

【建設工学研究所論文報告集第 59 号〔報告〕2017 年 11 月】

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

Analysis of Water Pipelines Crossing Surface Fault Raptures in Kumamoto Mashiki Town

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水道管路に、従来にはない破壊モードでの管路被害が見られた。本稿では、益城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、管路破壊事例を取り上げて、その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、それらの破壊が現行の管路耐震設計手法で説明することが困難であり、継手を有する断層横断管路の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. 過去の断層運動による地中管路被害と耐震研究

断層横断管路の地震被害は過去に数多く報告されている。とくに米国西岸にはサンアンドレアス断層に起因する大地震災害が多く、断層横断管路の地震被害事例も多い。図-2.1 には被事例を示した。図-2.1(a)～図-2.1(f)は台湾集集地震(1999 年)、中国唐山地震(1976 年)、兵庫県南部地震(1995 年)における断層横断管路の被害を示している^{1),2)}。



(a) 水道溶接鋼管座屈



(b) ガス PE 管座屈



(c) ガス PE 管引張り切断

図-2.1 断層運動による地中管路被害 (その1)



(d) 水道 DCIP と PVC の継手部破損



(e) 水道 CIP 継手破断



(f) 水道鋼管座屈

図-2.1 断層運動による地中管路被害 (その2)

断層を横断するパイプラインの耐震研究について、Bonilla ら³⁾は地震マグニチュードと断層延長および断層地表変位の関係を様々なタイプの断層運動について求め、管路の断層設計の基礎となっている。Newmark⁴⁾、Kennedy⁵⁾に始まって、Ariman⁶⁾、Wang⁷⁾、O' Rourke⁸⁾、Takada²⁾らによって進展し、最近の国内研究では、清野⁹⁾金子ら¹⁰⁾、が綿密な実験・解析・耐断層用パイプライン開発などを行っている。

3. 2016年熊本地震による益城町地震被害概要

3.1 地震と被害概要

図-3.1には益城町の地名と主な道路の概要を示した。江戸・明治初期以降に村落合併の歴史を繰り返し、現在地名は、旧村落名を用いて北益城郡○○(村落名)○○番地となっている¹¹⁾。現在の益城町名は明治22年4月1日に誕生している。校区は、広安・飯野・木山・津森・福田である。また、図-3.2には、地盤と断層位置の概略を示している¹¹⁾。広安・木山の北部は市街地で、町の人口の大部分の住家がある。一方、福原地域は大半が山岳地帯で段丘地帯に若干の住家、津森地域は低地部に住家・田畑が広がっている。



図-3.1 益城町地名と道路網概要

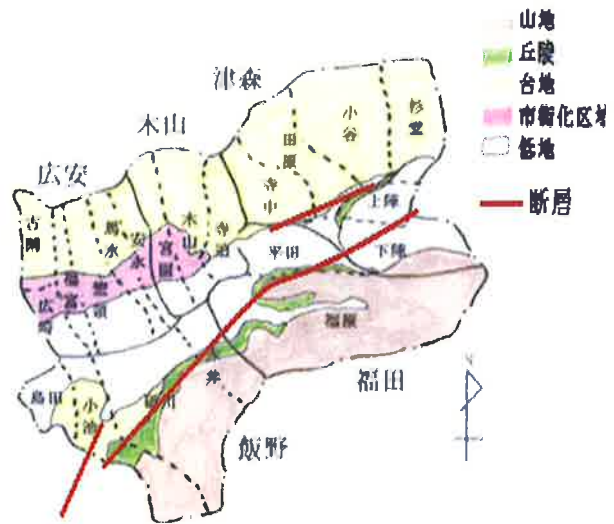


図-3.2 益城町地盤特性と断層概略位置

益城町では4月14日(木)21:26(M=6.5、深さ11Km)と4月16日(土)01:25(M=7.3、深さ12Km)に震度7の

揺れを観測している(いずれも益城町宮園・役場地震計)。図-3.3には断層概略位置、2回の震源位置を示し、図-3.4には家屋被害の発生位置分布を示している¹²⁾。家屋被害は明らかに、布田川断層および南西の日奈久断層に沿う丘陵地域に集中している。広安・木山の市街化地域での家屋被害が激しいが、従来、既存断層は認識されていない。しかし、地震後の調査によって潜在断層の存在が指摘されている。家屋倒壊状況と従来の断層位置から判断して、潜在断層の存在可能性は高い。



図-3.3 熊本地震震源位置と断層

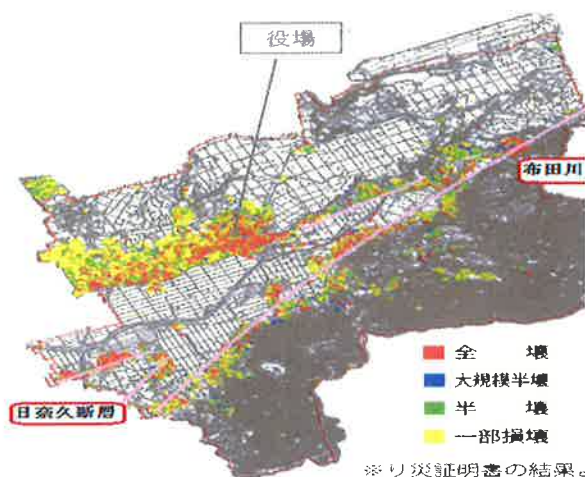


図-3.4 家屋被害分布と断層

図-3.5には平成28年3月時点での益城町仮設住宅分布を示した¹³⁾。飯野校区、市街化区域に集中している。北部のテクノ仮設は約600世帯が入居する大規模仮設で、家屋倒壊集中地域とは関係なく、益城町全地域の被災者が各村落から入居する寄合仮設住居で、運営が難しいことも指摘されている。

