

埋立地および断層地形周辺における地盤変状と地中管路被害特性

DAMAGE CHARACTERISTICS OF BURIED PIPELINES DUE TO PERMANENT GROUND DISPLACEMENTS
IN RECLAIMED GROUND OR FAULT TOPOGRAPHY

高田至郎*, 李騰雁**, 福田克己***, 棚橋隆司****

Shiro TAKADA, Tengyan LI, Katsumi FUKUDA and Takashi TANAHASHI

*工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

**工博 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

***工修 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

****工学士 住友金属工業㈱ 大阪導管技術室 (〒541 大阪市中央区北浜4-5-33)

The January 17, 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake caused extensive damage to lifeline structures. Especially damages of water pipes or gas pipes were concentrated in the area of reclaimed ground and the area of fault topography besides the area of seismic intensity of JMA scale 7. The present paper aims to grasp the characteristics of damage to water buried pipes using GIS database and analyze seismic behavior for buried pipes located near fault due to large permanent ground displacements by using the computer program ERAUL(Earthquake Response Analysis of Underground Lifelines).

The conclusions made it obvious that there is a high possibility of buried pipes to be damaged due to permanent ground displacement and strain.

Key Words: permanent ground displacement, reclaimed ground, fault topography

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震においては、電気・水道・ガスなどといったライフライン施設にも甚大な影響を与えた。とりわけ水道施設においては、貯水・取水・導水から浄水・送水・配水施設の総ての施設が被害を受け、とくに配水管路の被害箇所は顕著であり神戸市においてのみでも合計約18,00件にも上り、長期間にわたる断水を余儀なくされた。水道施設被害は、地質・地形的特質によって大きく変化することから、地質・地形的特質を考慮に入れた防災対策が重要となってきた。

そこで、著者らは、兵庫県南部地震において地中管路被害が局所的に顕著であった埋立地であるポートアイランドと既存活断層である長田・会下山断層周辺地域の2地域を選定し、両地域における配水管被害と地盤変状との関連についてGIS(地理情報システム)を用いて統計的分析を行うとともにモデル化による解析によって考察を行う。

2. 神戸市配水管被害の統計的分析

2.1 地質・地形分類別の配水管被害特性

兵庫県南部地震における神戸市地域の配水管被害、および配水管網をGIS(地理情報システム)に入力し、配水管

データベースを作成し、このデータベースを各地盤特性ごとに集計し、配水管被害率と地盤特性の関連について考察を行った。

まず、神戸市における地質分類別の配水管被害率を図-1に、地質分類の概要を表-1に示す。図-1より大阪層群1、大阪層群2、沖積層B、埋立地などにおいて被害率が高いことがわかる。また、沖積層A、大阪層群3、低位段丘においてもやや被害率が高い値を示している。とくに大阪層群1、大阪層群2、埋立地においては継手被害率が他の地質に比べて非常に高いのがわかる。大阪層群1と大阪層群2の被害率を比べると、総被害率と継手被害率はほぼ同じ値を示しているが、大阪層群1において管体被害が高いのに対し、大阪層群2では属具の被害が高くなっている。ここで属具被害とは、空気弁や仕切弁、消火栓などの設備被害を表す。また、大阪層群3においては、大阪層群1、大阪層群2に比べて被害率自体はやや低いもののその内訳は大阪層群2とほぼ同じである。これら的大阪層群は、断層と低位段丘または沖積層のあいだに存在する地質であり、大阪層群1、大阪層群2、大阪層群3のそれぞれの存在する位置は近く、被害の状況も類似するものと思われる。しかし、継手被害率の高いことは大阪層

