

地中管路の簡易耐震診断チャートの構築

Development of Conventional Seismic Diagnosis Chart of Underground Pipeline

土岐 憲三・高田 至郎・楯田 泰子・砂坂 善雄・山崎 修一

Kenzo TOKI, Shiro TAKADA, Yasuko KUWATA,

Yoshio SUNASAKA, Syuichi YAMASAKI

1. はじめに

本研究は、文化財地区における地震時の延焼防止のために、文化財地区ならびにその周辺にある消火施設の耐震診断法を構築させることを目的としている。施設の耐震診断を行う場合、地上にある建造物や消火設備は目視により施設の劣化や損傷状況を確認することができるため、耐震上危険と考えられる施設に優先順位をつけて、詳細診断やその後の耐震補強にまでつなげることができる。しかし、消火施設の大部分は地中管路であるため、地中の施設状況を確認することができない。そこで、本研究は代表的な管路を対象にして、管路口径や形状(曲管、T字部の異形管)、地盤条件や地震外力による地中管路の応答への影響について分析するために地震応答解析を行い、解析結果を系統的に整理し、さらに耐震診断が簡便にできるように簡易耐震診断チャートの作成を行った。地中管路には、管路と管路が継手で連結されている継手構造管と溶接や熱融着によって管路が一体化されている一体管構造があるが、本稿では、継手構造管を例にして研究概要とその結果について報告する。

2. 異形管部を含む地中管路の地震応答

本研究で用いる解析プログラム ERAUL¹⁾は、管路を弾性床上的のはりとしてモデル化しており、応答変位法により解を導いている。管路には、管軸方向に地盤と管路との間のすべりを考慮した地盤ばねと、管軸直角方向に地盤拘束力を表す地盤ばねが配されており、管路の材料非線形性だけでなく、地盤ばねの非線形性についても考慮できる。継手部は、非線形特性を有する軸方向ばねと回転ばねを用いることで複雑な継手のメカニカル特性を解析に反映させることができる。管路系については、管路はり継手ばねによって曲管やT字管を自在に配置した3次元配管もモデル化することができ、外力には、地盤変位の他、液状化等による浮力も与えることができる。

管路網での地震応答特性を分析する前に、異形管単独の地震応答特性について検討を行う。直管、90度曲管、T字管を対象にして、図1に示すように検討する曲管・T字管の端部にそれぞれ3本の直管を連結させた管路モデルを設定した。管路はダクタイル鋳鉄管、継手は全てK形継手で設定した。口径はφ100、φ200、φ300mmまでの3種類を用いた。表1に本研究で用いる管路の材料特性を示す。また、図2、図3にK形継手の口径別継手引張特性、曲げ特性を示す。90度曲管、T字管は、規格²⁾の管路を用いており、直管よりも管厚が大きく、曲がり部やT字の分岐部で線対称になっていないことが特徴である。管路は直管の場合1mごとの要素に分割し、局

所的な変形が考えられる曲管やT字管では10分割程度に分割した要素を用いている。本分割数は、波長からすると十分に細かい分割である。管路端部での応力集中を考慮しないように境界部はすべて自由端とした。

入力条件については、水道施設耐震工法指針³⁾に基づいて表2に示す地盤及び地震波動諸元を設定した。地盤すべりのばねは相対変位0.2cmで、地盤拘束のばねは相対変位2.6cmで降伏する非線形特性を有する。入力レベルについては地震動レベル1に相当する24cm/s、地震動レベル2に相当する100cm/s、その間の50cm/sの地盤応答速度を用いた。

