ u_3^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_1^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)^2} \right\} \\ u_2^2 = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{R - \xi_3} - \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right\} \\ u_3^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_1^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_2^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_3^3 = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R^3} + \frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu R} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $R^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + \xi_3^2$ である。

また、横ずれ断層(Strike-Slip)の場合、図-1で示したすべり成分が $U_2 = 0, U_3 = 0$ となるため、式(4)では $\Delta u_j = (U_1, 0, 0)$ となる。同様に、縦ずれ断層(Dip-Slip)の場合、となる。これを式(4)に代入するとそれぞれ以下のようにできる。

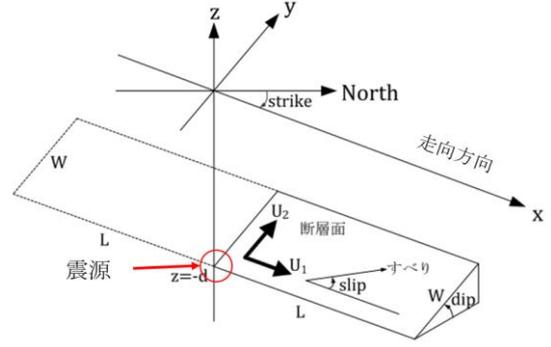


図-1 モデルとする断層(文献10)Fig.1.に加筆

横ずれ断層の場合

$$\frac{1}{F} \mu U_1 \Delta \Sigma \left[- \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta + \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right] \quad (5)$$

縦ずれ断層の場合

$$\frac{1}{F} \mu U_2 \Delta \Sigma \left[\left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\delta + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right] \quad (6)$$

点震源は $(0, 0, -d)$ に位置しているため、式(4)~(6)において $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (0, 0, -d)$ とすると地表面の変位は以下のように示すことができる。なお、次式においては座標系を (x_1, x_2, x_3) から (x, y, z) に置き換えている。

横ずれ断層の場合

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3x^2q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (7)$$

縦ずれ断層の場合

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3xpq}{R^5} - I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3ypq}{R^5} - I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{3dpq}{R^5} - I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (8)$$

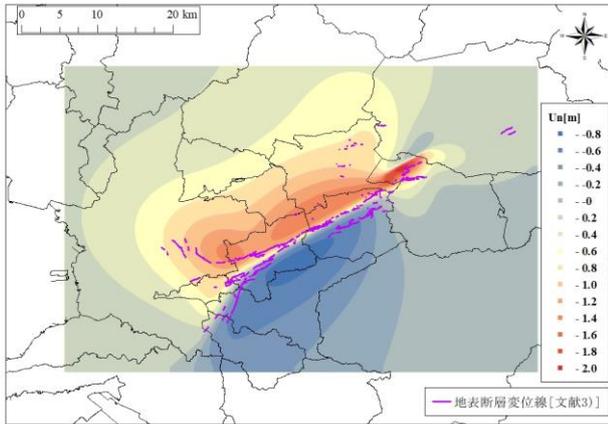
ここで上記の式における各変数は以下の通りである。

$$\begin{aligned} I_1^0 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_2^0 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_3^0 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \end{aligned} \quad (9)$$

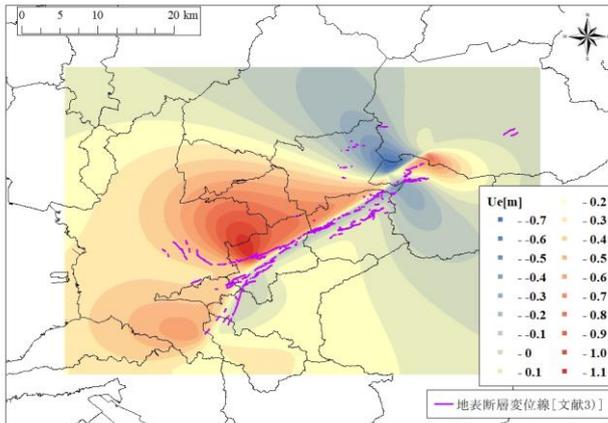
$$\begin{aligned} I_4^0 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[-xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \\ I_5^0 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \\ p &= y \cos \delta + d \sin \delta \\ q &= y \sin \delta - d \cos \delta \\ R^2 &= x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2 \end{aligned} \quad (10)$$

