

益城町下水道施設被害と断層地盤陥没を受ける地中管路の挙動分析

Damage of Sewer System in Mashiki Town and Performance of Buried Sewer Pipelines Under Depressed Subsidence by Fault Movement

高田 至 郎
Shiro Takada

1. はじめに

2016 熊本地震では布田川断層震源近傍の地表断層亀裂を横断する地中管路に、従来にはない破壊モードでの管路破壊が見られた。本稿では、益城下水道センターでのヒヤリング実施、さらに、管路被害地点での断層運動による地盤変状調査および表面波探査による地盤 S 波速度推定を実施するとともに、断層運動による管路破壊事例を取り上げて、とくに、断層地盤陥没による破壊モードのメカニズムを解明する目的で簡易な室内実験を実施した。また、それらの管路破壊に対する地震対策について言及するとともに、今後の課題を示した。

2. 益城町と地盤特性



図-1 益城町の地域区分と道路網^{1),2)}



図-2 益城町の地盤特性^{1),2)}

図-1、図-2には益城町の、広安・木山・津森・福田・飯野の5地域区分(校区)および地盤特性・断層を示した^{1),2)}。広安の木山・宮園・安永地域付近は町役場があり、市街地で人口が集中している区域である。その地域の南部は低地で沖積地盤が大半であり、北部は木山・津森区域とともに台地・丘陵地帯で、北部の熊本空港に向かって標高が高くなっている。また、福田・飯野校区の南部は山地・丘陵地帯である。丘陵地に挟まれた上陣・下陣・平田・赤井地域は、低地となっており、布田川断層運動による地表断層亀裂が数多く見られた地域である(図-3)。