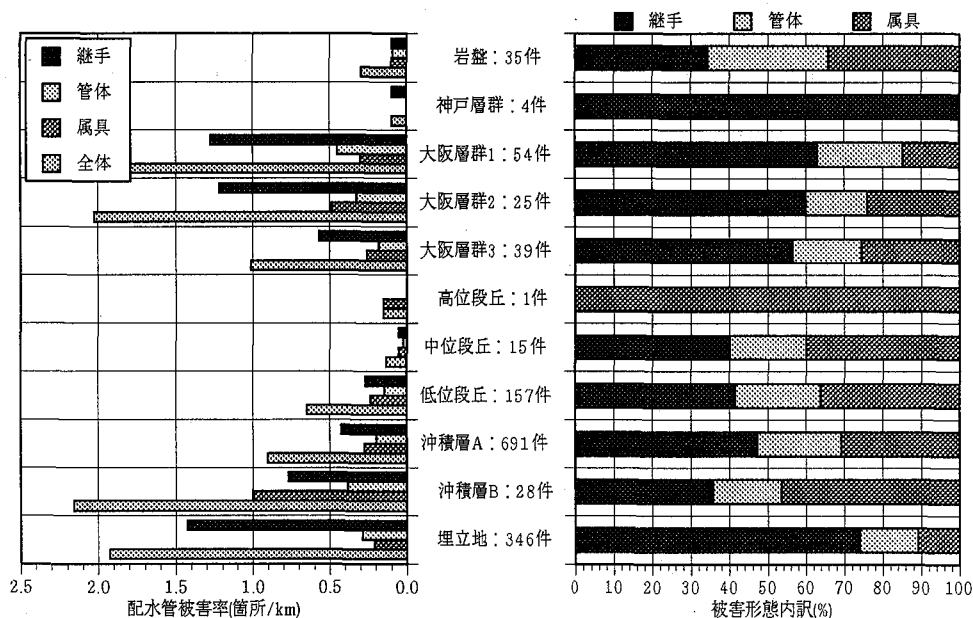


図-1 地質分類と配水管被害率

表-1 地質分類

地質分類	概要
岩盤	花崗岩、岩脈などの中生代以前に形成された地質
神戸層群	砂岩、泥岩、礫岩などにより構成される中新世に形成された地質
大阪層群1	非海成粘土、砂、礫、火山灰から構成される鮮新世に形成された下部亜層群
大阪層群2	非海成粘土、砂、礫、火山灰から構成される前期更新世に形成された中部亜層群
大阪層群3	海成粘土、砂、礫、火山灰から構成される中期更新世に形成された上部亜層群
高位段丘	海成粘土、砂、礫、火山灰から構成される中期更新世に形成された段丘、上部亜層群の堆積面
中位段丘	砂、礫から構成される後期更新世に形成された段丘
低位段丘	砂、礫から構成される後期更新世に形成された段丘
沖積層A	砂、砂礫、シルト、粘土から構成される完新世以降に形成された地質
沖積層B	砂、砂礫、シルト、粘土から構成された完新世以降に形成される地質のうち、とくに砂州、砂堆、自然堤防など
埋立地	人工的に埋め立てられたもの

群各層で類似するが、被害率の内訳は、構成年代の古いものほど管体被害が多く、新しくなるにつれて属具被害が多くなる傾向にあり、構成年代の古い地質における管体被害の増加傾向を伺うことができる。その傾向は大阪層群以外の地質においてもみられ、花崗岩などの工学的には基盤とみなされる岩盤においても、その被害内訳に管体被害の割合が高くみられる。神戸市における配水管の約80%はDIPであり、その被害のほとんどは継手部の被害である。この管の耐震性能は高く約1%のひずみに対しても十分に耐えることが可能である。しかし、継手には耐震性の高い継手を使用しておらず、地震によって生じたひずみに対して、管体自体は耐えることができたが、それによりひずみが継手部に集中する結果となり、継手における被害が非常に多くなったものと考えられる。しかし、岩盤や大阪層群1においては、継手被害と同様に管体被害率も高く、これらの地質において管体自体の許容力を超えるひずみや応力が管に集中した結果、管体被害が高くなったものと考えられる。

震度Ⅶ地域にあたる低位段丘や沖積層Aにおいては、大阪層群や埋立地など程ではないが、やや被害率が高くなっている。これらにおいてもその内訳では継手被害率が最も高くなっており、兵庫県南部地震における被害の継手部への集中の傾向がさらに示された。低位段丘や沖積層Aにおける被害内訳をみると属具の被害率がやや高く、“震災の帯”と呼ばれる建物被害の集中する地域において属具被害が多くなる傾向がうかがえる。また、沖積層Bにおいては、その被害率は地質分類の中で最も高く、またその内訳は属具被害が最も高い。沖積層Bは河川や沿岸部に分布する礫成分の多い沖積層であり、天井川の多い神戸市内においては、河川の下流に多く分布しており、また震度Ⅶ地域にも重複している。これらの河川の沿岸部においては、建物被害についても集中している地域が多く、建物被害と属具被害の関連性が伺われる。埋立地においては、被害内訳における継手被害の割合が非常に高く、これまでの地震における液状化した埋立地盤の被害傾向と一致しており、埋立地における被害が液

