

既設埋設管路の耐震性評価方法の検討事例

(株)日水コン ○小林 寛弥 網村 篤士

わが国の水道管路を耐震化率 100%にするには、長期間を要すると想定されているため、効率的な管路の耐震化の実施が求められている。それには既設管路の耐震性能を適切に評価し、更新の優先順位を決定することが重要である。ただし、K 形ダクタイル鋳鉄管路のように、地盤の状況によっては耐震適合管路となり得る管路であっても、耐震計算等の検討を実施せず更新対象としている事例が多いと考える。本稿では、一次元の地震応答解析を実施するなど、より詳しく耐震計算を実施した結果、K 形管路が耐震適合性ありとみなすことができた事例および耐震性評価における留意点などについて整理した。

Key Words : 埋設管路、管路耐震化、地盤の地震応答解析、耐震診断

1. はじめに

令和 2 年 12 月に閣議決定された「防災・減災、国土強靱化のための 5 年加速化対策」では、基幹管路において 2025 年度末の耐震適合率を 54%に引き上げることにしているが、耐震化に要する費用確保が困難なことや技術職員不足など、水道事業が抱える慢性的な課題を要因として、長期間を要することが想定されている。

そのため、効率的かつ効果的に耐震化を進める必要があり、その方法の一つとして、従来用いられている方法より詳しく既設管路の耐震性能を評価し、より合理的に耐震化対策の優先順位を設定することが考えられる。このようなことから K 形ダクタイル鋳鉄管路（以下、K 形管路と称す）のように、条件によっては耐震適合性ありと判定できる管路については、詳しく耐震性能を評価し、耐震化する管路を見極めることが非常に重要であると考えられる。

実務において、市街地に布設されている送配水管路のような延長が長い管路では、地盤状況、液状化危険度、布設年度、継手形式等から定性的に耐震性を評価することがほとんどである。2009 年版の耐震指針では応答変位法による耐震計算事例が示されていたが、直管が無制限に継続する形態での解析事例であり、異形管や各種弁類、ならびに弁きょう・弁室類を具体的に考慮した事例ではない。そこで、設計実務において比較的簡単に対応できる範囲で、できるだけ詳しく耐震性を評価する方法を提案する必要性は高いと考えた。

2. 耐震性の評価方法について

2.1 基本方針

既設管路の耐震性の評価方法として、従来は耐震適合性ガイドブックによる手法（表-1 の

手法③) や指針の方法 4 を用いた耐震計算による手法 (表-1 の手法②) が適用されている。

特に、ダクタイル鋳鉄管での布設延長で大勢を占める K 形管路の場合、手法③である K 形継手等を有するダクタイル鋳鉄管の耐震適合性支援ガイドブック [1] の全国地盤判定マップ等を用いて耐震計算は実施せず、定性的に耐震適合性のある管路 (以下、耐震適合管路と称す) であるか判定していることが多い。

ただし、柔構造である K 形管路は、手法③により耐震適合性なしと判定される場合でも、手法①や②のように、耐震計算を行うと耐震性あり、もしくは更新優先度が低いと判断できる場合が考えられる。一方、このような耐震計算を行うことにより手法③では見落としがちな局所的な弱点を把握できる可能性がある。

また、手法②は、耐震工法指針に沿って耐震計算は実施するものの、計算結果を大きく左右する地盤変位量は、耐震工法指針の全国画一的な標準値 (方法 4 : 速度応答スペクトル) を用いており、液状化の影響も考慮できていない。