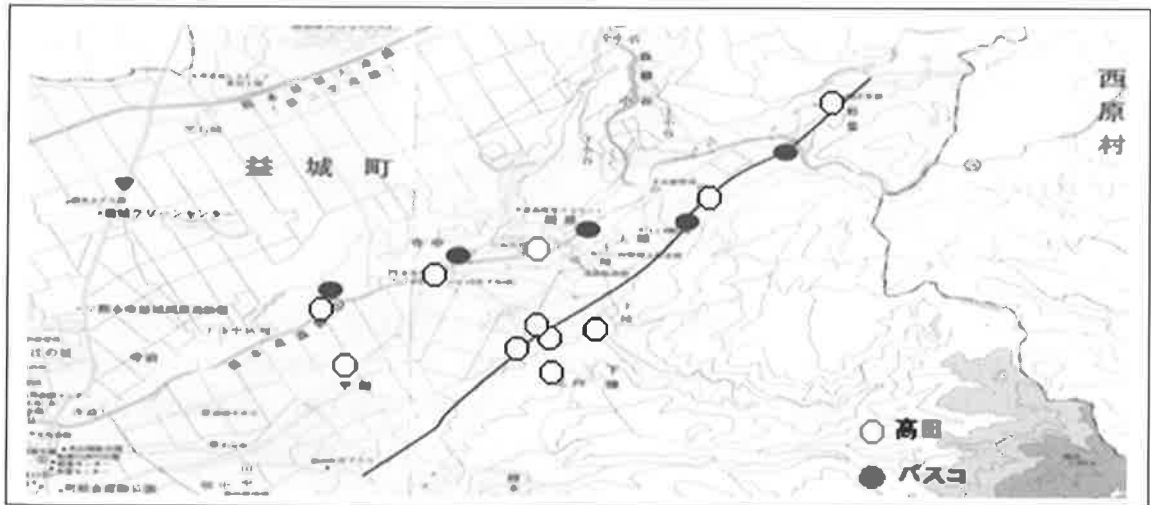


図-3 上陣・下陣・平田・赤井地域の布田川断層地表亀裂の調査位置^{1),3)}

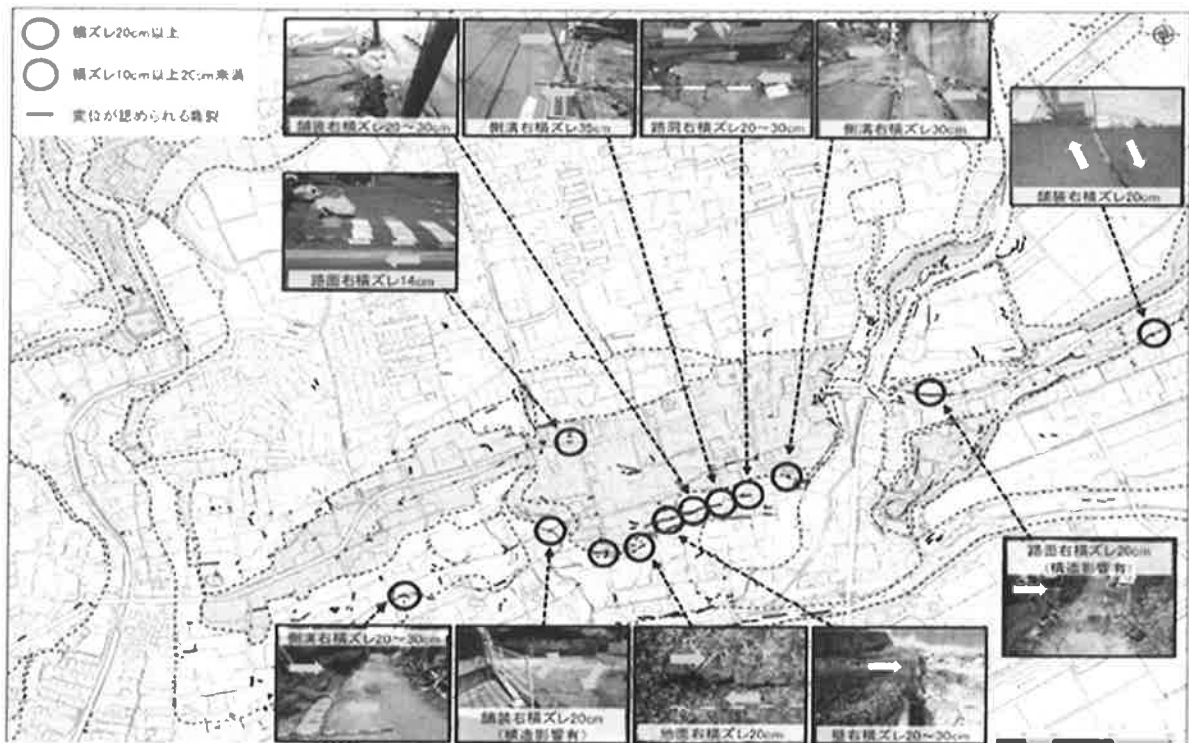


図-4 益城町市街地における木山断層に関わる地表亀裂位置⁴⁾

また、益城市街地には活断層が記述されていない（都市圏活断層図『熊本』（2001：国土地理院）。しかし、「日本の活断層（1980）：活断層研究会」および「九州の活構造（1989：九活構造研究会）には木山断層として表示されている。図-4 に示す地表亀裂は木山断層の存在を示唆している。市街地の南部には、秋津川および西部には鉄砂川があり、低地部を構成している。秋津川周辺では液状化による噴砂が数多く確認されており、断層活動地域と液状化発生地域は近傍に位置していることが知られる。

3. 益城町下水道施設の被害概要

益城下水道施設の被害額は表-1 に示す通りである。とくに処理場における被害は甚大であった(936 百万円)。また、震度7の強震動が2度発生したために、2度目に被害がさらに拡大された。図-5 は2度目の震度7で、道路亀裂やマンホール浮上が増大した様子を示している。

表-1 益城町下水道施設被害額⁵⁾

益城町	処理場	936	(処理場)4/22 1系の一部復旧により、被災前の1/2の能力復帰。 4/30 復旧により処理能力アップ(7500m3)
	管渠	2,583	総延長166.6km 2次調査実施 4/29～ 5/26 36.7km 被災延長 22.4km