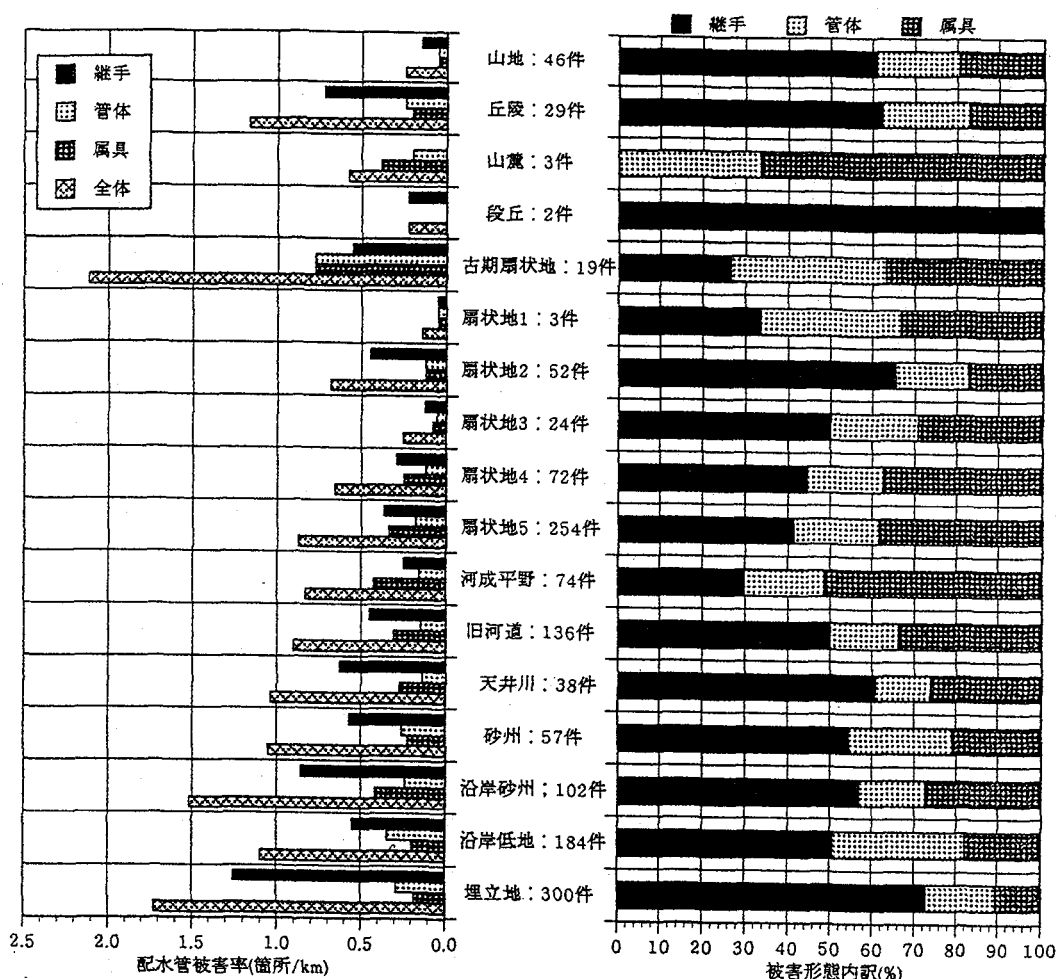


図-2 地形分類別配水管被害率

状化によるものであることがわかる。本地震による液状化範囲は非常に広域であり、埋立地のほぼ全域で液状化が生じている。液状化した地盤では、地盤の沈下、側方流動や過剰間隙水圧の発生などにより大きなひずみを生じ、継手部に被害を生じたものと考えられる。

次に、神戸市の地形分類別の配水管被害率を図-2に示す。図-2より古期扇状地、沿岸砂州、埋立地などにおいて被害率が非常に高いことがわかる。また、丘陵、砂州、天井川、沿岸低地においてもやや被害率が高い。被害内訳をみると、全体的にはやはり継手の被害率が高く、ほとんどの地形分類において50%程度の被害を占めている。扇状地においては、古期扇状地において管体被害率、属具被害率が非常に高く、比較的古い時代に形成された段丘化した扇状地において管体被害の多いことがわかる。また、扇状地2から扇状地5にかけて形成年代が新しくなるにしたがい、継手被害の占める割合が低く、属具被害の占める割合が高くなっている。ここにおいて扇状地2から扇状地5はそれぞれ6~4万年前、3~1.5万年前、1.5~0.6万年前、0.6万年前頃に形成された扇状地である。扇状地2から扇状地5の分布は、山麓部から“震災の帯”の地域へかけて、段丘層から沖積層へと推移して分布している。このことは、扇状地2や扇状地3などの段丘化した扇状地においては継手被害が多く、扇状地4や扇状地5などの沖積地盤へ移行するにしたがい属具被害が多

くなることを示している。また、扇状地2、扇状地3などは傾斜地盤を構成しており、この影響も被害形態の差異に関連するものと思われる。その他沿岸砂州や沿岸低地などの沿岸部においては、継手被害の割合が高くなっている。埋立地においては、その70%以上を継手被害が占めており、埋立地における液状化による継手被害への対策の必要性が知られる。

2.2 断層地形における被害特性の分析

本地震において配水管被害が集中した地域の一つに、既存活断層周辺地域が挙げられる。配水管被害の分布を見ると既存活断層である渦ヶ森断層や会下山断層などを中心に、断層近傍での被害の集中が目立つ。ここでは、会下山断層周辺の地域に着目して、断層周辺地盤と配水管被害の関連についてさらに詳しく考察し、断層周辺地盤の地震被害特性について考察を行う。

分析対象地域は、会下山断層周辺の約2km四方の地域である。対象地域における断層位置と配水管被害位置を図-3に示す。図から、北側を東西に走る長田断層と南側を走る会下山断層に挟まれた地域や会下山断層の南側において配水管の被害が集中してみられる。図-4に最近傍断層までの距離と配水管被害率との関連を示す。断層距離が100mまでの範囲は20mごとに、300mまでは50mごと、1000mまでは100mごとの管路総延長と配水