加えて、地盤条件も地盤種別で大別し設定するなど、必ずしも実際の地震条件や地盤条件を詳しく考慮しているとは言い切れない。

このような従来の手法における課題などを踏まえ、本検討においては、表-1 に示す手法①を提案し、手法②や③と比較解析を行い提案手法の有効性などを考察した。

表-1 既設管路を対象とした耐震性評価の提案手法と比較手法の概要

	①提案手法	比較手法	
		②指針の方法4を用いた耐震計算による手法	③耐震適合性ガイドブックによる手法
評価対象	K 形継手管路路線 (部分的に K 形 (剛) 継手を含む) の継手伸縮量と屈曲確度		地盤条件による K 形継手等を有するダクタイル鋳鉄管の耐震適合性評価
管路の評価方法	応答変位法による定量評価 (ただし、液状化地盤は対象としない)		考慮しない
K 形継手の考慮方法	K F 形継手は変位しない剛継手として、隣接する K 形継手部に変位を集中させる。		考慮しない
空気弁・消化栓の評価方法	空気弁や消化栓設備と弁きよとの離隔について地盤の応答変位量との比較により定量的に評価する		評価しない
地盤変状の考慮方法	地形や地盤条件などから、地滑りや地盤の側方移動の可能性がある管路区間は、耐震計算は実施せず、定性的評価により N G とする。		考慮しない
応答変位量の算定方法	対象地点の地盤調査結果を用いた 1 次元地盤モデルの地震応答解析 (R-O モデル) により設定。	指針 : 方法 4 の速度応答スペクトルより算定。 (対象地点の地盤種別考慮)	算定しない
設計地震動 (レベル 2 地震動)	対象地点において想定されている直下型と海溝型地震の地震動 (時刻歴波形)	指針 : 方法 4 の速度応答スペクトルより算定。 (対象地点の地盤種別考慮)	評価しない。

2.2 提案方法の内容

ここでは、表-1 に示す手法①の内容や比較解析の条件などについて示す。

1) 評価項目

近年の地震による被災事例では、継手部からの漏水 (抜け出し・脱管) による被害が多く、ダクタイル鋳鉄管の管体自体の破損による被害事例は数例しか報告されていない。

よって、既設管路の耐震性を評価する場合、継手部の変形性能に対しての評価が非常に重要であると言えるため、この評価方法について検討する。

2) 地盤変位の評価方法

地震時における継手の伸縮量と屈曲角度の照査は、応答変位法を用いて実施することが一般的である。応答変位法による管路の耐震計算においては、地盤の変位量が計算結果を大きく左右するが、一般的には、表-1 に示す手法②のように耐震指針に示されている方法 4

の速度応答スペクトル^②から地盤の変位量を設定することが多い。

ただし、この応答スペクトルは、工学的基盤面より上部の地表地盤の振動特性を便宜上、3種類の地盤種別に区分したものであり、検討対象管路の固有条件である地層構成などを詳しく反映できない。また、地盤は非線形特性により、大きな変位を示す場合があるが、その影響を詳しく考慮できていない。さらに、この応答スペクトルは兵庫県南部地震の観測記録を基に設定されたものであり、検討対象管路の固有条件である、設計地震動の特性（振幅、周期、位相など）を反映できない。

以上から、提案手法については、地盤変位量の算定にあたって、できるだけ対象管路の固有条件を反映した耐震計算として、耐震指針 2022 年版でも算定例が示されている 1 次元地盤の地震応答解析を行うこととした。

地震応答解析の地盤モデルの設定においては、地盤モデルの地層構成、層厚、N 値、地下水位は、周辺の既往ボーリング調査結果より選定した代表ボーリングの土質柱状図に基づいて設定し、各地層の単位体積重量 γ 、細粒分含有率 F_c も土質試験結果の平均値を採用した。

	深度 GL-(m)	柱状 図	地層	層厚 H(m)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	N値	せん断弾 性波速度 Vs(m/s)	動的ポア ソン比 μ	細粒分 含有率 Fc(%)	モデル化
①	1.40	[Pattern]	As	1.40	18.0	2.0	119	0.40		R-O
②	1.70			0.30	14.0	2.0	15	0.40		R-O
③	▽ 4.30	[Pattern]	As	2.60	19.0	15.6	184	0.40		R-O
④				7.00	2.70	19.0	15.6	184	0.49	10.0
⑤	8.20	[Pattern]	Ac	1.20	14.0	0.1	120	0.49		R-O
⑥	9.80			1.60	18.0	3.0	130	0.49	30.0	弾塑性
⑦			基盤 Dig		20.0		334	0.49		