表-2 地表変位計算のパラメータ

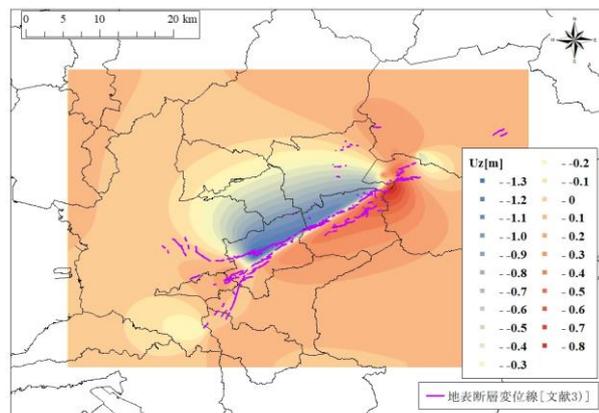
		A1	A2	B
断層の幅、長さ[km]		12.5×20.0	6.6×5.1	13.0×10.2
断層パラメータ[°]	走向	235	56	205
	傾斜	60	62	72
	すべり角	209	178	176
すべり量[m]		4.1	3.8	2.7
上端深さ[km]		0.6	0.2	0.8
P波、S波速度[km/s]	P波	5.8		
	S波	3.4		
計算格子数		1040×800		
メッシュサイズ[m]		50		



(a) U_n



(b) U_e



(c) U_z

図-2 地表変位の計算結果

以上より、断層震源モデルに国土地理院モデルと設定し、式(7)および式(8)に基づき地表変位を計算する。計算に必要なP波およびS波速度に関して、地震調査研究推進本部の地下構造モデル¹⁴⁾を参考に、気象庁が公表している熊本地震の震源位置におけるP波およびS波速度を適用した。計算を行う領域としては、管路、地表断層変位および震源モデルがすべて含まれるような東西52[km]、南北40[km]の領域とし、50[m]のメッシュに分割して計算を行った。以上のような計算条件に基づき、地表地盤の南北方向変位 U_n [m]、東西方向変位 U_e [m]および鉛直方向変位 U_z [m]の3方向の変位を算出し、これらはそれぞれ北側、東側および鉛直上向きを正としている。

(2) 国土地理院モデル

国土地理院モデル¹¹⁾は西からB, A1, A2の3つの矩形断層モデルで構成されており、それぞれの断層に対して表-2のようなパラメータが設定されている。表-2において、上端深さまでは文献11)を、それ以外の項目は文献5)を参考とした。このモデルはGEONETおよび干渉SAR解析手法によって観測された地表変位に基づき構築されたモデルである。

(3) 計算結果

数値計算により算出された南北、東西および鉛直方向の地表変位量の空間分布を図-2に示す。次章において、得られた地表変位量を基に、上・下水道埋設管路の地表変位に対する脆弱性特性について分析する。

5. 地表変位量に対する埋設管路の被害傾向

管路敷設の空間分布と地表変位量の空間分布を重ね合わせ、管路に作用したと考えられる地表変位量を特定する。具体的には、地表変位が管路の中心位置に作用したと仮定し、その中心位置に最も近い距離の変位量データを採用する。以上で得られた地表変位量の空間分布データに対して、埋設管路の被害メカニズムをより説明し得ると考え、南北方向変位量 U_n と東西方向変位量 U_e を管軸方向変位量 U_l と管軸直角方向変位量 U_t に変換する。変換に際しては図-3に示す分析対象とする埋設管路の敷設角度 θ を用いて、以下の式を適用する。

$$\begin{aligned} U_l &= U_n \cos \theta + U_e \sin \theta \\ U_t &= U_n \sin \theta - U_e \cos \theta \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、管軸方向および管軸直角方向は図-3で示した方向を正とする。以上より、式(1)、式(2)で定義した被害率 R_w および被害率 R_s を式(11)で得られる U_l および U_t の絶対量に対して0.2m刻みで算出する。なお、変位量が