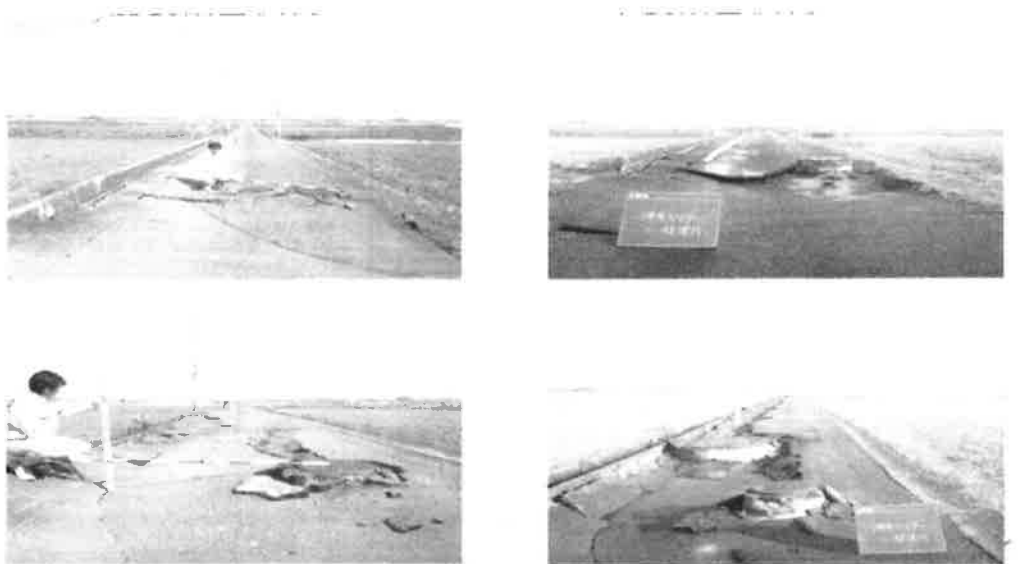


図-5 2度目の震度7で増大された下水管渠埋設道路の被害⁶⁾

3. 1 処理場⁶⁾

益城浄化センターでは地震によって、浄化施設の建屋が傾斜して、反応タンク、汚泥処理施設、消化タン室などが傾斜・水没して、エアレーションタンク漏水、フライト板破損、搔寄せ機チェーン脱輪などにより、浄化センター器機が全て使用不可能となった。移動脱水機などの導入により緊急対応が実施された。建屋の傾斜は図-6 に示すように建屋周辺の液状化によって、建屋支持杭が座屈して傾斜したものである。



図-6 浄化センター建物杭の液状化破壊

最大沈下量は0.135mで、傾斜は東方向1/176、北方向1/107であった。腐食土層を切削した後、高圧噴射攪拌工で、地上からセメント改造体を築造している。築造工は既設杭Φ700mmの周辺に、地上からΦ5000mm x 14mの杭を9本設置して、傾斜を修繕して器機類の修繕を実施した。

3. 2 公共下水道⁶⁾

公共下水道が使用されているのは、木山・堂園などの市街地区域のみで、山地・段丘・低地は大半が浄化槽である。また、下水管下水渠の多くは、PVC(硬質塩化ビニル管)、PRP(リップ付き硬質塩化ビニル管)である。下水管渠の損傷モードの分類は図-7、図-8のように行われている。従来の地震時の下水道管渠被害と同様な被害モードであり、地震動、地盤変状被害と同様である。


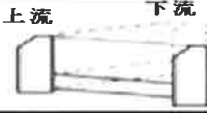
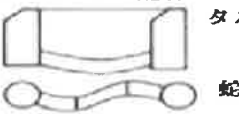
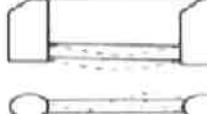


被災状況	復旧工法	
A 逆勾配 	開削による新設管 スパン単位で実施 管材は新材 必要に応じてマンホールの新設替	上流 下流 
B タルミ・蛇行 	開削による新設替 タルミ・蛇行か所のみ実施 新材使用	
C クラック (HP) 	管更生 円周および管軸方向の 箇所を実施(部分更生)	

図-7 下水道管渠の損傷モード (その1)







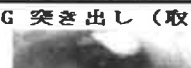

D 変形・扁平・破損 (VU) 	開削による敷設替 変形などの箇所の実施 管材は新材を使用	
E 継手のずれ・破損 	開削による敷設替 部分布設替 被害の度合いが 大きい場合はスパン単位	
F 継手の亀裂(クラック) 	管更生 破損などの箇所のみ実施 破損などの度合いが大き い場合はパン単位で実施	
G 突き出し (取付管) 	管突出の前処理(撤去) +取付管部更生、または布設替 本管：HPの場合 取付管の突出部分を穿孔機で撤去 取付管口一体型の部分更生を実施 本管：塩ビ管の場合 部分布設替を実施	

図-8 下水道管渠の損傷モード (その2)

3. 3 農業用排水管渠⁷⁾

農業用下水道では布田川断層・日奈久断層運動にともなう地表断層亀裂が発生した低地に、管渠の多くが敷設されており、地盤変状による被害が著しい。図-9、図-10には農業用水管渠が大きな破損が発生した位置での地盤変状を示している。