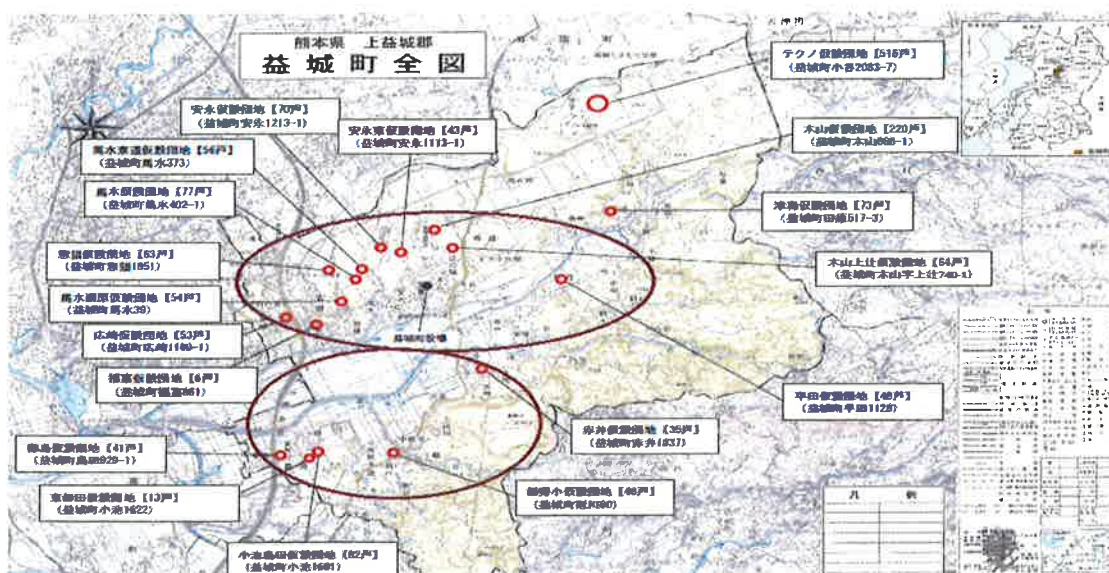


図-3.5 2017年5月時点での益城町の仮設住宅位置¹⁶⁾

3.2 益城町水道管路の被害

表-3.1には益城町水道の管種別敷設延長を示した。図-3.6には管種別敷設延長の割合を図示している。全国の小規模水道事業者と同様、PVCが圧倒的に長い敷設延長となっている。現在(平成29年8月)は復旧事業が進んでいるが、

耐震継手ダクトイル管の使用や、融着 PE 管の利用が多数を占めている。耐震管の利用など行政的に改良復旧が許可された結果である。

表-3.1 益城町水道の管種別敷設延長¹³⁾

分類	鑄鉄管(CIP)	ダクトイル鉄管(DIP)		鋼管(SP)		塩化ビニル管(VP)	ポリエチレン管(PE)		その他	合計
		耐震	その他	溶接	その他		融着	その他		
水道 ^{注1)}	16,207	3,727	4,758	0	47	77,472	3,128	186	0	105,525
簡易水道 ^{注2)}	440	8,256		953		66,457	1,953		0	78,059
合計	16,647	16,741		1,000		143,929	5,267		0	183,584

注1) 出典: 水道統計(平成26年度, 平成27年3月31日現在)

注2) 出典: 簡易水道統計(平成26年度, 平成27年3月31日現在)。ダクトイル鉄管(耐震)、鋼管(溶接)、ポリエチレン管(融着)は分類されていない。

注3) 水道統計、簡易水道統計とも、管種毎の口径別統計がないため口径別には区分しない。

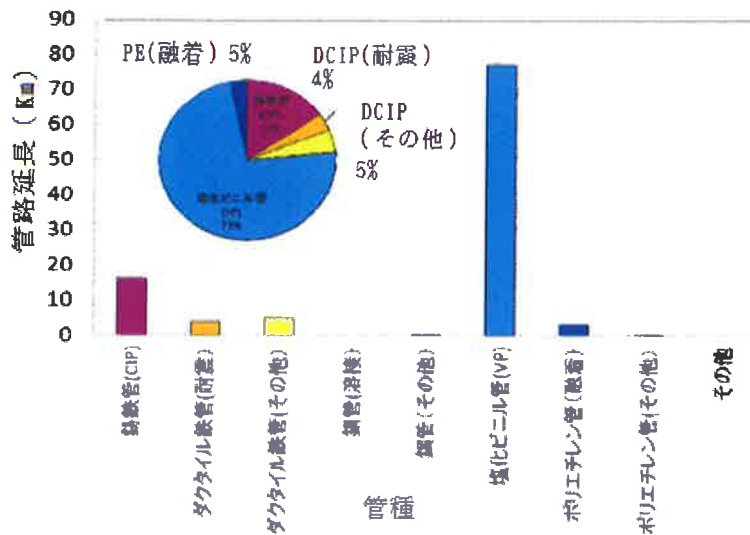


図-3.6 益城町管種別敷設延長割合¹³⁾

3.3 益城町水道管路被害

益城町水道では強い地震動と地表断層変位によって多くの水道管路に被害が発生した。図-3.7には益城町水道の管路被害写真を示した。送水管や配水管では、ダクトイル管も見られるが、PVC管が多くの被害を受けている。継手部位での被害が多いのも特徴である。PVCには接着のTSおよび伸縮余裕のあるRR継手が存在しているが、地盤変位の大きい箇所では、RR継手の抜け被害も多い。