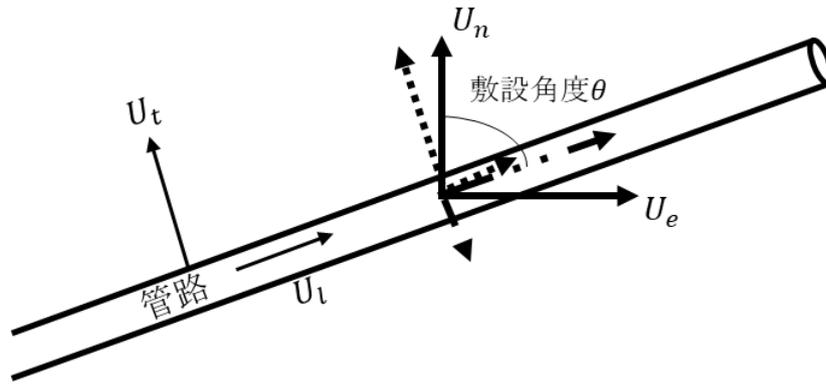


図-3 管軸座標系の定義

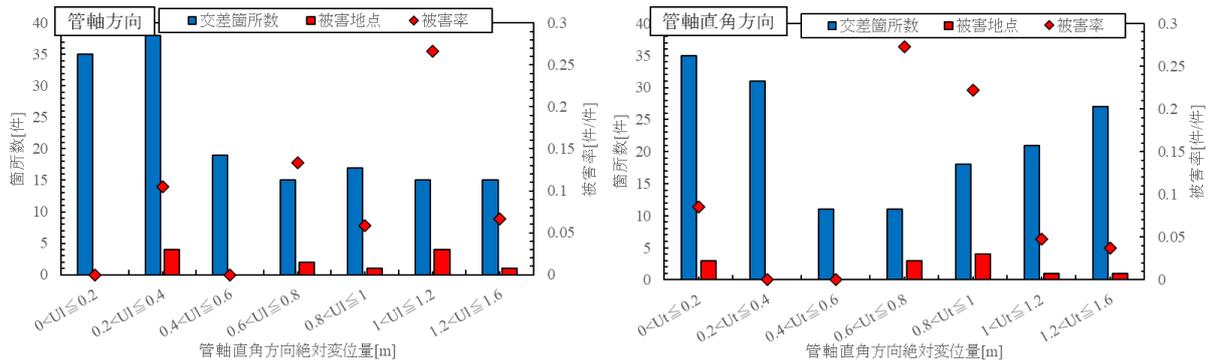


図-4 地表変位量に対する下水道管路被害傾向

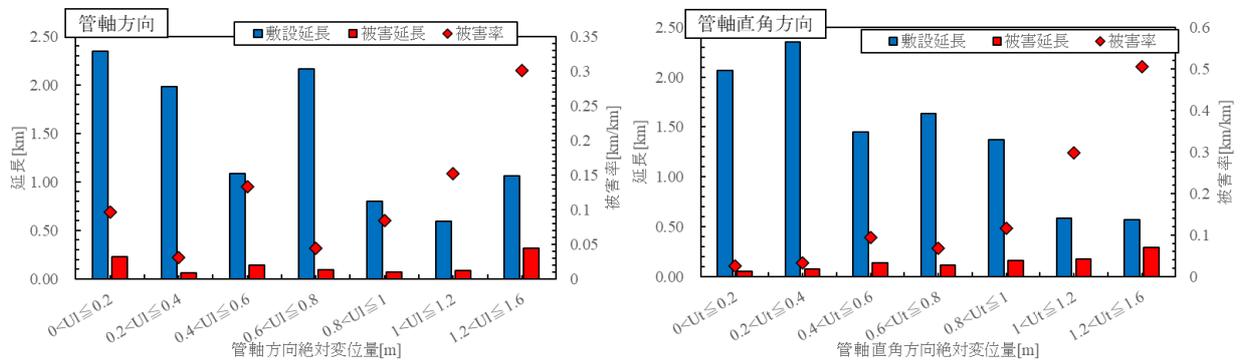


図-5 地表変位量に対する下水道管路被害傾向

1.2m以上の区間に関しては、他区間と比較してデータ数が少なくなってしまうため、0.4m区切りとして設定した。

(1) 下水道埋設管路

地表変位量の絶対値に対する交差点数 N_w 、被害箇所数 N_{wd} および被害率 R_w を図-4に示す。 U_t に対する被害率 R_w は、 $0.2[m] < U_t \leq 0.4[m]$ で $0.11[件/件]$ 、 $0.6[m] < U_t \leq 0.8[m]$ で $0.13[件/件]$ の高い値を示し、 $1.0[m] < U_t \leq 1.2[m]$ で $0.27[件/件]$ と極めて高い値を示した。一方、 $0.8[m] < U_t \leq 1.0[m]$ で $0.059[件/件]$ 、最大の変位量区間 $1.2[m] < U_t \leq 1.6[m]$ で $0.067[件/件]$ と相対的に低い値となり、ばらつきの大きい傾向を示した。 U_t に対する被害

率 R_w は、 $0.6[m] < U_t \leq 0.8[m]$ で $0.27[件/件]$ 、 $0.8[m] < U_t \leq 1.0[m]$ で $0.22[件/件]$ と極めて高い値を示し、最小の変位量区間 $0[m] < U_t \leq 0.2[m]$ においても $0.086[件/件]$ の相対的に高い値となった。また、 $0.2[m] < U_t \leq 0.6[m]$ で被害がなく、 $1.0[m] < U_t \leq 1.2[m]$ と $1.2[m] < U_t \leq 1.6[m]$ の大きい変位量で $0.050[件/件]$ 付近の相対的に低い被害率 R_w を示した。これより、下水道管路においては $0.60[m]$ 以上の U_t および U_n において地表断層変位による被害が顕在化する可能性が高い。