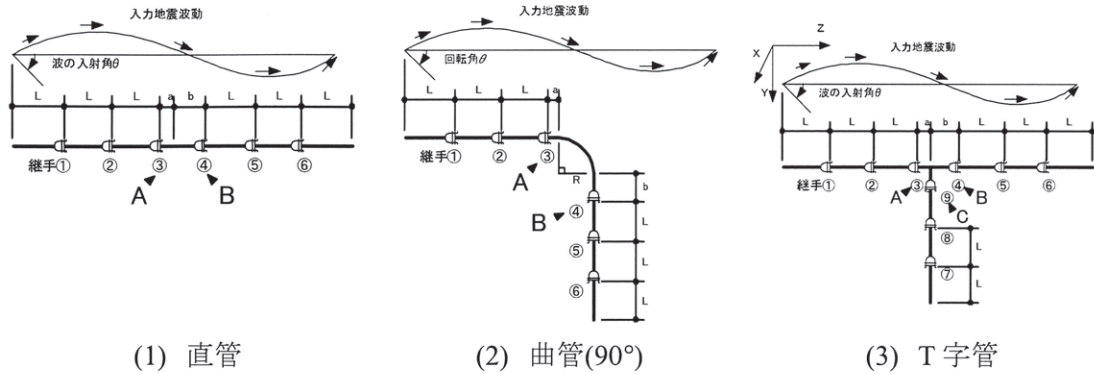


図1 管路モデル図

表1 口径別部材諸元²⁾

口径	φ100	φ200	φ300
L(mm)	4,000	5,000	5,000
a(mm)	42	43	47
b(mm)	150	200	250
直管外径D(mm)	117	220	323
直管管厚t(mm)	8	8	8
曲管外径D'(mm)	117	220	323
曲管管厚t'(mm)	9	11	13
弾性係数E(kN/mm ²)	1,600,000		
引張強度σt(N/mm ²)	420		

注:T字管は直管同様に設定している

表2 地盤及び地震波動諸元

地盤種別	Ⅲ
Vs(m/s)	100
Kg1(kN/cm ²)	2.6
Kg2(kN/cm ²)	5.1
固有周期TG(s)	1.0
波長(m)	153.9
地震波速度C(m/s)	150

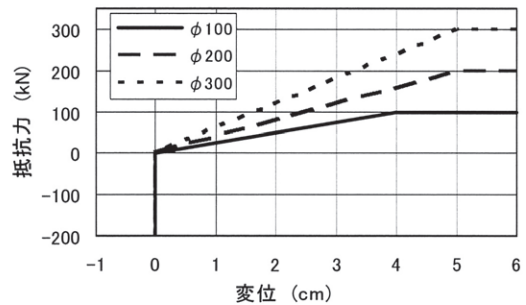


図2 口径別継手引張特性

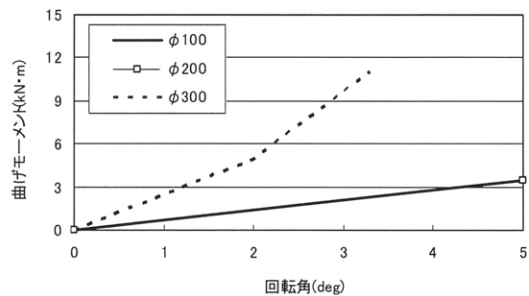


図3 口径別継手曲げ特性

異形管の地震応答特性を分析するにあたり、設定された解析モデルに対して、地震波動の入射角、位相をランダムに与えた解析ケースを用いた。さらに、試行ケースの中から、曲管の両端の継手、T字管の3つの継手の伸縮応答変位と回転応答角に対するそれぞれの許容変位(角)の比率をA(%)として下式で定義し、試行ケースの中で最大のAを「応答比率」として応答特性の指標とした。また、同口径の直管の応答比率に対する異形管の応答比率を「応答特性値」として異

形管の特性を評価した。なお、試行回数については別途検討して、応答比率の値が安定する 500 回が妥当であるとして、それぞれの検討ケースで解析を行った。

$$A = (R_p / T_p) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 R : 継手の応答値、 T : 継手の許容値、 p : 変位の種類 (縮変位及び回転角)

ここで、K 形継手の伸縮許容値は口径 $\phi 100\text{mm}$ の場合は 40mm 、 $\phi 200$ 、 $\phi 300\text{mm}$ の場合は 50mm とした。一方、回転の許容値は $\phi 100$ 、 $\phi 200\text{mm}$ の場合は 5 度、 $\phi 300\text{mm}$ の場合は 3.2 度とした。