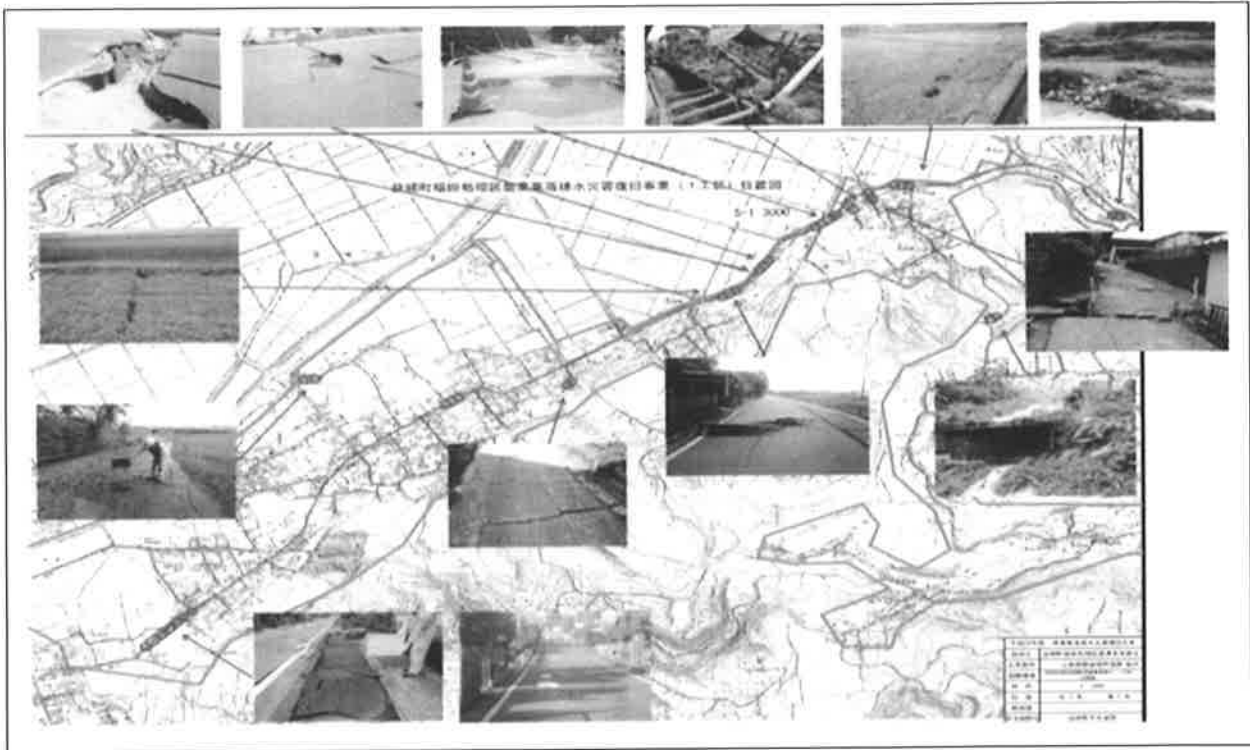


図-9 第一工区における農業用下水道の被害位置と被害写真⁷⁾

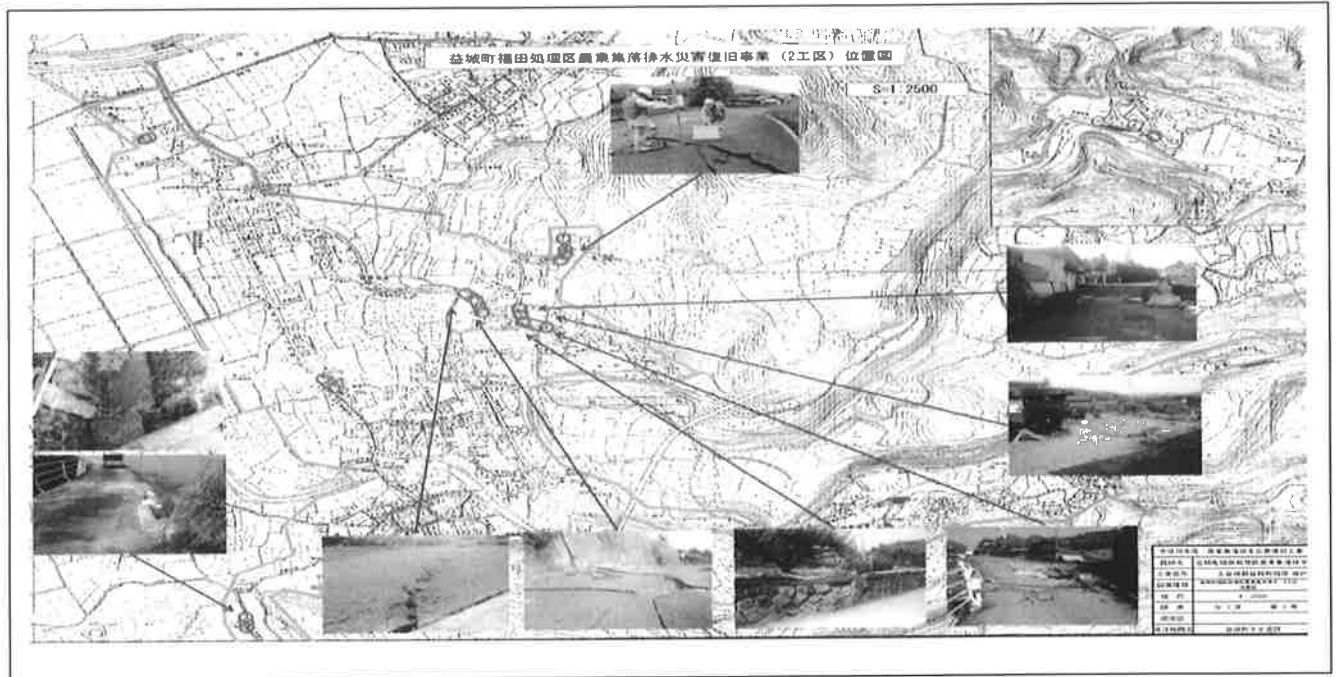


図-10 第二工区における農業用下水道の被害位置と被害写真⁷⁾

下陣、上陣、堂園付近の布田川断層は、基本的に水平右横ずれ断層による亀裂であるが、付近の地形によっては左横ずれ、正断層・逆断層タイプの変状も存在している。図-11には、管渠埋設道路面での変状パターンを示している。