(2) 下水道埋設管路

地表変位量の絶対値に対する敷設延長 L_s 、被害延長 L_{sd} 、被害率 R_s を図-5に示す。 U_t に対する被害率 R_s は、

0.8[m] < $U_l \leq 1.0$ [m]で 0.084[km/km], 1.0[m] < $U_l \leq 1.2$ [m]で 0.15[km/km], 1.2[m] < $U_l \leq 1.6$ [m]で 0.30[km/km]と変位量の上昇とともに高くなる。また, 0[m] < $U_l \leq 0.2$ [m]で 0.097[km/km], 0.6[m] < $U_l \leq 0.8$ [m]で 0.13[km/km]の高い値を示している。 U_l と同様に, U_t に対する被害率 R_s は, 0.8[m] < $U_t \leq 1.0$ [m]で 0.12[km/km], 1.0[m] < $U_t \leq 1.2$ [m]で 0.30[km/km]と極めて高い値になり, 変位量の増加とともに鮮明に上昇した。最終的に R_s は 1.2[m] < $U_t \leq 1.6$ [m]で 0.51[km/km]の値をとり, 交差スパンの半数以上が被災したことを示した。以上のように, 下水道埋設管路においては0.6[m]以上の U_l および U_t によって被害が顕在化し, 最大変位量区間ではそれぞれ0.30[km/km]と0.51[km/km]の極めて高い被害率を示す。

6. 結論

本研究では, 熊本地震で被災した上・下水道埋設管路の内, 被害要因として地表断層変位による作用が強く影響したと考えられる管路を抽出し, 管軸および管軸直角方向変位量に対する被害傾向を分析した。以下に, 本研究で得られた知見を示す。