全体的な応答傾向として、直管では継手の伸縮変位が回転角よりも卓越するが、曲管の両端継手では回転角の応答が卓越する。とくに、曲部に近い継手(A) (図 1 参照) でいずれも応答が大きくなる事が分かる。T 字管近傍の継手では、伸縮と回転ではいずれも同程度の応答が見られた。また、T の分岐部から腕の短い箇所の継手(A) で最も大きい応答を示すことが明らかになった。地盤ひずみと応答比率の関係を図 4 に示す。いずれも地盤ひずみに対して比例的に応答比率が高くなる。また、口径の小さい管路ほど同じ外力に対して応答比率は大きくなる事がわかった。また、直管に対する異形管の応答特性を比較するため、同口径直管の応答比率に対する異形管の応答比率の比を応答特性値として示したものが図 5 である。

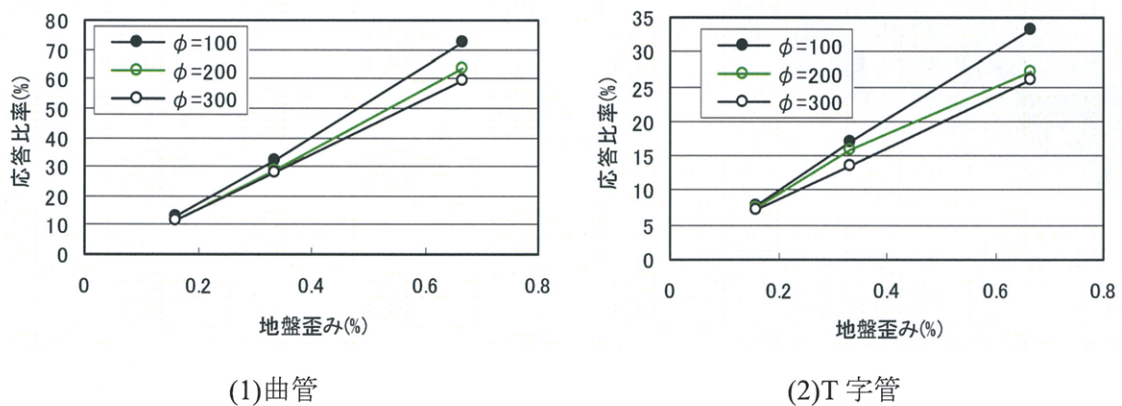


図 4 応答比率

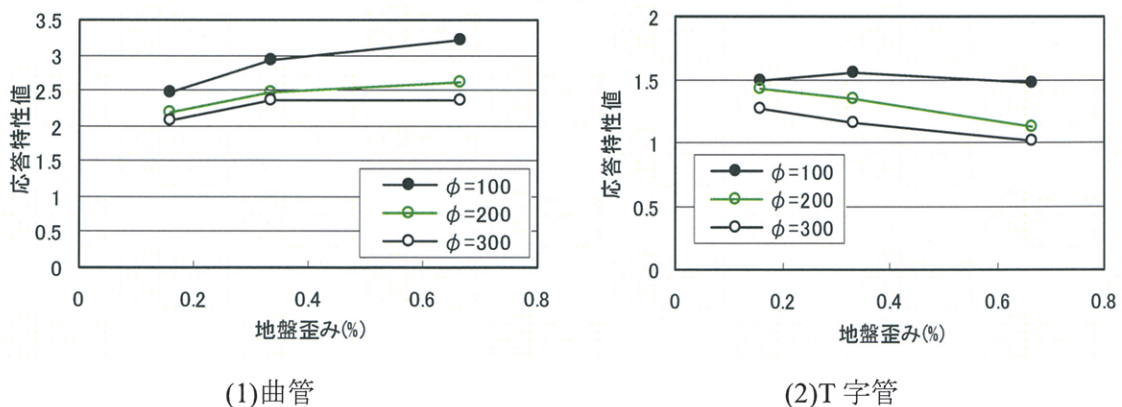


図 5 応答特性値

ここでも、口径が小さいほど、全体的に大きな応答特性値をもつことがわかる。曲管の応答特性値はφ300mmの時に2.3から2.8の間で分布しており、φ100mmであれば、最大3.3の値を示す。T字管ではφ200、φ300で約1.0~1.3の一定値を示し、φ100のみ約1.5の値を示す。曲管はT字管よりも大きな応答を示すことがわかった。