(a) 給水管バルブより漏水 管PEφ50 杉堂



(b) 空港付近 φ150DCIP
仕切弁バルブ破損



(c) 上図(b)のバルブBOX破損



(d) 給水管漏水 小谷



(e) 給水管 PVC φ20 漏水塩ビ管 小谷



(f) K型DCIPφ100 漏水 下陣



(g) HIPVφ150 送水 漏水(修理後) 下陣



(h) HIPV-RR φ100 漏水 上陣



(i) PVC 抜け漏水 φ75 砥川



(j) DCIP φ150 抜け漏水 平田



(k) HIPV-RR 抜け φ75 赤井



(l) 曲管 22.5° HIPV φ75 抜け漏水

図-3.7 益城町水道管の被害写真

4. 益城町における地表断層亀裂分布

益城町では布田川断層、日奈久断層に沿って地表面亀裂が数多く発生している。パスコ（柵）は地表断層亀裂の分布を詳細に調査している¹⁴⁾。著者らも、水道管路被害に関係すると思われる津森校区の下陣、上陣、福田校区の平田において断層変位の現地調査を実施した。結果を図-4.1に示す。赤丸印は断層変位が確認された位置である。

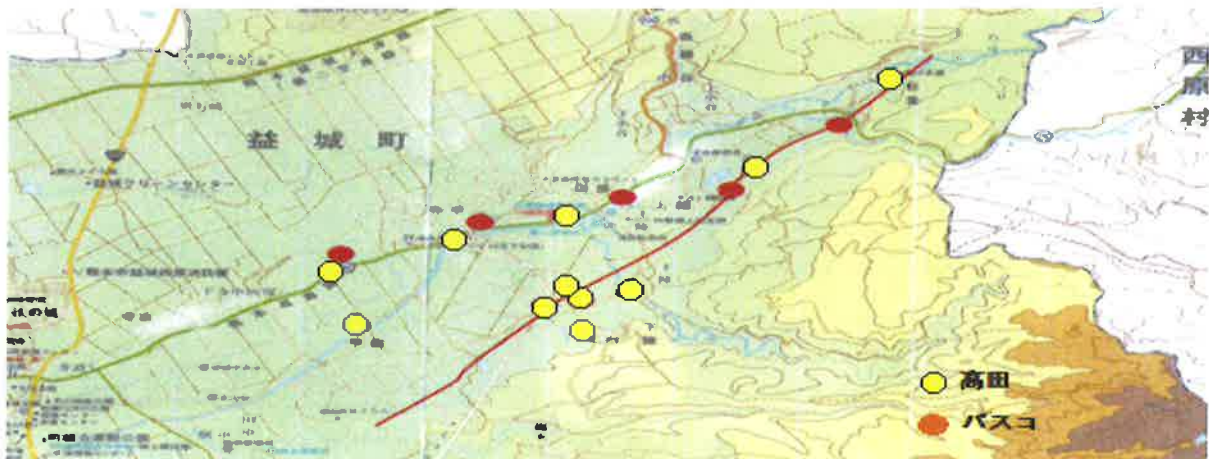


図-4.1 津森・福田校区における断層地表亀裂が見られた位置（赤・黄丸共通位置あり）¹⁴⁾

山岳地域である福田校区の丘陵地帯に沿って、南西の日奈久断層へと延伸する布田川断層地域の比較的柔らかい田畑や道路面での地表亀裂が特徴的である。

5. 地表断層亀裂を横断する益城町水道管路被害

5.1 益城町下陣の断層横断管路

図-5.1 および図-5.2 は益城町下陣で見られた約 30 年以前に敷設された $\phi 100$ の DCIP 送水管 2 本の被害である。

埋設時から曲管ではなく、約 4m の管路が両端 K 型継手部から円弧状に変形しており、従来、かかる DCIP 本体が変形を受けた例は著者の知る限り皆無である。図-5.2 には変形測定値を示しているが、最大中央部で、616mm と 259mm であった。

図-5.3、図-5.4 は継手部の押し口端部、差し口端部の破損状況を示している。腐食が進んでいる状況が伺われる。



図-5.1 益城下陣被害

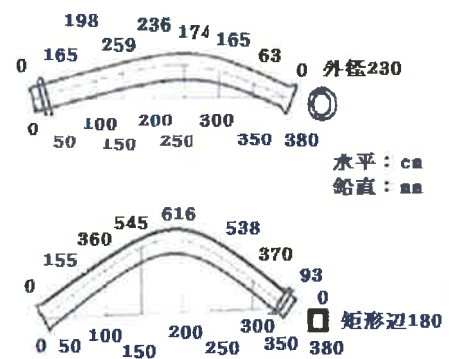


図- 5.2 DCIP 変形



図-5.3 破壊管路の継手部（下陣）



図-5.4 破壊管路の継手部（下陣）

5.2 益城町平田の断層横断管路¹⁵⁾

図-5.5 に示すように、益城町平田における並列埋設の $\phi 200$ DCIP 送水管および $\phi 150$ の DCIP 配水管の被害で、地表断層亀裂部で K 型継手が水平に 450mm 程度移動して破壊している。また、図-5.6 は曲がり部で継手抜けが生じている。かかる被害モードは地表断層発生地域で過去にも見られている。