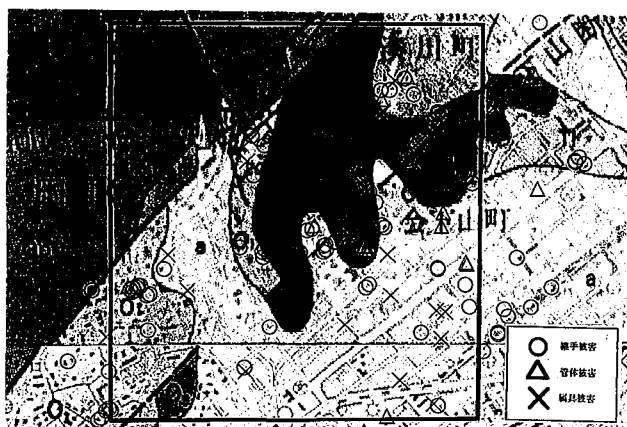


図-3 分析対象地域と配水管被害位置

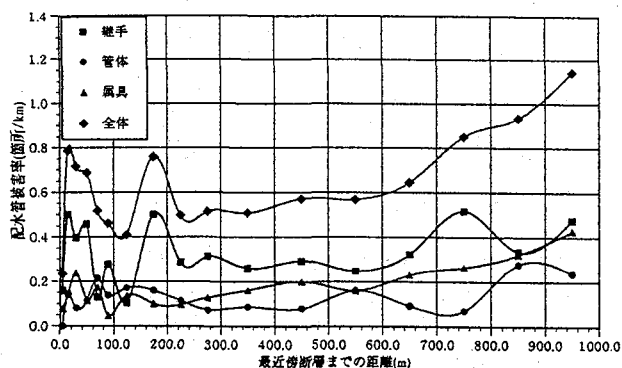


図-4 最近傍断層までの距離と配水管被害率

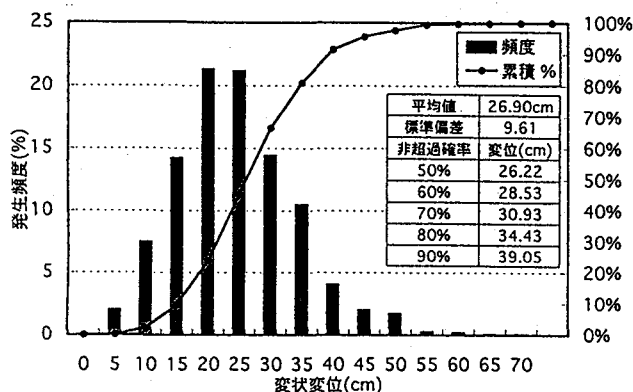


図-5 地盤の変位変位の頻度分布

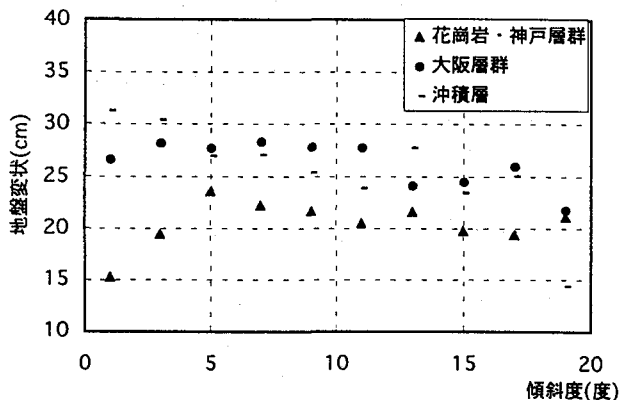


図-6 傾斜度と地盤変位との関連

管被害率を算出した。

継手被害は断層直上と断層から200m、700mの地点で被害率が高く、管体被害は断層から200m、550mの地点でピークを生じており、属具被害は断層からの距離が700mの地点において被害率が高くなっている。この地域は会下断層と長田断層が平行して存在する地域であり、両断層間の距離は約700～800mである。これらの被害のうち断層からの距離が200m～300mのものは、その多くが両断層に挟まれる地域において被害を生じているものであり、断層に挟まれた地域において被害が多発していることが知られる。断層に挟まれた地域では、断層周辺に特有な地盤の特色として、傾斜地であること、地質・地形分布が複雑で多種の地盤が混在すること、断層面の影響による地震動の増幅現象の可能性のあることなどから、被害率が高くなるものと考えられる。

次に、対象地域における変位変位の頻度分布を図-5に示す。断層地形であるこの地域の地盤変位は約30～40cm程度であったといえる。地盤変位の原因として斜面の状況や地質、地形など様々な要因が考えられる。ここでは傾斜度や地質分類と地盤変位との関係について考察する。まず、傾斜度と地盤変位との関連を図-6に示す。図-6からは傾斜度と地盤変位との相関性はそれほど見受けられなかった。この主な原因として、比較的傾斜が緩やかな地域においても河川部付近などの地形的影響や軟らかい地質などの影響により地盤変位が大きくなったことなどが挙げられる。次に、地質分類別平均地盤変位との関

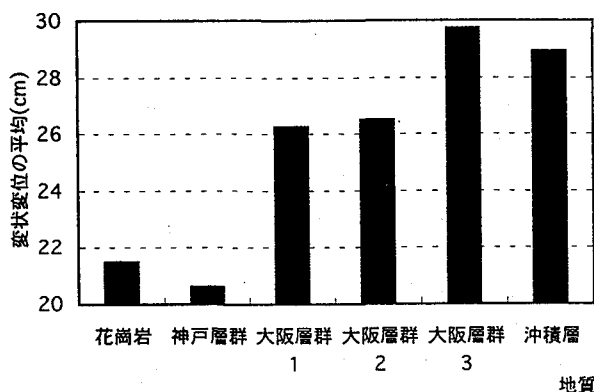


図-7 地質分類別平均地盤変位との関連

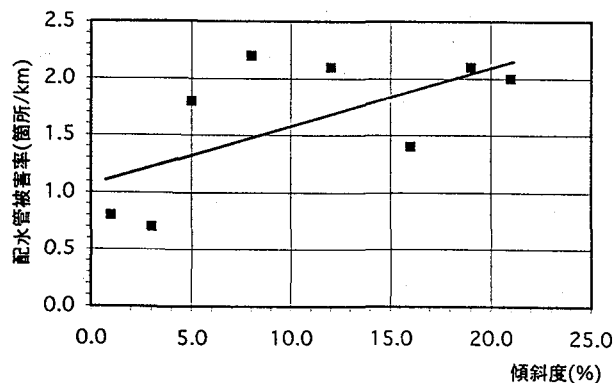


図-8 傾斜度と配水管被害との関連

連を図-7に示す。図から花崗岩や神戸層群などの堅固な地盤と大阪層群や沖積層などの地盤とは、明らかに地盤変状の大きさに違いがあることがわかる。さらに、傾斜度と配水管被害率の関連を図-8に示す。図より、傾斜度が高くなるにしたがって配水管被害率が増加している傾向にあることがわかる。とくに傾斜度が5%以上の地域においては5%未満の地域と比較して、配水管被害率が顕著に高くなっていることが知られた。