上水道埋設管路ならびに下水道埋設管路の被害に関して, 地表断層変位線と交差した埋設管路は管軸ならびに管軸直角方向変位量が0.6[m]を超えると, 被害が顕在化する可能性が高い。具体的には, 上記変位量区間において, 上水道埋設管路の被害率はその値の高低にバラツキはあるものの, 地表断層線と交差した管路の少なくとも5%が被災する可能性を示し, 下水道埋設管路は最終的に, 1.2mを超える管軸方向変位量によって3割が, 1.2mを超える管軸直角方向変位量によって5割が被災するという極めて甚大な被害可能性を示した。

謝辞: 熊本市及び熊本県益城町の上水道ならびに下水道埋設管路データは, 熊本市上下水道局, 熊本県土木部土木技術管理課からご提供賜りました。防災科学技術研究所の永田茂氏からはデータ収集に対して貴重な御助力を頂きました。産業技術総合研究所の吉見雅行氏には熊本地震における地表断層変位データを提供を頂きました。土木学会地震工学委員会・断層変位を受ける地中管路の設計手法に関する研究小委員会(委員長: 清野純史・京都大学教授)の皆様方にはデータ分析の切り口やOkadaの式の適用方法などに関して貴重な御助言を多々賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

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>, (2021年2月14日閲覧)

- 2) 文部科学省: 平成28年度熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成28年度成果調査報告書, 3.1章, https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/kumamoto_sogochousa/h28/h28kumamoto_sogochousa_3_1.pdf (2021年2月14日閲覧)
- 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) 鉏田泰子, 竹内一郎: 熊本地震における益城町の水道管路被害とその要因に関する分析, 第8回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp.126-131, 2017.
- 5) 畠山大治, 庄司学, 永田茂, 吉見雅行: 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, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.76, No.4(地震工学論文集第39巻), pp.I_441-I_453, 2020.
- 6) 奥津大, 伊藤陽, 庄司学, 鈴木崇伸: 熊本地震における益城での通信管路の被災分析, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, CS12-30, 2019.
- 7) 高田至郎, Hassani, N., 福田克己: 断層を横断する知友管路の設計法の提案, 土木学会論文, No.668, I-54, pp.187-194, 2001.
- 8) 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巻), I_659-I_665, 2015.
- 9) 皆川大雅, 庄司学: 断層変位に対する上・下水道埋設管路網のフラジリティ特性の体系的分析, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 2021.
- 10) 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.
- 11) Kobayashi, T., Yurai, H., Kawamoto, S., Morishita, Y., Fujiwara, S. and Hiyama, Y.: Crustal deformation and fault models of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: foreshocks and main shocks. In: Freymueller J., Sanchez L. (eds), *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World, International Association of Geodesy Symposia*, Vol.149. Springer, Cham, DOI 10.1007/1345_2018_37, 2018.
- 12) Steketee, J. A.: On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Canadian Journal of Physics*, 36, pp. 192-205, 1958.
- 13) Press, F.: Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, *Journal of Geophysical Research*, 70pp. 2395- 2412, 1965.
- 14) 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/.

FRAGILITY CHARACTERISTIC OF BURIED WATER DISTRIBUTION AND SEWER PIPELINE NETWORK WITH RESPECT TO SURFACE FAULT DISPLACEMENT

Taiga MINAKAWA and Gaku SHOJI

In the 2016 Kumamoto earthquake, strong seismic motions characteristic of inland crustal earthquakes and many cracks were generated on the ground surface along several fault zones. The water supply and sewer pipelines in Kumamoto were severely damaged by the earthquake, and although strong ground motions and liquefaction were the dominant causes of this damage, it is necessary to consider the effects of surface fault displacement observed in many areas. In this study, we extracted data from buried water supply pipelines in Mashiki and sewer pipelines in Kumamoto and Mashiki that were damaged by the Kumamoto earthquake, and analyzed the fragility characteristics of water treatment pipelines in relation to the surface fault displacement.