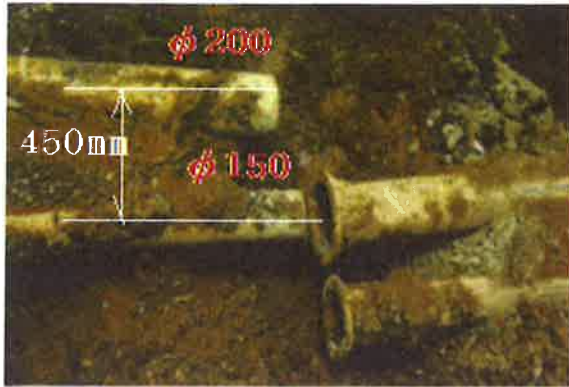


図-5.5 益城町平田のDCIP2本の継手部引き抜け



図-5.6 益城町平田の継手部破損

5.3 下陣・平田における地表変状と断層と管路の交差角

図-5.7には下陣断層横断管路のごく近傍での地表変状状況、図-5.8には平田での地盤変状と表面波探査（後述）の状況を示している。下陣では水路を横断する暗渠に1.2mの水平変位ずれが見られ、明らかな右横ずれ断層が地表に現れ、道路延長面に同程度のずれ変位量が見られる。この延長上に水道管埋設道路があり、道路延長とずれ方向の交差角は図-5.9に示すように、ほぼ45度である。図-5.10は平田における断層方向と水道管敷設方向を示している。ほぼ直交方向であることが知られた。



図-5.7 下陣の断層変位による道路面変状



図-5.8 平田における道路面変状



図-5.9 下陣における水道管と断層の交差角

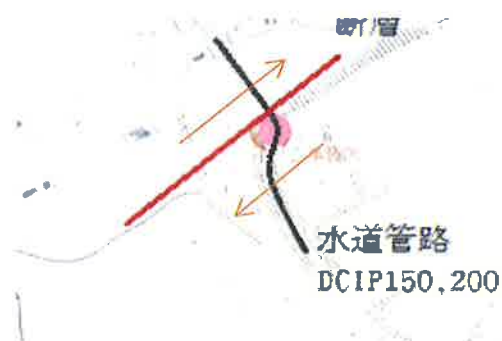


図-5.10 平田における水道管と断層の交差角

6. 管路被災位置での表面波探査試験

管路が埋設されている地盤の状況を知る目的で表面波探査を実施した。表面探査はインパルス振源によって励起された表面波を測線上の多数の受振器を用いて測定を行い、多数のトレースから位相速度曲線（分散曲線）を計算し、さらに一次元の測定解析を測線上で連続して行うことにより二次元のS波速度構造を求める手法である。応用地質（株）製の機器を用いた。測線 50m で、2m ごとに地震計を配置して速度分散曲線を合理的に求めて地下構造を決定し、S 波速度構造を得た。測線長の約半分の距離までの地盤深さ構造を推定することができる。断層横断管路の被災地点である下陣および平田の 2 地点で実施した。図-6.1 に見るように下陣では、地表面付近は約 150m/sec で、地下 10m 付近では約 500m/sec の傾斜した岩盤層相当速度値が見られる。岩盤層の傾斜角度は約 60 度である。断層モデルで想定されている角度と対応している。また、図-6.2 には、平田での速度波構造を示した。本地点では地表面付近は約 200m/sec のやや硬地盤で、地下 10m 付近では 300m/sec 以上の岩盤相当の速度である。また、その傾斜角は下陣と同様である。これらの速度値は管路の応答を検討する際の地盤反力算出に活用しうる。

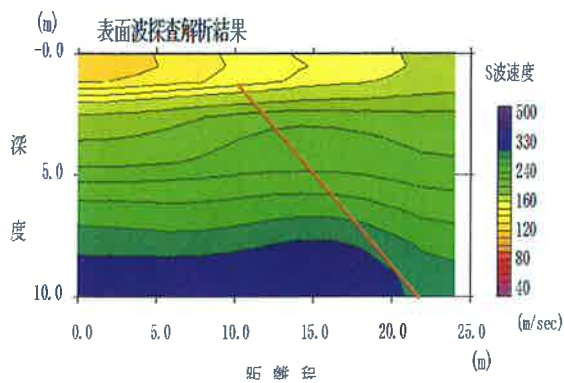


図-6.1 下陣の地盤速度波構造

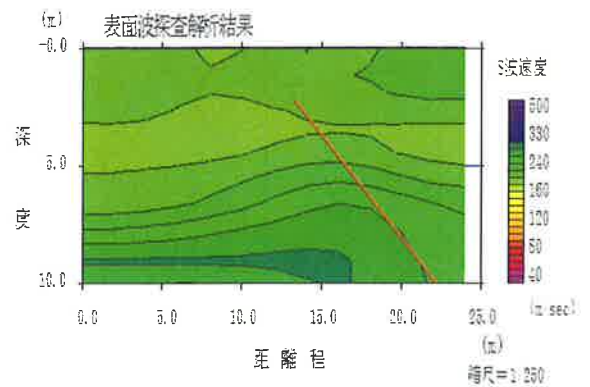


図-6.2 平田の地盤速度波構造

7. 地表断層亀裂交差管路の被災モードに関するモデル実験

7.1 実験概要

管路の破壊モードの発生メカニズムを検討するために、図-7.1 および図-7.2 に示すような簡単なモデル実験を行った。45° および 90° に移動できる紙粘土で作成したモデル地盤の箱を作成して、その地盤中にモデル管路を埋設して、下陣、平田の交差角方向に断層運動に相当する地盤移動を与えた。