多くの場所で地盤陥没が見られた。阿蘇山の形成はカルデラ陥没によるものであり、地表面付近には火山灰の堆積による軟弱な層が多く、陥没タイプの変状が数多いと考えられる。また、崖地、谷地形などの微地形および家屋・建造物の存在によって、地下断層運動が様々な変状となって、表層地中管路の挙動と道路面に現れる。圧縮型、引張型変状が近傍で発生しているのが実態である。

4. 地盤陥没による管渠被害

4. 1 被害

図-12、図-13は谷川（たにごう）における断層と、横断下水管渠の被害である。地盤陥没は約60cmである。数mの延長で陥没が続いており、沈下側の瓦葺家屋は見かけ上は大きな被害もない。下水管渠は公道から家屋内に引き込まれた管渠沈下境界面で扁平しており、沈下側の継手のRR継手は引き抜けている。図-12に見るように、沈下境界は数十cmの幅を持って変状している。



図-12 谷川天然記念物断層



図-13 谷川断層におけるUV下水渠の陥没被害

4. 2 地盤沈下陥没管路挙動実験

断層地盤陥没をうける地中管路の基本的挙動を把握するために、室内実験を実施した。図-14に示すような簡単な沈下土層装置を作成してモデル実験を行った。モデル地盤には紙粘土を使用している。その地盤中に管材料および継手位置の異なるモデル管路を埋設して、断層運動に相当する地盤沈下を与えた。本実験は、管路の剛性・形状・継手、地盤の材料特性、埋設条件、断層変位など相似則を考慮せず断層変位と埋設管路の基本挙動を見たものである。何らかの条件が満たされたときに、実際の被害モードを再現できるか否かを調べるのが目的である。

実験では最初に管が沈下境界を横断する場合に、モデル連続管路（継手の無い場合）の材料（軟ラバー、軟鋼線）の異なる実験を行った。



図-11 農業用水管渠埋設位置での地表断層変状パターン

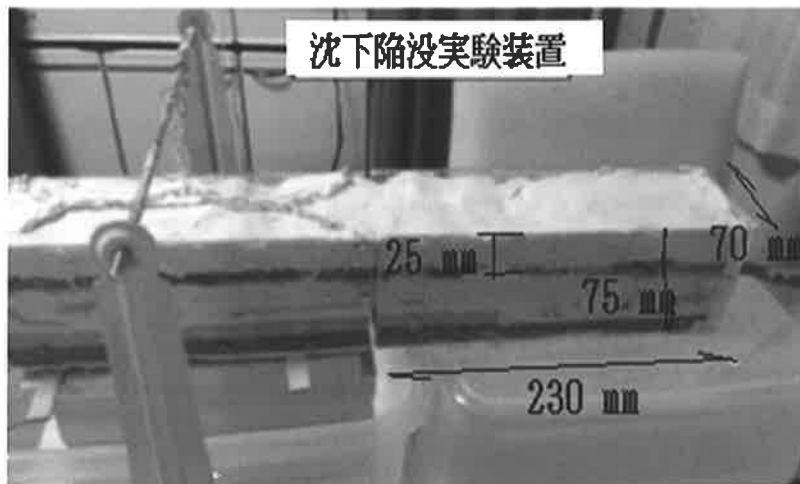


図-14 地盤陥没管路挙動把握装置

PE管のように地盤の変形に追随しやすい管路はラバー材料を用いて管路モデル①を作成し、逆に剛性の高い鋼管路はラバーチューブに針金を挿入して、土圧や摩擦力が管路に伝達しやすい管路モデル②を作成した。図-15は、沈下量6cmを与えた場合の①管路の挙動、図-16は、①および②管路モデルの、実験後に掘り出した管路の永久変位形状である。①は埋設以前の管路形状に復元し、②は陥没形状に対応した残存変位がみられる。