3. 埋立地、断層地形の地盤ひずみと配水管被害

兵庫県南部地震において、埋立地であるポートアイランドと断層地形である会下山地域における地盤の永久変位より、表層における地盤ひずみの推定を行い配水管被害との関係について分析を行った。

ポートアイランドの永久変位としては、濱田、磯山、若松により作成されたポートアイランドにおける表層地盤の永久変位ベクトル図を使用する⁴⁾。一方、会下山断層周辺地域においても著者らが地震前後の航空写真測量より50mメッシュ毎の変状変状図、主ひずみを算出した。表層地盤の主ひずみ分布の推定には、有限要素法のアルゴリズムを応用し、変位図の1つのベクトルの始点を1つの節点とした4節点アイソパラメトリック要素を作成し、各要素内の任意の点におけるひずみを推定した。ひずみを算出する任意点としては、ポートアイランド内の50mメッシュを使用し、これらのメッシュにおける主ひずみとその方向の算出を行う。このひずみの算出手法は、地盤の永久変位よりひずみを求めるものであり、その計算において地盤のクラックなどの破壊現象は考慮していない。

ポートアイランドにおける配水管被害概要を表-2に示す。表よりポートアイランドの配水管被害は管種につい

表-2 ポートアイランドにおける配水管被害概要

管種	口径	被害モード	被害状況	管種	口径	被害モード	被害状況
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	200	継手(A型)	抜け
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	200	継手(A型)	抜け
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	200	属具	損傷
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	300	仕切弁	切り込み
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	200	消火栓	切り込み
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	200	仕切弁	切り込み
DIP	300	消火栓	損傷	DIP	200	継手(A型)	抜け
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	300	継手(A型)	抜け
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	150	継手(A型)	抜け
DIP	300	継手(A型)	抜け	CIP	300	継手(A型)	抜け
DIP	300	仕切弁	切り込み	DIP	300	継手(K型)	抜け
DIP	200	仕切弁	切り込み	CIP	300	継手(K型)	抜け
SP	600	継手	抜け	DIP	300	管体	損傷
SP	600	継手	抜け	DIP	200	継手(A型)	抜け
DIP	300	仕切弁	切り込み	DIP	300	継手(A型)	緩み
DIP	600	空気弁	損傷	DIP	300	継手(A型)	抜け
DIP	600	管体	圧屈	DIP	300	継手(A型)	緩み
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	300	継手(A型)	抜け
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	300	継手(A型)	抜け
DIP	300	継手(A型)	緩み	DIP	300	継手(A型)	損傷
DIP	300	継手(K型)	緩み	DIP	300	消火栓	破損
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	200	継手(A型)	破損
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	300	継手(A型)	損傷
DIP	200	継手(A型)	抜け	DIP	300	仕切弁	切り込み
DIP	300	継手(A型)	抜け	DIP	300	継手(A型)	抜け

てはほとんどがDIPの被害であり、被害モードはA型もしくはK型継手の抜けによる被害がほぼ8割を占めている。ポートアイランドにおける推定した地盤の主ひずみと配水管被害位置を重ねたものを図-9に示す。図-9より、本地震によりポートアイランドでは岸壁を中心としてほぼ全域にわたり0.5%以上のひずみを生じていることがわかる。とくに岸壁においてはその崩壊の影響も含めて大きな地盤ひずみの発生がみられる。また、島内部の居住地域においては岸壁付近のような崩壊に伴う大きなひずみはみられないものの、全域において0.5%程度のひずみが発生し、大きなところでは3%程度のひずみも生じていることが知られた。これらは、ポートアイランドの全域で噴砂が確認されていることから、明らかに液状化によ

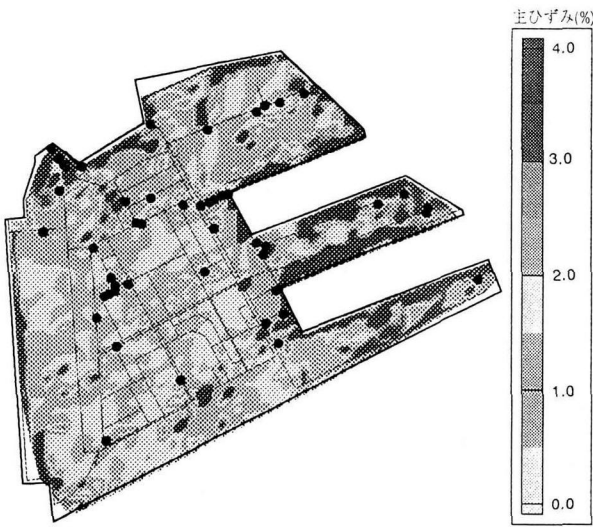


図-9 推定した地盤の主ひずみと配水管被害位置
(ポートアイランド)