図-1 地盤条件とモデル化の例（送水管 C）

また、各地層のせん断弾性波速度 V_s と動的ポアソン比は PS 検層結果を採用することになるが、PS 検層を実施していない場合は、N 値による推定値とした。耐震解析上の基盤面は、N 値 50 以上またはせん断弾性波速度 $V_s=350m/s$ 程度以上の地層上面に設定し、基盤面より上部の地層の内、地下水面以下の砂質土層は液状化対象土層の判定を行った。

液状化土層については、液状化にともなう地盤の変形量を評価するために、繰返し载荷中に発生するある程度のひずみレベルまで再現できる砂の構成式として、繰返し弾塑性モデル（岡モデル等）で表現することとし、地震応答解析は「LIQCA^[3]」による時刻歴応答解析とした。地下水面以上の地層と非液状化層の地層については、R-O モデルにより表現した。R-O モデルのパラメータは、旧建設省土木研究所の提案式^[4]を参考にし、設定を行った。また、弾塑性モデルのパラメータ（地盤の入力物性値）については、砂層・N 値等による液状化強度の推定値と要素シミュレーション解析によるフィッティング作業を行い、適当なパラメータの設定を行った。地盤条件とモデル化の例を図-1 に示す。

3) 耐震計算における地盤の不均一性の考慮

対象地盤において地盤の不均一性（不整形性）が高い地盤や地盤条件の変化域に管路被害が集中することも考えられることから、基準地盤歪みに表-

表-2 地盤の不均一度係数

不均一の程度	不均一度係数	地盤条件
均一	1.0	洗積地盤、均一な沖積地盤
不均一	1.4	層厚の変化がやや激しい沖積地盤、普通の丘陵宅造地
極めて不均一	2.0	河川流域、おぼれ谷などの非常に不均一な沖積地盤、大規模な切土・盛土の宅造地

2 に示す地盤の不均一度係数を乗じることで地盤歪みの増幅を考慮した。

4) 管路形態の考慮方法

今回の対象管路は K 形継手のほか、異形管部など不平均力が作用する箇所にも KF 形継手

が使用されていた。剛継手である KF 形継手は、剛結することで変位を抑制する形式であるため、KF 形継手部については、一体管路と捉えることができる。

そこで、手法①では、KF 形の継手部に対する伸縮量および屈曲角度の評価は行わないものとした。ただし、KF 形継手の管路区間に K 形継手がある場合、KF 形継手は変位しないため、K 形継手部に周辺地盤の変位に伴う継手変位が集中し、変位量が大きくなることから、手法①では、耐震計算を行うにあたっては、このような管路形態により K 形継手部に変位が集中することを考慮した。

また、K 形管路には不平均力対策として特殊押輪が設置される場合があるが、特殊押輪が設置された継手は屈曲や伸縮が可能であるため、剛継手の区間には含めないものとした。

5) 空気弁・消火栓の評価方法

過去の埋設管路の被害では、空気弁部や消火栓への分岐管に設置されるフランジ継手の被害が多いが、これらの一般的な評価方法は確立されていない。しかし、対象管路の耐震性を評価する上では非常に重要である。そこで、これらの被害が地盤応答に伴う空気弁や消火栓の移動による弁きょうとの衝突が原因と考えられることに注目し、手法①では、地盤の応答変位量とこれらの設備の弁きょうとの離隔を評価することとした。

6) 設計地震動の設定

手法①の応答解析に用いる設計地震動の設定を行うために、まずは、地震条件の分析・把握を行った。分析は、加速度や速度の大きさだけでなく、地震の継続時間などについても評価を行うため、周期が大きく違う内陸型（断層型）地震と海溝型地震の両ケースを対象とした。そして、それ

ぞれの地震における複数の地震波形を対象として、1次元地盤の地震応答解析を実施し、最も管路位置での地盤変位量が大きい地震動波形を採用した。

なお、内陸型地震については、地域防災計画で被害想定されている地震動を対象とした。海溝型地震については、内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」で用いている地震動波形を用いた。工学基盤面波形の代表例を図-2 に示す。