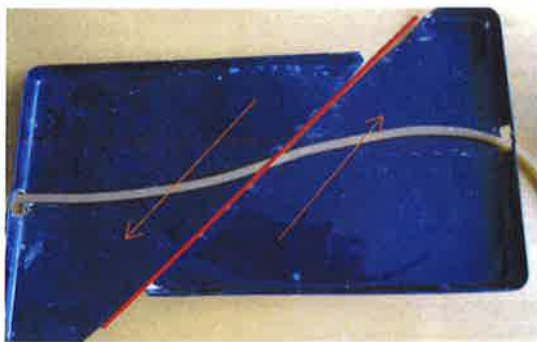


図-7.1 45 度交差角断層運動装置

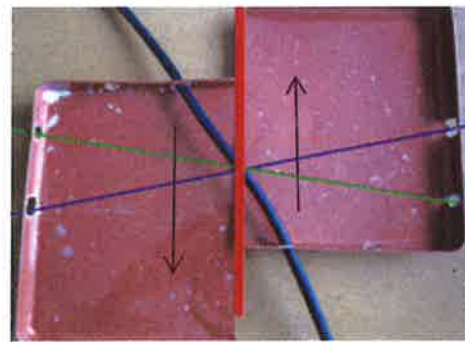


図-7.2 90 度交差角断層運動装置

実験では最初に交差角 (90, 45, 22.5 度) と管路挙動の関係、断層運動が断層線の片側または両側に変位する場合、

モデル管路の材料（硬・軟ラバー、硬・軟鋼線）、連続管・継手管の場合について実験を行った。管路変形の基本挙動を確認するために図-7.3に示すように連続管ラバー管を地表面に埋設して45°交差角変形を与えた。管変形は断層線のごく近傍に限定されて、断層両側では圧縮力により変形する。その際、ある程度の食い違いで地盤と管は剥離して管路変形は急激に進行する。さらに地盤変位が増大すると、管路被害でよく見られるようにZ字型変形へと進むことが知られた。さらに、図-7.4に見るように、継手で変形が許容される場合には、一般的に継手剛性は管体より小さい場合が多く、継手の動きが管体変形よりも先行して発生することも知られた。上記の実験は、管路の剛性・形状・継手、地盤の材料特性、埋設条件、断層変位などを考慮せず断層変位と埋設管路の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。

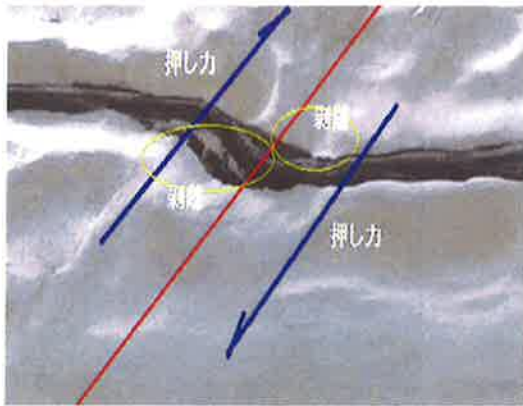


図-7.3 円形ラバー連続管の断層変位による挙動



図-7.4 矩形継手ラバー管路の挙動

7.2 下陣管路の実験

次に下陣管路の被害を再現するために金属針金を管体に見立てて、ゴム製継手を挿入して管セグメントを接合し、管路モデルとした。その際、断層線を横断する位置に継手部を配置した。結果を図-7.5～図-7.6に示す。継手の無い連続針金管路では、管体変形が限定される固定位置まで直線状に変形するが、図-7.5のように継手を挿入した場合には、継手の両側で反対方向に地盤が動くので、継手が相対的に固定点のように挙動し、その中間の管路が弓状に変形する。下陣被害と極めて相似である。断層変位が増大すると、K型継手ではある程度までは回転するが、それ以上では回転が進まず、地盤押し力が断層線両側で逆方向に作用して、図-7.6の変形が惹起されるものと推察される。



図-7.5 下陣管路の挙動

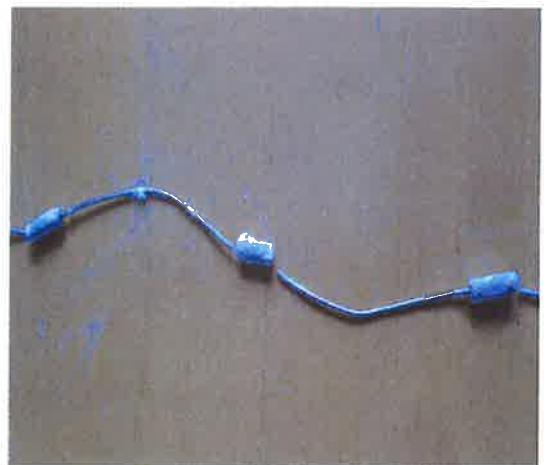


図-7.6 下陣管路の変形

実験より、断層と45度で交差して約200cmの右横ずれ断層変位を受けたK型継手CIPの被害メカニズムは次のように考えられる。図-7.7に示すように、地震前は直線であった管路は、断層変位によって継手の回転・伸縮のモーメントと伸縮力が作用して、②のステップで可能な角度まで変形したと考えられる。③の段階では、断層運動方向の管路背後では土の剥離のために反力が作用せず、反対方向からの土圧が管路に作用して管体変形が発生した。さらに④の段階で、さらなる断層変位で継手が完全に離脱したと考えられる。図-7.8は管路敷設替えで掘削された様子であるが、管路変形は図のような状態であったことが推察される。図-5.1の掘削された管路破壊モードと酷似している。管路と断層線の交差位置に継手が存在していたことが今回の被害モードを生み出した要因の一つと推察される。