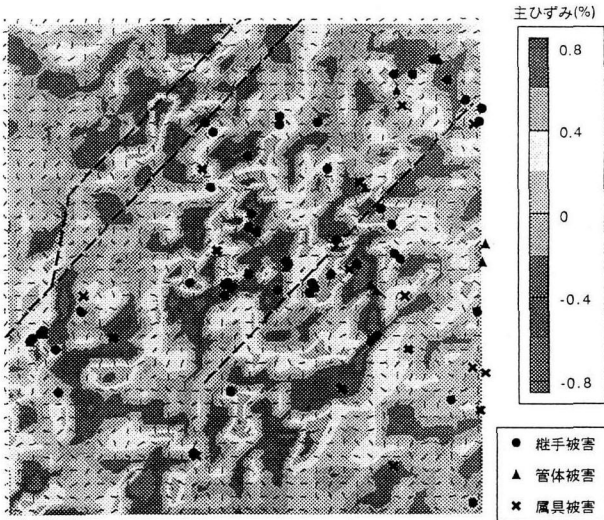


図-10 地盤の主ひずみ分布と配水管被害位置
(会下山断層付近)

る影響であると考えられ、島内部においても大規模な液状化により、部分的に大きなひずみが発生していることがわかる。また、上水道配水管被害との関連をみると、配水管被害は岸壁付近には集中して生じていないことがわかる。これは、岸壁が一様に海側に向けて崩壊したことにより、その周辺では岸壁と垂直な方向に地盤の流動が生じたため、岸壁に沿って平行に配管されている配水管の軸方向へのひずみの発生がなかったからである。また島内部における配水管の被害位置をみると、主ひずみの分布が周辺よりも高いところで被害が発生していることがわかる。とくに居住地域においては、主ひずみが1%~2%のところで被害が多発しており、配水管被害が大規模な液状化に伴う地盤の流動によりひずみの集中した場所において発生することが示された。

一方、会下山断層付近における地盤の主ひずみと配水管被害位置を図-10に示す。配水管被害位置の分布は長田断層と会下山断層に挟まれた地域および会下山断層の南側において非常に多く分布しているのがわかる。地盤の主ひずみが大きな地域もまた、これらの断層周辺部において顕著に見られ、地盤の主ひずみが他の地域に比べて大きな地域において配水管被害が顕著であるのがわかる。さらに、図-9と図-10を比べてもわかるようにポートアイランドでは地盤の液状化に伴う側方流動によって護岸周辺が海側に変位することによって島内の主ひずみはほとんどすべての地域におい主ひずみは引張側であるが、会下山断層周辺地域においては地表面の傾斜の影響や地質の不均一さなどの影響により、圧縮側・引張側の両方の主ひずみが分布している。また、両地域における主ひずみは、大きな差があり、ポートアイランドでは大きいところで主ひずみが3%以上であるのに対し、会下山断層周辺においてはせいぜい1%程度と、全体的な主ひずみの分布においてはポートアイランドの方が大きい。これは液状化による側方流動などにより最大数メートルの地盤変位を生じたためと考えられる。

次に、ポートアイランドにおける管軸方向引張ひずみと配水管被害率との関係を図-11に、会下山地域における管軸方向引張ひずみと配水管被害率の関係を図-12に示す。ポートアイランドと会下山断層周辺とでは埋設されている配水管路の管種や継手などが違うため一概には言えないが、両者ともに概ね正の相関があることは、図から読みとることができる。ポートアイランドにおいては液状化に伴う側方流動や不等沈下によって生じた地盤ひずみであり、会下山においては断層地形による傾斜や地質の不均質あるいは断層運動によって生じた地盤ひずみである。しかし、同程度の地盤ひずみに対しては同程度の管路被害率となっていることは注目に値する。両者におけるデータを統合して、管路に沿う地盤引張ひずみ(ε)と管路被害率(α)の関係を求めると $\alpha=2.66\varepsilon+0.24$ となる。ただし、被害モードについては継手被害および管体被害を考慮した。

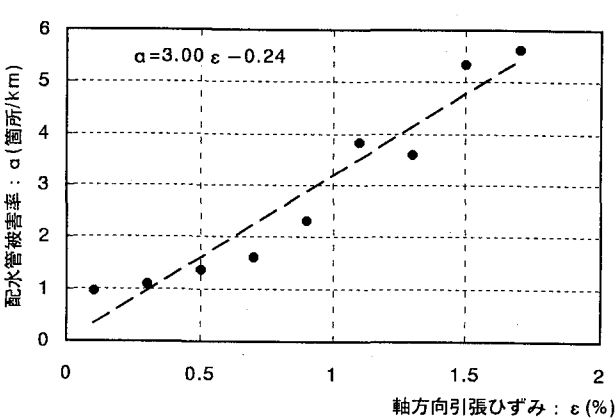


図-11 管軸方向引張ひずみと配水管被害率との関連 (ポートアイランド)

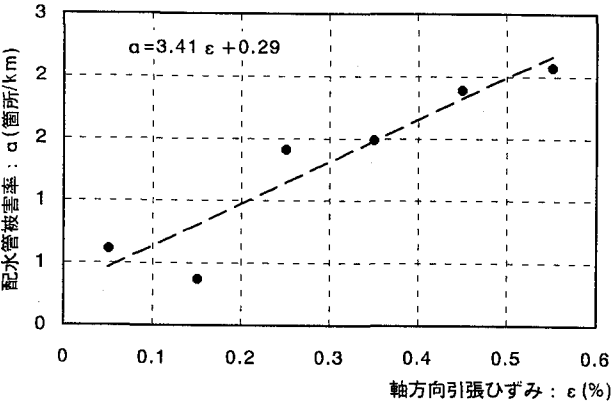


図-12 管軸方向引張ひずみと配水管被害率との関連 (会下山断層付近)