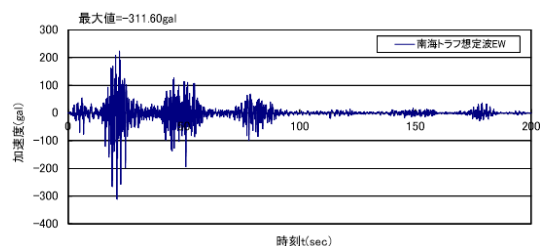


図-2 工学的基盤面波形の代表例

3. 耐震性評価

3.1 現地調査による評価

現地調査では地すべり・側方移動が発生しない地形であるかについて確認を行い、布設管路の土被りよりも深い水深がある側溝や、布設されている道路端が崖のような地形になっている場合は、地すべり・側方移動の危険性ありとして、危険箇所（計算による評価は行わず耐震適合性なしとする）の抽出を行った。空気弁や消火栓についても、弁きょうの設置場所・箇所数、及び設置環境（地すべりや側方移動の影響）の確認は入念に行った。

3.2 耐震計算による評価結果

表-3 に各手法における耐震性の評価結果を示す。ここで示す送水管 A～C は全て K 形・KF 形が混在するダクタイト管の基幹管路である。また、評価対象区間の地盤は層厚の変化が著しい地層や大規模な切土・盛土の宅造池などもなく、均一な沖積地盤と判断できたため、全ての区間において均一な地盤とした。なお、手法①では、空気弁・消火栓の評価も行ったが、地震応答解析により求めた地盤の応答変位量より弁きょう内空の余裕の方が大きかったことから、地震時は無被害（耐震適合性あり）と評価した。

表-3 各手法による耐震性の評価結果

	評価項目										
	①提案手法					②指針の方法4を用いた耐震計算による手法			③耐震適合性ガイドブックによる手法		判定
	地盤モデル 水平変位振幅Uh(m)	最大過剰間隙水圧比 (1.0=完全液状化)	I地震時の 継手伸縮量	II継ぎ手部の 屈曲角度	III空気弁、 消火栓の照査	地盤種別 水平変位振幅Uh(m)	I地震時の 継手伸縮量	II継ぎ手部の 屈曲角度	耐震適合 ありの地盤	耐震適合 なしの地盤	
送水管A L=400m DCIP(K・KF形混在) φ400	R-Oモデルと弾塑性モデルの併用 Uh = 0.007m	0.7	OK	OK	OK	種別：II種地盤 Uh = 0.02m	OK	OK	-	高い盛土地 泥濘平野	
送水管B L=600m DCIP(K・KF形混在) φ400	R-Oモデルと弾塑性モデルの併用 Uh = 0.066m	1.0	NG (7箇所)	NG (8箇所)	OK	種別：II種地盤 Uh = 0.02m	OK	OK	-	泥濘平野	全区間 NG
送水管C L=200m DCIP(K・KF形混在) φ600	R-Oモデルと弾塑性モデルの併用 Uh = 0.006m	0.5	OK	OK	OK	種別：II種地盤 Uh = 0.01m	OK	OK	-	泥濘平野	全区間 NG

3.3 各評価方法による評価結果の考察

1) 手法①と手法③の比較

手法③の評価結果では、表-3 に示すように、全区間耐震性なしとの結果になったが、耐震計算を実施した手法①や②の評価手法では、耐震性ありとなった区間が確認された。このような評価結果の違いは、地盤条件や地震条件などをある程度詳しく考慮したためである。これより、耐震計算を行うことで、更新が困難な区間などの管路更新の優先順位を遅らせることが可能になる場合が想定され、管路更新計画などに与える影響は大きいと考える。

2) 手法①と手法②の比較

これらの比較では、送水管 B において評価結果に違いが確認された。この違いの要因としては、手法①では、KF 形継手が連続している区間の前後に布設されている K 形継手部への変位の集中を考慮したことと、手法②に比べて手法①の地震応答解析結果における地盤の変位量が大きいことであった。この結果より、まず管路形態については、耐震性なしの区間を見落とすことに関係することから、詳しく確認することの重要性が確認できる。