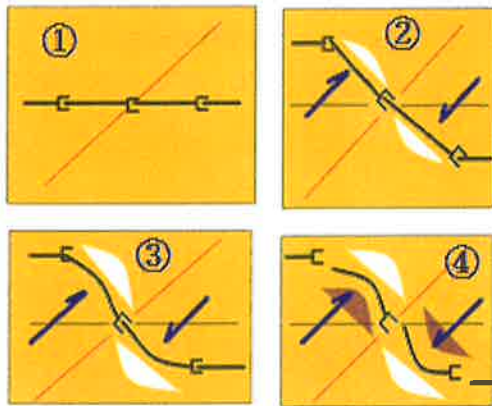


図-7.7 下陣管路の推定被害メカニズム

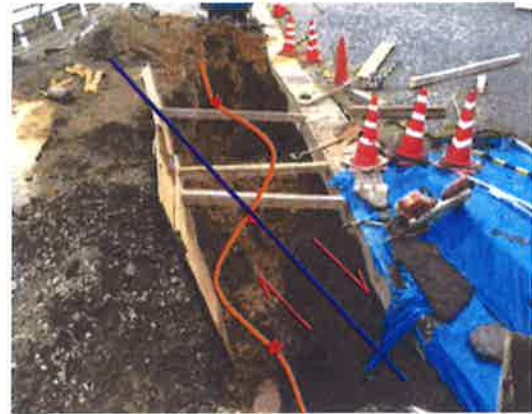


図-7.8 管路掘削工事と推定管路変形

7.3 平田管路被害に関する実験

平田の管路被害は前出図-5.5の通りである。2本の管路と地表断層亀裂は、ほぼ90度である。継手が断層線上にある場合には継手部はせん断力を受けて容易に継手が離脱して、約450mm相対ずれを引き起こしている。実験結果は図-7.9の通りである。実験では地盤の動きは15mm程度与えているが、管のずれ量は7mm程度と約半分の量であり、管路の変形は、断層線両側の継手間に限定されている。これらは、管路周辺の地盤剛性によって変化する。管路の長手方向でのずれは全く見られない。

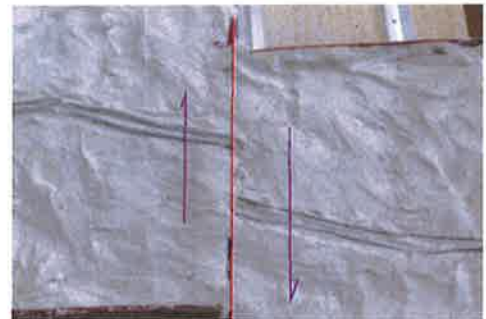


図-7.9 平田管路被害の再現実験

8. 管路変形による管体ひずみ推定

下陣の管路変形は図-8.1のように示される。約4mの管路セグメントの伸量と管ひずみを推定した。変形後の管の延長は下記で示される。

$$L = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{d(f(x))}{dx}\right)^2} dx \quad (8.1)$$

a は管路セグメント長 である。

f(x)は図-8.1の変形近似曲線関数である。管路ひずみεは次式で求められる。

$$E = \frac{L-a}{a} \quad (8.2)$$

下陣では2件の被害管路が掘削されているが、式(8.1)、式(8.2)によると大変形のAは5.0%、Bは1.4%のひずみであることが知られた。CIP (FC)の降伏ひずみは載荷ひずみ速度が 10^{-3} では0.01%以下であり、DCIPでは降伏ひずみは、FCの約10倍程度である。下陣管路はDCIPと推定されるが、いずれにしても被害管路では剛性がかなり低下していることが推測され、管路の変形が容易に進行した可能性がある。

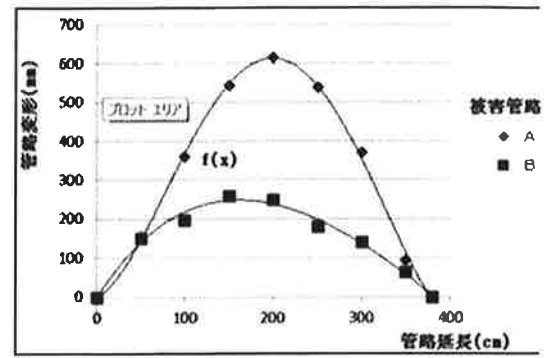


図-8.1 下陣管路変形曲線

9. ALA 法による断層横断管路に発生する継手変位と管路ひずみ

ALA (American Lifeline Alliance) 法では断層横断管路の管ひずみは以下の様に求めている¹⁷⁾

$$\varepsilon_p = 2 \left\{ \frac{\delta}{2L_a} \cos\beta + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2L_a} \sin\beta \right)^2 \right\} \quad (9.1)$$

$$\delta_{joint} = \frac{\delta}{2} \cos\beta \quad (9.2)$$

ここに、 δ : 断層変位、 β : 交差角、 L_a : 固定されていない管路区間である。下陣管路で、 $L_a = 400\text{cm}$ 、 $\beta = 45$ 度、 $\delta = 200\text{cm}$ と仮定すると、管路ひずみは0.35、継手変位・回転角は、それぞれ70cm、20度程度となる。上式は管路・地盤剛性は考慮せず、変形が与えられた状態での管体挙動である。管路変形から求めた管路ひずみは数%と考えられ、ALA法では十分推定できないことが知られる。