4. 活断層付近の永久変位を受ける地中管路の挙動

4.1 解析モデルと諸条件

断層地形である長田・会下山断層周辺において配水管の被害が顕著であった箇所を選定し、管路地震応答計算プログラム(ERAUL)で解析を行い、変位を受ける地盤での管路挙動の把握を行い、実際の被害と比較・検証を行った。解析モデルは図-13に示すように、3次元の配管とし、地盤変位データがある道路下に埋設されていると仮定して解析を行った。解析ケースとしては、表-3に示すようにcase1として継手なしの溶接鋼管、case2としてねじ継手を有するねじ管、case2の継手部分が耐震継手SⅡ型を有するcase3の3ケースについて実施した。なお、継手は概ね5m間隔で配置した。入力に用いた地盤の永久変位分布を図-14に示す。

表-3 解析ケース

	解析条件
case1	溶接鋼管 (継手なし)
case2	ねじ管、ネジ継手
case3	case2に耐震継手(SⅡ型)

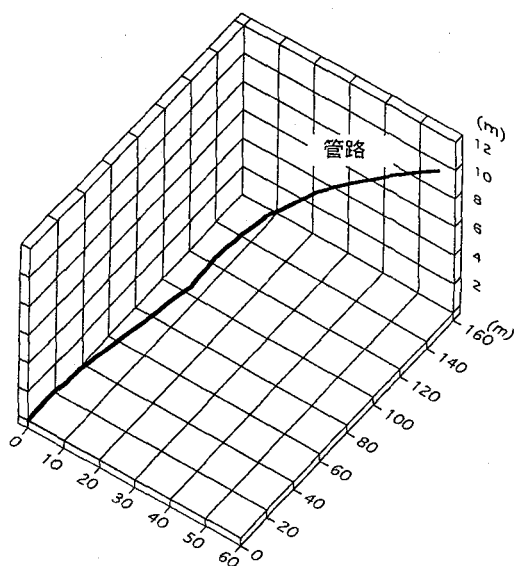


図-13 解析モデル

4.2 解析結果

まず、case1の溶接鋼管の継手部なしにおける解析結果について図-15示す。図の×印は管軸方向に沿った配水管の実際の継手被害位置をプロットしたものであるが、管路のひずみがその他の地域より顕著に大きくなっている位置と配水管継手被害位置と概ね一致していると思われる。しかしながら、解析における管路の最大ひずみは0.12%であり、case1に用いた溶接鋼管の許容ひずみ0.77%を大幅に下回っており、今回解析に使用したφ200の溶接鋼管では既存の活断層付近の地盤ひずみ程度においては破壊を生じないものと推定される。

