

# 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

高田至郎

## 概要

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、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。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。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は顕著である。

## 1. 地震と被害概要

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 1 には、地盤と断層位置の概略を示している<sup>1)</sup>。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。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 2 には断層概略位置、2 回の震源位置を示している<sup>2)</sup>。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、断層は認識されていないが、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 1 益城町地域と地盤

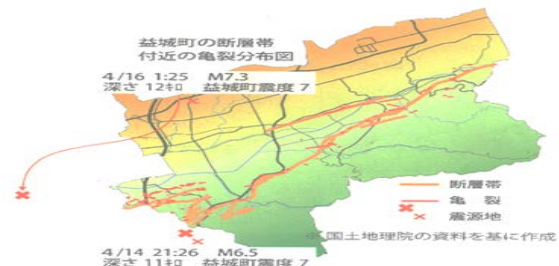


図 2 震源と断層

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(株)は地表断層亀裂の分布を詳細に調査している<sup>3)</sup>。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 3 に示す。赤丸印は断層変位が確認された位置である。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。

## 4. 地表断層亀裂を横断する益城町水道管路被害

図 4 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。中央部最大で、616mm と 259mm の変位であった。

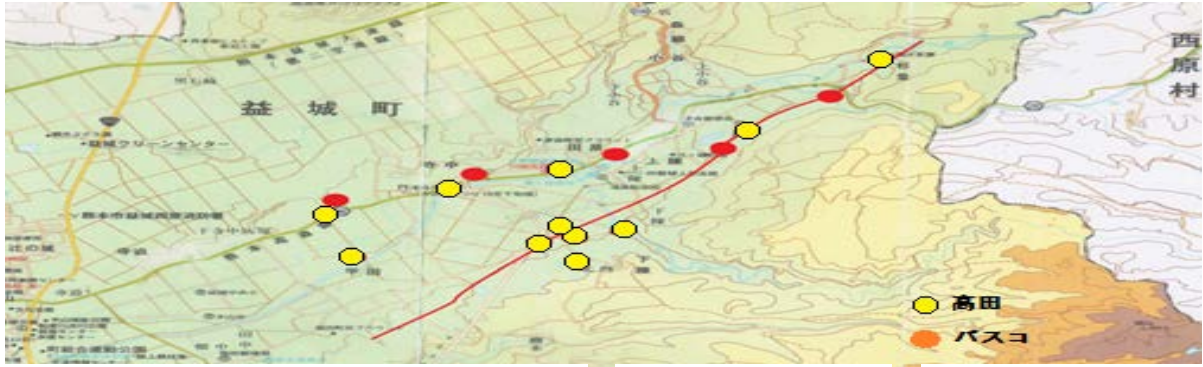


図3 益城町下陣・平田地域における断層と地表亀裂



図4 下陣でのダクタイト管長柱座屈



図6 下陣交差角



図7 平田交差角

継手部の押し口端部、差し口端部の破損は腐食が進んでいる状況であった。

また、図5は益城町平田における並列埋設のφ200DCIP送水管およびφ150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。

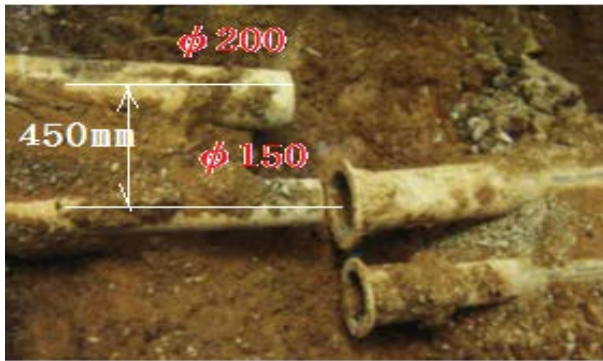


図5 平田でのダクタイト管継手抜け

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理設道路があり、図6に示すように道路延長とずれ方向の交差角はほぼ45度である。図7に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。ほぼ直角方向であることが知られた。

### 5. 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。応用地質構築の機器を用いた。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。断層横断管路の被害地点である下陣および平田の2地点で実施した。図8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。