10. 管路に作用する荷重

下陣管路にどの程度の外力が作用したかについて分析する。 $\phi 100 \cdot \text{DCIP}$ について、外径: 118mm、内径: 106mmとすると、断面積 $A: 0.27 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 、断面2次モーメント $I: 0.33 \times 10^7 \text{ mm}^4$ となる。管路は大変形を生じており、材料非線形状態にあると考えられるので、等価弾性係数 $E: 0.5 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とする。長さ l の単純張りの中央に作用する集中荷重 P 、あるいは等分布荷重 w による中央部のたわみ δ_p 、 δ_w は式で与えられる。

$$\delta_p = \frac{P l^3}{48EI} \quad (10.1)$$

$$\delta_w = \frac{5w l^4}{384EI} \quad (10.2)$$

下陣管路が4m区間で最大616mmの管路変形を生じているので、上式を用いると、集中荷重作用と仮定すると、荷重 P は76 kN、分布荷重と仮定すると全荷重 $w l = 152 \text{ kN}$ である。

一方、地盤移動により管路に荷重が作用したと考え、地盤ばねと変位量を乗じると作用力が計算される。表面波探査により、下陣の地表面付近では S 波速度は約 150m/sec である。地盤ひずみが 10^{-3} 程度で、 S 波速度値は60%程度の低下と考えると 90m/sec 程度である¹⁸⁾。下水道指針による、単位長さあたりの管路直交方向の地盤剛性は下記で与えられる¹⁸⁾。

$$K_{g2} = C_2 \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \quad (10.3)$$

C_2 (地盤剛性係数定数) = 3.0、 $\gamma_t = \frac{18\text{kN}}{\text{m}^3}$ 、 $V_s = 90 \text{ m/sec}$ とすれば、 $K_{g2} = 4.46 \times 10^4 \text{ (kN/m}^2)$ である。地盤係数

$k \text{ (kN/m}^3)$ は $kD = K_{g2}$ と考えられるので、 $k = 4.46 \times 10^5 \text{ (kN/m}^3)$ である。口径 100mm の管の直交方向拘束力は、管投影面積 0.472 m^2 を乗じると、ばね定数 k' は $2.10 \times 10^5 \text{ (kN/m)}$ となる。一方、ガス指針¹⁹⁾では、口径 100mm の管路の管軸直交方向の地盤ばね係数は、 $k = 2.0 \times 10^4 \text{ (kN/m}^3)$ と定められている。ガス指針によるばね定数 k' は、 $0.94 \times 10^4 \text{ (kN/m)}$ である。両指針にかなりの差異がある。下陣管変形が生じる外力は、76~152kN と推測されたので、地盤が数cm相対的に動くと下陣管路の変形が生じる可能性がある。上記の、 K_{g2} 、 k 、 k' は管と地盤が一体として挙動する弾性状態仮定して定められているが、図-7.5に見るように、管と地盤は剥離状態にあったと推察される。したがって、 k' はさらに小さい値と考えられる²¹⁾。なお、DCIP 耐震管路では、継手の引き抜け阻止力を 3D kN 以上と規定している²⁰⁾。口径 100 mm の DCIP では 300 kN 以上となる。本値は、管路軸方向作用力で、地盤のせん断応力などを配慮して定めている。断層運動時とは交差角によっては必ずしも対応しないが、推定した下陣管路への作用力とは、同程度のオーダーであることは興味深い。また、回転角については 7~15 度に屈曲型耐震管は規定しているが、8m (管路 2 本分) 間で、1.2m の断層変位が生じたとすれば回転角は 8 度である。下陣では既に継手は伸縮・回転ともに破壊状態にあるが、断層変位に対する耐震管を考慮する上で興味深い。

11. 断層横断管路の対策

水道施設耐震工法指針・解説(2009)では、断層近傍域において敷設される埋設管路については、地盤条件にかかわらず、原則として耐震性能の高い管路を用いることとしている。1995 年の兵庫県南部地震では、野島断層において地表面に約 2 m の断層変位が発生したが、幸いにもそれを横断する構造物や他ライフラインがほとんどなく、断層変位に伴う被害は僅かであった。しかし、1999 年トルココジャエリ地震、1999 年台湾集集地震等では、地表面に数 m~10m の断層変位が生じ、それに伴い構造物や大口径の埋設管路に大きな被害が生じている。したがって、活断層を横断する重要な大口径管路については、断層変位を考慮することと規定しているが、具体的な計算法、対策については言及していない。各種材料管路・継手の断層横断施設の耐震設計法の確立に向けての研究開発が急がれる。断層横断部の埋設管路の対応方法としては、想定される断層変位に対応可能な変形性能を埋設管路に確保させる方法と、被害が発生した場合のバックアップルートを確認する方法がある。前者については、神戸市における会下山断層を横断する大容量送水管の対策事例や、横須賀市における武山断層を横断する送水管の対策事例および大阪府の有馬高槻構造断層を横断する送水管の対策事例があり、それらでは想定される断層横断部に複数の伸縮可撓管を設置することで対応している。また、高田により、断層変位により鋼管に発生する最大ひずみの計算法が提案されており、設計においてはこれらが参考にされる。後者については、地理的特性や水道システム全体を考慮してバックアップルートを確認することが重要である。