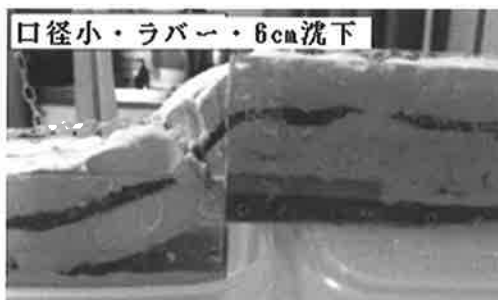


図-15 モデル①の挙動



図-16 モデル①およびモデル②の残存変位

次に、管の円周方向の扁平を受けやすい口径の大きいラバー管路モデル③を用いて、地盤陥没実験を実施した。沈下境界前後に接着型継手を配置した。12cm沈下時挙動を図-17に、終了後の掘削を図-18に示した。



図-17 モデル③の管路扁平挙動



図-18 掘削後のモデル③の変形

図-17 に示すように管の扁平が沈下側の手前（非沈下側）で発生しており、沈下側では、ある領域を持って管が沈下土を支持し、管路下部に空洞が生じている。すなわち、陥没土は管を非沈下側に押し込み、管路には鉛直土圧、管の変形に対応した押し込み力、摩擦力が作用していることが推定される。そして、陥没側の継手には引っ張り力、非陥没側の継手には圧縮力が作用している。図-18 に見るように、陥没側の接着継手は引っ張り力に寄って剥離し、非陥没側では、圧縮力により継手の剥離はない。陥没側管路と非陥没側の管路では作用力が異なることが推定される。

次に、ダクタイル鋳鉄管路のように、伸縮継手により地盤の変形に追随する管路モデル④に対して、継手の位置を変更した2モデルについて、陥没実験を実施した。④-1 は陥没境界位置に継手がない場合、④-2 は、陥没境界位置に継手を配置したモデルである。図-19～図-22 に実験結果を示した。



図-19 モデル④-1 地盤陥没管路挙動

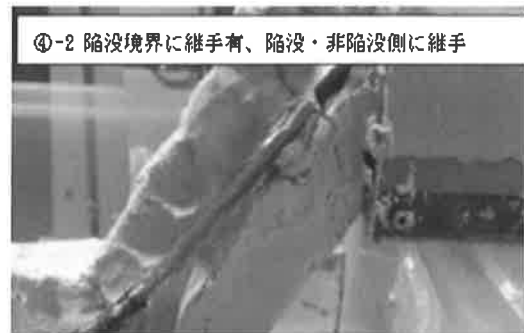


図-20 モデル④-2 地盤陥没管路挙動



図-21 モデル④-1 掘削後変形



図-22 モデル④-2 掘削後変形

④-1 のケースについて、図-19 は陥没側の継手が引き抜けている状態で、非陥没側の継手は圧縮を受けて引き抜けない。非陥没側では摩擦力が作用していることによる。同一のケースの実験後に掘削した管路の場渠は、図-21 に示している。陥没境界位置に継手がないので管体の残存変形が認められる。一方、モデル④-2 の陥没境界に継手のある場合には、管体に作用する力が継手の回転・伸縮によって吸収されて、管は容易に地盤変形に追随して、掘削後には、図-22 に示すように、変形が元形に回復する。モデル①と同様である。モデルに用いた継手は、長さ3cmのゴムチューブに両端から1cmずつ針金を挿入して、1cmの伸縮余裕、数度の回転余裕を持たせたものである。ダクタイル継手管のように、実験継手はチェーン効果を発揮している。

5. 個別要素法による実験結果の検証

実験の結果を検証するために、個別要素法を用いて、陥没地盤管路の挙動を解析した。個別要素法 (DEM) は、媒質を小要素あるいは粒体の集合体として取り扱うシミュレーション手法であり、不連続面で区切られた要素の集合体において個々の要素ごとに独立した2階常微分方程式を立て、これを差分近似して時間領域においてステップ・バ

イ・ステップで前震的に解くことにより要素の挙動を追跡し、素の集合体としての動的挙動を解析しようとするものである⁹⁾。ある時間要素の間に作用する力は要素の接触点を通じて伝達され、作用・反作用の法則に従うと見なしている。運動方程式は次式で示される。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i + a\dot{x}_i &= F_i/m_i + g \\ \ddot{\omega}_i + a\dot{\omega}_i &= M_i/I_i \end{aligned} \tag{1}$$

ここに x_i : 要素の座標, a : 減衰定数, F_i : 要素に働く合力, m_i : 要素 i の質量, g : 重力加速度
 ω_i : 要素の回転変位, M_i : 要素に働く合モーメント, I_i : 要素 i の慣性モーメント

解析モデルに用いた管路の材料特性は表-2 に、管路の継手特性は図-23 に示す¹⁰⁾。

表-2 解析管路モデルの物理定数

口径(mm)	φ 100
外径(mm)	114
肉厚(mm)	7.1
弾性係数(N/mm ²)	2942
ポアソン比	0.38
引張強度(N/mm ²)	49
管体曲げ強度(N/mm ²)	53.9
離脱阻止力(kN)	35.1
断面2次モーメント(cm ⁴)	338
断面積(cm ²)	23.5
部材長(cm)	500