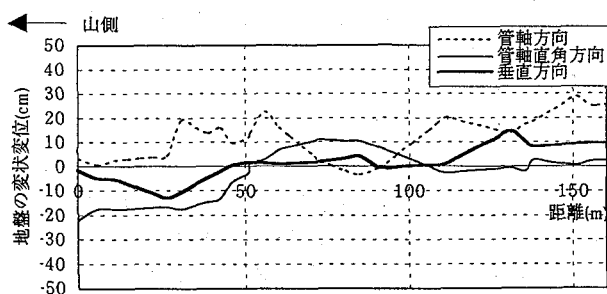


図-14 地盤の永久変位分布

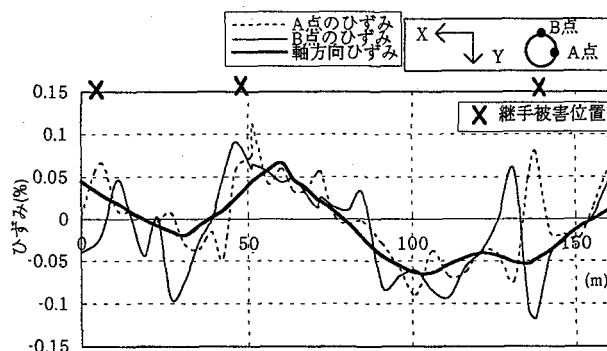


図-15 管路ひずみ分布図（溶接鋼管・継手なし）

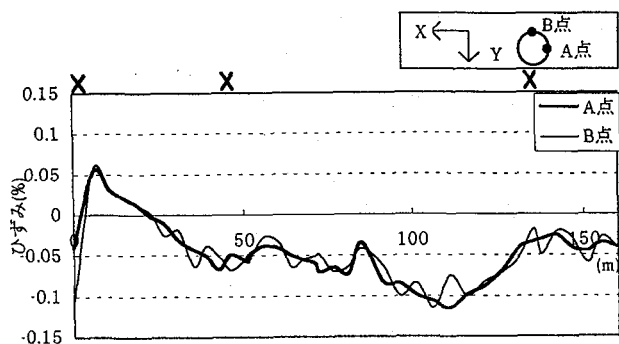


図-16 管路ひずみ分布図（ねじ継手）

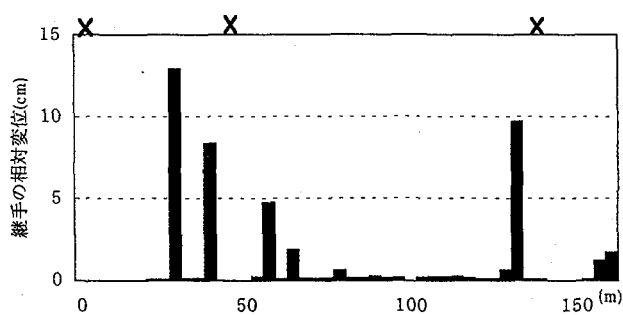


図-17 継手の相対変位（ねじ継手）

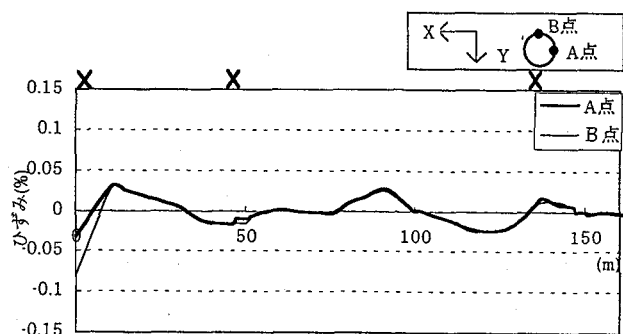


図-18 管路ひずみ分布図（SII形継手）

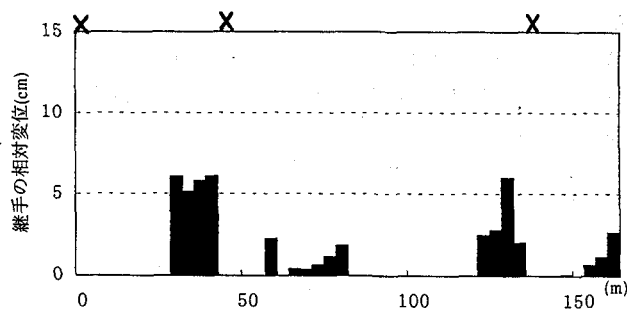


図-19 継手の相対変位（SII形継手）

次に、case2（ねじ鋼管のねじ継手）における管路のひずみ分布図を図-16に継手相対変位量を図-17に示す。結果より管体自体のひずみは大きくないものの、被害のあった箇所において継手の抜けの変位が非常に大きくなる傾向にあるのがわかる。実験によるデータからも、ねじ接

合部自身は2mm程度で抜けや破断が生じ、接合部の引張荷重強さが管体強度に比べて非常に小さく、地盤の変位量が多い場合には管体より先に継手部分に被害が生じると考えられる。実際に解析結果の継手伸縮量が多いところにおいて今回の配水管継手被害があったことからこのことは明らかである。

さらに、case3のSⅡ形継手を使用した場合における管路のひずみ分布図を図-18に継手相対変位量を図-19に示す。case2のねじ継手を使用した場合の継手伸縮量と比較すると継手部分の相対変位が一部分に集中せず分散することによって継手の最大変位量が6cm程度に低減された。今回用いたSⅡ形耐震継手の許容拔出し量は6cmであり、地盤変状が局所的に不均一な断層地形に対しては、耐震継手を使用することにより管路被害の軽減となりうることが解析結果からも知られた。

5. まとめ

今回の検討結果をまとめると、次の内容に整理することができる。

①配水管被害においては局所的な地盤特性が非常に大きく影響しており、地質・地形分類における配水管被害との関連の分析より、大阪層群や比較的古い時代の扇状地において継手被害が多発しており、沖積地盤においては属具被害が多く生じていることなどわかった。

②既存活断層である長田・会下山断層周辺部は、断層地形や傾斜地形、地質の不均一さなどの影響により配水管に大きな被害を生じる傾向があり、変位変位によって発生した地盤の主ひずみが配水管被害と深く関連していることが知られた。

③埋立地であるポートアイランドと断層地形である会下山断層周辺地域と比較すると、主ひずみの大きさにかなりの違いがある。また、埋立地においては圧縮ひずみがほとんど生じていないのに対し、断層地形においては圧縮ひずみが大きく生じていることが分析結果から明らかとなった。

④液化地盤あるいは断層地形に関らず、生じた地盤ひずみ(%)と配水管被害率(箇所/km: α)との関係は以下のようなものである。

$$\alpha = 2.66 \varepsilon + 0.24$$

⑤長田・会下山断層周辺における地中管路のモデル化による解析より、継手なしの溶接鋼管の場合には管路に最大ひずみが発生する位置と実際の配水管被害との位置がある程度一致したため、地盤の永久変位と配水管被害との間には関連があることや、継手を有する地中管路においては、地盤の永久変位により地盤と管路の相対変位が継手部分に集中することが明らかとなり、これらの部分において管路被害が起こりうることが解析結果からも知られた。

⑥地盤変状が局所的に不均一な断層地形に対しては、他の継手より地盤変状に追従できる耐震継手を使用することにより管路被害の軽減となりうることが解析結果からも明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，pp.1～4，1998.5
- 2) 日本水道協会：阪神・淡路大震災水道管路被害の概要，pp.1～48，1995
- 3) 前田俊宏：GISによるライフライン被災分析と地域地震防災性に関する研究，神戸大学大学院自然科学研究科修士論文，pp.11～34，1997.3
- 4) Hamada M., Isoyama R. and Wakamatsu K.: The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, 1995.
- 5) 地質調査所：地質図縮尺1/50000，図幅名「大阪西北部」「神戸」「須磨」「明石」「洲本」，1983～1984
- 6) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 1997年度版，pp.19～27，1997.3
- 7) 神戸大学工学部建設学科土木系教室 兵庫県南部地震学術調査団：兵庫県南部地震緊急被害調査報告(第2報)，pp.1～41，1995
- 8) 波田重熙，平野昌繁：断層の活動と変位地形-甲陽断層を中心として-，京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第18号別刷，pp.56～65，1996.3

(1997年9月26日受付)