国内における断層横断管路の対策工事事例として、兵庫県南部地震のシンボルプロジェクトとして実施された、神戸市水道の大容量送水管 ($\phi 2000\text{mm}$) の断層横断対策がある²²⁾。当初、送水管ルートは断層と低角度で交差する計画であったが、図-11.1 に示すように、90 度交差の方がリスクは少ないとの判断からルート変更している。また、図-11.2 に示す伸縮継手を用いて、図-11.3 に示す変形を期待したが、コスト軽減のため新たに開発した波型鋼管(図-11.4)を用いて、震災 20 年後の 2015 年に完工している。

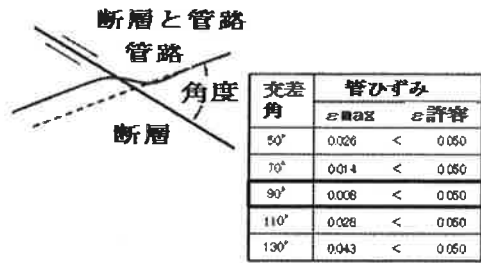


図-11.1 断層と管路の交差角と発生管路ひずみ

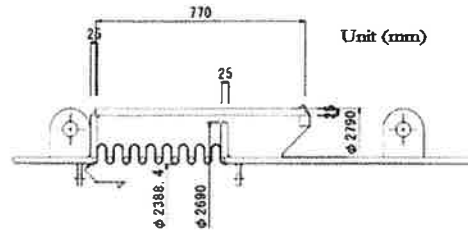


図-11.2 断層対策伸縮継手

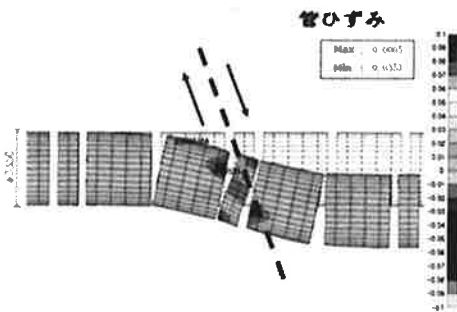


図-11.3 断層変位による進出継手挿入鋼管路



図-11.4 断層対策波型鋼管

まとめ

本論文では、益城町水道で発生した断層横断管路の被害メカニズムを検討した。従来の断層横断管路の被害モードと比較するとともに、地表断層亀裂の現地調査を行い、管路被害位置で表面波探査を実施して地盤状況を把握した。さらに、簡易な断層横断管路の実験を行い、2ヶ所での管路被害モードを再現できるか検証した。その結果、断層線と管路の交差角、管路継手の位置、周辺地盤の剛性などが満足すれば、被害メカニズムは一般的に生じ得るものであることが知られた。断層横断管路の設計法や耐震化対策が不十分な現状では、研究開発の必要性を述べた。現地調査については、荒木栄一（益城町・水道課）、今中利信（NPO 防災白熱アカデミー）、鎌田泰子（神戸大学）、竹内裕子（熊本大学）、東俊司（積水化学工業株）の各氏および夫々の関係者に大変お世話になりました。記して感謝の意を表す次第です。

参考文献

- 1) 高田至郎：断層を横断するパイプラインの被害写真集、水道産業新聞社、2003
- 2) Takada S. and N. Hassani: Lifeline Earthquake Engineering~Lessons from 1995 Kobe and 2011 East Japan earthquakes~, Farhangshenasi, 2015
- 3) Bonilla M. G. and J. M. Buchanan: Interim report on world historic surface faulting, USGS Open-file Report, 1970
- 4) Newmark N. M. and W. J. Hall: Pipeline design to resist large fault displacement, Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering-1975, EERI, pp.416-425, June 1975.

- 5) Kennedy R. P., A. C. Darrow and S.A. Short: General consideration for seismic design of oil pipeline system, ASCE, The current state of knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, pp.2-17, Aug. 1977.
- 6) Ariman T.: A review of buckling and rupture failure in pipeline due to large ground deformations, Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipeline and Equipment, pp.176-180, 1983
- 7) Wang L.R.L., Kubo K.: State of the art report on lifeline Earthquake, Engineering, Turkish, Committee on Earthquake Engineering, 1981
- 8) McCaffrey M. A. and T. D. O'Rourke: Buried pipeline response to reverse faulting during 1971 San Fernando earthquake, ASME, Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipeline and Equipment, pp.151-159, 1983.
- 9) 長谷川延広・清野純史: 断層横断管路の耐震設計法の提案、土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 4, 659-665, 2015
- 10) 金子正吾・岸正蔵・宮島昌克: 断層横断部の耐震継手ダクタイル管路挙動に関する研究(3), 水道研究発表会、2016
- 11) 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, No. 2009
- 12) 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
- 13) 厚生労働省: 平成 28 年(2016年)熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書、平成 29 年 3 月
- 14) 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
- 15) 益城町水道センター: 益城水道管状況写真、東送、福送(4月13日)、平成 29 年 5 月
- 16) 益城町: 応急仮設住宅位置図、http://www.town.mashiki.lg.jp/kihon/pub/detail.aspx?c_id=138&id=786
- 17) FEMA: Seismic Guideline for Water Pipelines、ALA, 2005
- 18) (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
- 19) (一社) 日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針、2004
- 20) (財) 国土開発技術研究センター: 地下埋設管路耐震基準、1977
- 21) 高田至郎: ライフライン地震工学、共立出版第 2 版、1997
- 22) 神戸市水道局: 大容量送水管、第 2 報資料、2005

著 者

高田至郎 所員 工学博士 地震工学