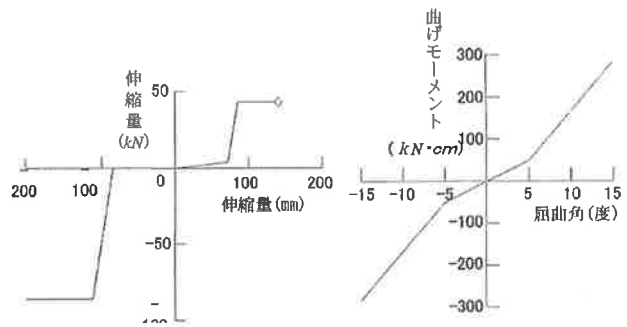


図-23 解析管路モデルの継手特性 (DCIP)

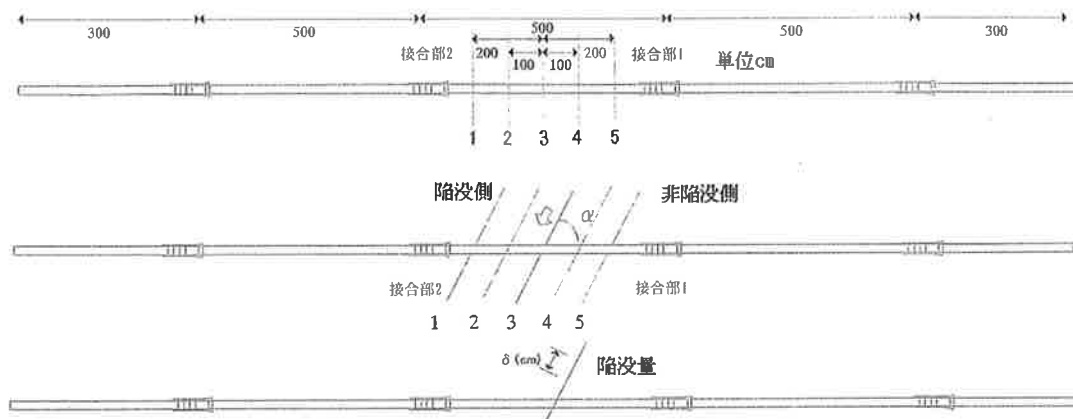


図-24 解析対象管路モデルと地盤陥没位置・方向

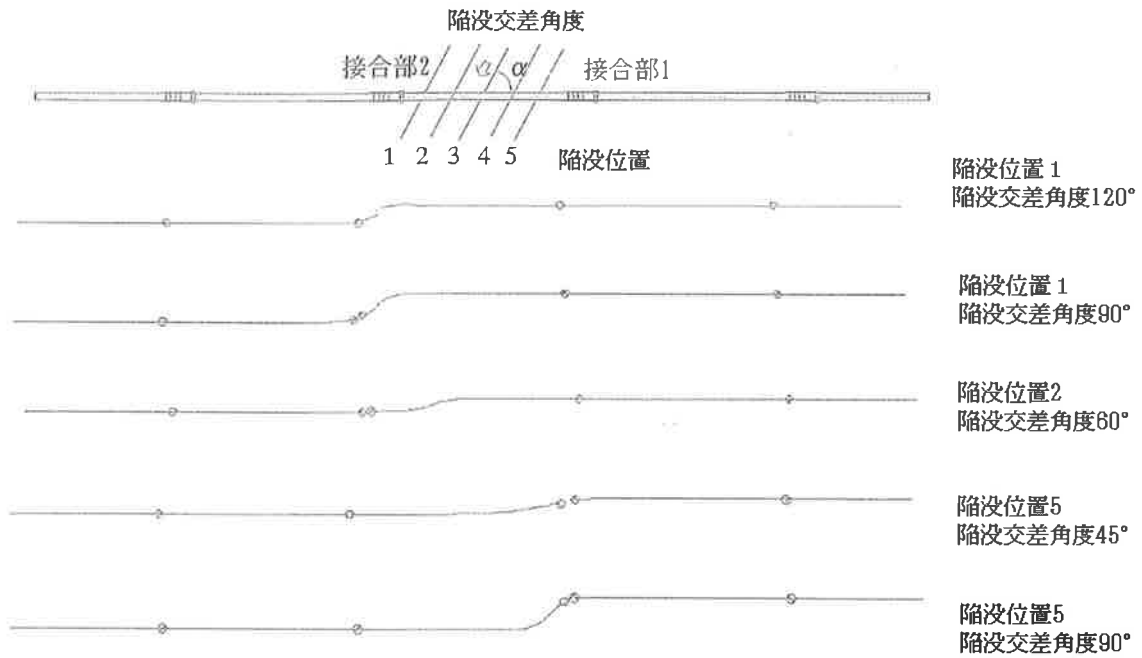


図-25 断層位置・陥没角度と管体・接合継手挙動

図-24 のモデルによる計算結果である図-25 に見るように、陥没位置が継手接合部より 2.5m の位置にあり、60 度方向に陥没が生じる場合には、陥没側継手は引き抜け破損を生じるが、非陥没側には引き抜けは生じない。陥没側には土圧作用により管路伸びが生じるが、非陥没側では管路周面摩擦力により接合部継手には押し力が作用し、引き抜けはない。実験におけるモデル④-1 と同様である。また、陥没位置 5 で、接合部継手の近傍で陥没が生じる場合には（図-25 の最下部）、継手の回転角度が大きくなるが伸縮余裕があれば引き抜けることはない。

6. 地盤陥没に対する管路挙動と地震対策

地震時における断層運動ともなう地盤陥没については、現行の下水道施設の耐震対策指針解説¹¹⁾では耐震計算法の規定はない¹¹⁾。同様な地盤変状の地盤沈下について、図-26 に示すモデルに対して、管路変形の幾何形状から算出して、沈下量に対して屈曲角度を確保することを提唱している。また、ダクトイル管については、地盤の変位吸収性能、継手の離脱防止力が摩擦力の合力以上となることを規定している。継手屈曲角度と変位吸収能力・離脱防止力の関係についての規定はない。

沈下変位量と継手屈曲角度の関連は下式で与えられる。

$$\alpha_x = l(\tan \theta + \tan 2\theta + \tan 3\theta + \dots + \tan 3\theta + \tan 2\theta + \tan \theta) \quad (2)$$

l : 管 1 本分の長さ (m)
 θ : 継手 1 個当たりの最大屈曲角度 (°)

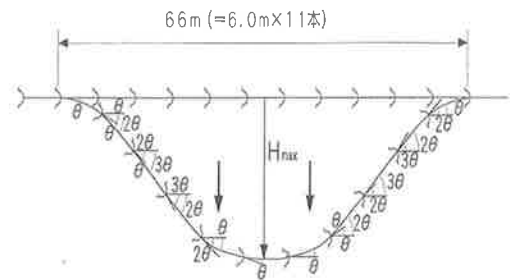


図-26 地盤沈下に対する管路屈曲角度

沈下陥没にともなう管路扁平に対する安全性照査については、設計式を確立するには至っていない。図-27にはシェルFEM解析による地盤陥没を受ける管路の扁平状況を示している¹²⁾。Dは口径、tは管厚である。D/t値が大きい場合には管周扁平が生じやすいことを示している。また、地盤陥没境界周辺に管路変形は集中している。