また、手法①と②における地盤の応答変位量の違いについては、液状化による影響の考慮の有無が要因と考えられ、表-3 に示す各送水管の最大間隙水圧比において、送水管 B の最大過剰間隙水圧比が 1.0（完全液状化の発生）となっており、完全液状化が発生している箇所において、継手伸縮量が NG 判定となった。また、これら手法の設計地震動については、図-3 に示すように地盤の変位量に関する速度応答スペクトルは、手法②の方が大きい傾向にあるが、液状化の影響を考慮したことと、図-2 に示すように地震の継続時間が長いこ

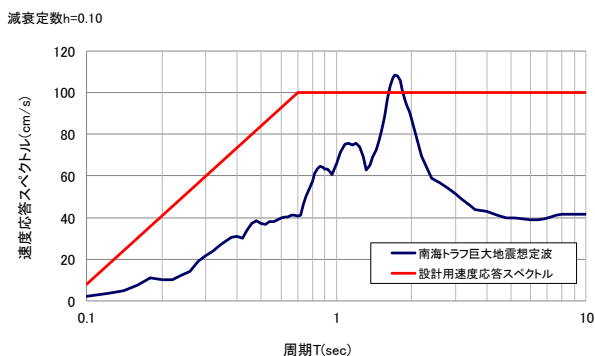


図-3 速度応答スペクトルの比較

とにより液状化後の地盤の変位量が増大(蓄積)し、手法①の変位量の方が大きくなったことについても注目する必要がある。

このようなことから、液状化の可能性のある地盤や、液状化にまで至らなくても過剰間隙水圧の上昇による影響で地盤ひずみが大きくなる地盤、さらに液状化後の地盤の変位量が大きくなる傾向にある継続時間の長い地震動では、適切にそれらの影響を考慮することが重要であると考えられる。

3.4 評価結果を踏まえた今後の方針

今回検討した診断方法の結果から、耐震適合性なしと判定された箇所については、耐震対策として、外面補強工法(カバージョイント工法)を提案した。この工法は既設継手や伸縮管を覆う形状であるスリーブ型のカバージョイント設置するもので、離脱阻止力は既設継手に依存するが、耐震指針で示されているダクタイル鋳鉄管継手の伸縮量を超える変位が起きても、継手部の漏水および抜け出しが発生せず伸縮、屈曲性能を十分に満足すると考える。また、耐震適合性ありと判定された箇所については、管路の耐用年数に到達するまで当面は更新工事を実施しないものとした。これらの対応により、当初の手法③の結果を基に想定していた管路更新工事費(8,000万円程度)を削減できる結果となった。

4. 耐震計算による評価を行う上での留意点と今後の課題

今回の検討より、既設管路の耐震計算においては、対象地盤や設計地震動などの特性を詳しく考慮し耐震計算により評価することの重要性を確認できたが、地盤条件や地震条件、及び管路条件によっては評価結果の傾向は行うものと考えため、今後、様々な条件で検討を行い、このような評価方法を適用した場合の結果の傾向を把握した上で、評価方法を幅広く使用するにあたっての妥当性などを確認する必要がある。

また、剛継手の取り扱いについても述べたが、防護コンクリートにより不平均力対策を実施している例も多く、それを考慮した継手部の評価や、フランジ継手部の対策が課題となっているため、フランジ部についての評価方法なども提案したい。

ただし、既設管路の更新に長期間を要する現状において、より合理的に耐震化を進めるためには、設計実務において対応できる範囲で、設計者が創意工夫し、できるだけ詳しく管路の耐震性を評価する努力も今後、重要と考える。

【参考文献】

1. 水道技術研究センター. K 形継手等を有するダクタイル鋳鉄管の耐震適合性支援ガイドブック. 2010 年.
2. 日本水道協会. 水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版 (I 本編 p47, III 設計事例編 p2)-9). 2022 年.
3. (一社)LIQCA 液状化地盤研究所. LIQCA2D21・LIQCA3D21 (2021 年版). 2021 年
4. 建設省土木研究所. 地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE:DESRA—, 土研試料第 1778 号. 1982 年.