さらに、図1で示した異形管の配置が違う場合の検討や、管路網にした場合の応答の違いなどについても検討を行い、上記と同様に継手部の変位や回転量によって応答比率を検討した。これらの解析結果の詳細は参考論文4)にまとめている。また、本稿では継手構造管路で検討した結果を掲載しているが、別途、一体構造管路においても同様の検討を行っている。

3. チャート形式簡易耐震診断法の提案

2. の様々なケースの地震応答解析結果を用いて、簡易耐震診断チャートの構築を行う。本診断法は、想定される地震動に対して管路の形状や配管状況、敷設状況を踏まえ簡易的にチャートを用いて診断を行い、耐震補強・敷設替えの優先順位を決める診断方法である。診断は、ある区間の管路ごとに行うとする。また、診断結果はA、B、Cの三段階で評価される。評価のA、B、Cは表3の通りである。

表3 診断チャートの評価

評価	耐震性の状態と求められる対策
A	十分な耐震性を有しており、地震時に防火施設の機能を発揮することができる。
B	耐震性を有しており、地震時に管路内に防火用の水を確保することができる。すぐに補強等の対策を行う必要はないが、経年的な劣化等も考えられるので、定期的に診断することが勧められる。
C	想定される地震が発生すると、継手を有する管路では継手の許容変位を超えて抜けや破損が生じる。継手のない一体構造管路でも許容のひずみを超えて破損する。そのため、補強等の対策が急務である。

上述の解析結果から、水道管路の耐震設計指針³⁾に用いられる地盤ひずみに比例して直管φ100mmの応答比率も大きくなることが示され、さらに諸条件によってその応答比率は増減することが分かった。その影響について解析ケースごとにまとめ、口径・形状・地震動レベル・配管条件による影響の比率を整理した。さらに、本研究では地震波動について分析しているが、地震時には液状化や斜面地の地すべりによって被害が増大している。液状化による沈下や側方流動による地盤ひずみは1.0~2.0%程度と非常に大きい。そこで、兵庫県南部地震⁵⁾ならびに新潟県中越地震⁶⁾における管路被害から導出された管路被害予測式から液状化や地すべりによる管路被害の

補正係数を用いて地盤災害による影響を考慮することとした。

表4は本研究で提案する簡易耐震診断チャートを示している。本簡易耐震診断チャートは、補正係数を求める補正係数チャートと補正係数のレベルによる評価マトリクスによって構成されている。左側の表で補正項目①口径、②形状、③地震動レベル補正、④敷設状況、⑤地盤災害の5項目について管路の布設条件によって係数をそれぞれ選択し、さらに5つの係数を乗じることで補正係数*i*を決定する。本マニュアルの診断表は消火用水道管路によく用いられているダクタイル鋳鉄管(K形継手)に基づいて作成されているため、これ以外の管路については別途検討する必要がある。また、口径はφ100mm～φ300mmを対象としている。φ300mm以上の大口径の管路では、地震時の座屈等の複雑な応答が考えられるので、このような簡易な耐震診断法を用いるのは適当ではない。

次に、補正係数*i*の値によって適切な評価マトリクスを選択し、地震動レベルと地盤種別から耐震診断結果の評価を決定する。地盤種別については、水道耐震指針に基づいてⅠ～Ⅲ種地盤の3段階に分けた。Ⅰ種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤($T_G < 0.2$ 、 T_G は地盤の固有周期)、Ⅲ種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤($0.6 \leq T_G$)、Ⅱ種地盤はⅠ種地盤およびⅢ種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤($0.2 \leq T_G < 0.6$)と定義する。地震動レベルについては、本研究で検討した地盤応答速度24cm/s、50cm/s、100cm/sを基準にした。マトリクスの条件下で算出される最大の地盤ひずみに対して直管の管路の応答比率とその補正係数により管路の応答比率が算出される。ここでは、応答比率が50%未満についてはA、50%以上100%未満についてはB、100%以上についてはCの判定にすることとした。マトリクスの構築にあたって、波動による応答解析結果に基づいた評価については、二つ目までのマトリクス($i \leq 4.0$)で信頼性を担保させた。