図-27 口径/管厚比と管路扁平

地震対策として、今後、下記の課題について検討する必要がある。

- ① 断層運動によって、地表断層陥没が生じる可能性のある地点・陥没量・方向を確率的に推定する。
- ② 管体・継手種別ごとに、管体扁平・継手伸縮など、発生する変形、断面力の発生量、管路位置を確率的に推定する。
- ③ 水道・下水道管路の要求性能（漏水、管体破損、補修、布設替え）と断層陥没現象を管路耐震設計に取り込む必要性と経済性を検討する。

参 考 文 献

- 1) 高田至郎：断層地表変位による熊本・益城町の水道管路破壊に関する分析，建設工学研究所論文報告集第59号〔報告〕，2017年11月
- 2) 永木 藍・荒木 昭次郎・鈴木 康夫：熊本都市圏の拡大による益城町の宅地化プロセス—地形図による土地利用変遷の判読を中心として—，東海大学総合経営学部紀要，平成21年
- 3) PASC0：平成28年（2016年）熊本地震地表地震断層現地調査、平成28年4月20日
- 4) 地質調査総合センター：益城町市街地で発生した地震現象とその分析3. 1, <https://www1.mlit.go.jp/8088/common/001156879.pdf>、2018. 12
- 5) 熊本県・益城町：平成28年度熊本地震、震度7 x 2の衝撃、平成29年5月
- 6) 益城町・下水道課：下水道（処理場）被災状況および復旧状況、平成29年11月
- 7) 益城町・下水道課：農業集落排水事業（農災）状況、平成29年11月
- 8) 益城町・下水道課：公共下水道被災状況および復旧状況、平成28年11月
- 9) 高田至郎：ライフライン地震工学、共立出版第2版、1997
- 10) 高田至郎・ラダンイワノフ・森田典和：DEMによる地中継手管路の大変形解析、建設工学研究所論文報告集、No. 45, 2003
- 11) (公社) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説、2014
- 12) 梁政張 他：Mechanics of Oil and Pipelines Under Geological Hazards, 科学出版社・北京、2016

著 者

高田至郎 所員，工学博士，地震工学