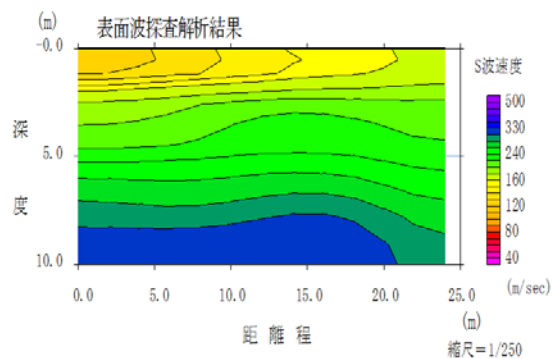


図8 下陣表面波探査結果

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ほぼ対応している。また、平田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を算出する際に活用しうる。

## 6. 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。

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 9 に示すように



図 9 右ずれ断層変位による管路変形と剥離

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、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。

## 6.1 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 10 に示す。継手の無い連続針金管路では、変形が限定される固定位置まで直線状に変形するが、図 10 のように継手を挿入した場合には、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 11 の変形が惹起されるものと推察される。



図 10 継手 DCIP 管路の長柱座屈



図 11 継手管路本体の座屈

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 12 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



は管路敷設替えて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4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。

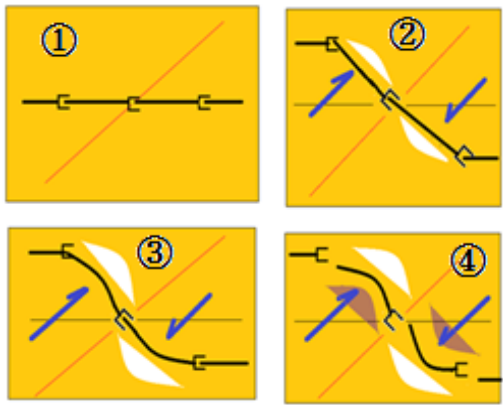


図 12 管路長柱座屈のメカニズム

## 6.2 平田管路被害に関する実験

平田では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13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 13 平田での直交交差角管路継手の破断

下陣では2件の被害管路が掘削されているが、幾何的変形から計算される、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。

## 7. 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について分析する。 $\phi 100$ ・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、あるいは等分布荷重による中央部のたわみが求められる。

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、集中荷重作用と仮定すると、荷重 $P$ は76kN、分布荷重と仮定すると全荷重 $wl=152 \text{ kN}$ 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ると、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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。

$$K_{g2} = C_2 \frac{\gamma_t}{g} V_s^2$$

$$C_2(\text{地盤剛性係数定数}) = 3.0, \quad \gamma_t = \frac{18\text{kN}}{\text{m}^3}, \quad V_s =$$

90 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 $0.472 \text{ m}^2$ 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<sup>5)</sup>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相対的に動くとき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、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。なお、DCIP耐震管路では、継手の引き抜け阻止力を30kN以上と規定している<sup>6)</sup>。口径100mmのDCIPでは300kN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。

## 8. 断層横断管路の対策

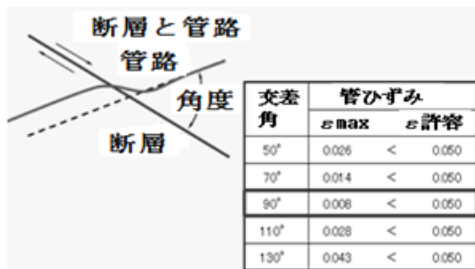


図 14 断層交差角と発生管ひずみ



図 15 断層対策管路

断層横断部の埋設管路の対応方法として、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式が提案されており、設計においてはこれらを参考にされる。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

トを確保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（φ2000mm）の断層横断対策がある<sup>22)</sup>。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 14 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、伸縮可撓継手を用いて、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 15）を用いて、震災 20 年度後の 2015 年に完工している。

## まとめ

本論文では、益城町水道で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、被害メカニズムを一般的に生じ得る被害メカニズム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）、欽田泰子（神戸大学）、竹内裕希子（熊本大学）、東俊司（積水化学工業㈱）の各氏および夫々の関係者に変えてお世話になった。記して感謝の意を表す次第です。

## 参考文献

- 1) 永木 藍・荒木 昭次郎・鈴木 康夫:熊本市圏の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
- 2) 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
- 3) PASCO: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) 高田至郎:ライフライン地震工学、共立出版、1991
- 5) (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
- 6) (一社)日本ガス協会:高圧ガス導管液状化耐震設計指針、2004