表4 簡易耐震診断チャート(継手管路構造の場合)

補正係数チャート			
番号	補正項目	係数	評価値
①	口径	φ100	1.0
		φ200	0.9
		φ300	0.8
②	形状	直線部	1.0
		曲部	2.6
		分岐部	1.5
③	地震動レベル補正	$V < 24$	1.0
		$24 \leq V < 100$	1.0
		$100 \leq V$	0.9
④	敷設状況	異形部が連続しない	1.5
		異形部が連続する	1.0
⑤	地盤災害	地震動のみ	1.0
		液状化の恐れあり	2.4
		地すべりの恐れあり	4.0
補正係数 <i>i</i> (=①・②・③・④・⑤)		⇒	

評価マトリクス			
(1) $i \leq 1.0$			
地震動レベル(cm/s)	地盤種別		
	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種
$V < 24$	A	A	A
$24 \leq V < 100$	A	A	A
$100 \leq V$	A	A	A

(2) $1.0 < i \leq 4.0$			
地震動レベル(cm/s)	地盤種別		
	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種
$V < 24$	A	A	A
$24 \leq V < 100$	A	A	A
$100 \leq V$	A	A	B

(3) $4.0 < i$			
地震動レベル(cm/s)	地盤種別		
	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種
$V < 24$	A	A	A
$24 \leq V < 100$	A	A	A
$100 \leq V$	B	B	C

本簡易耐震診断チャートは、有継手管路(例えば、ダクタイル鋳鉄管)の他に溶接・熱融着により構造上一体化して継手を持たない一体構造管路(例えば、鋼管、ポリエチレン管)についても作成している。ただし、一体構造管路については鋼管をベースにした解析ならびに耐震診断チャー

トとなっている。今後は管路材質や継手の違いに対応できるようにチャートにも多様性を持たせる必要がある。

さらに、実際の使用においては、その地域で想定される地震動を用いることが前提となっており、文化財地区の位置とその地域で想定される地震動、地盤種別がリンクしたデータベースが構築されれば、本簡易耐震診断チャートが有効利用されると期待できる。

4. まとめ

本研究では、文化財地区ならびにその周辺にある消火施設の耐震診断法を構築させることを目的として、様々な条件における地中管路の地震応答解析を行い、さらに簡便に使用できるように耐震診断チャートの作成を行った。本研究は以下の通りにまとめられる。

- 地震応答解析によって管路網における曲管やT字管の応答特性が明らかになり、直管で構成されている管路に対して、曲管がある場合は3倍、T字管がある場合は1.5倍程度応答が大きくなることが示された。
- 想定される地震動と地盤種別、管路の埋設条件により、解析や計算を伴わない簡易耐震診断チャートを構築することができた。本チャートにより、管路耐震性の状態と求められる対策を3段階に評価することができ、耐震性についてさらに検討すべき管路の優先順位をつけることができる。
- 本解析で検討した管路以外の管路についても今後検討していく必要がある。
- 簡易耐震診断チャートが実用化されるには、診断場所で想定される地震動が分かっていることが前提となっている。今後、文化財地区の位置とその地域で想定される地震動、地盤種別がリンクしたデータベースが構築されれば、本耐震診断チャートの有効利用が期待できる。

参考文献

- 1) 高田至郎:ライフライン地震工学、共立出版株式会社、pp.56-62、1991
- 2) 日本ダクタイル鉄管協会:便覧、pp.256-269、2005
- 3) 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説、p.9、pp.17-18、pp.71-76、pp.291-301、1997
- 4) 鋏田泰子・山崎修一:複雑な地中管路網の地震応答解析、建設工学研究所論文報告集、第50号、pp.125-135、2008
- 5) 高田至郎・藤原正弘・宮島昌克・鈴木泰博・依田幹雄・戸島敏雄:直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究、水道協会雑誌、第798号、pp.21-37、2001
- 6) 鋏田泰子・高田至郎・勤息義弘・Javanbarg Mohammad Bagher:斜面地形による水道管路被害への影響評価～2004年新潟県中越地震の管路被害分析～、日本地震工学会論文集、第5巻、第4号、pp.1-14、2005