

文化財地区の消火用水道管路の耐震性評価

Seismic Evaluation of Underground Firefighting Water Pipeline in Historical Conservation Areas

鋤田泰子¹・山崎修一²・高田至郎³・土岐憲三⁴・砂坂善雄⁵

Yasuko Kuwata, Shuichi Yamasaki, Shiro Takada, Kenzo Toki and Yoshio Sunasaka

1 神戸大学准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

Associate Professor, Kobe University, Dept. of Civil Engineering

2 前神戸大学大学院生 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

Former Graduate Student, Kobe University, Dept. of Civil Engineering

3 テヘラン大学アジャнкт教授 工学カレッジ土木工学部 (P.O.Box: 11155-4563, Tehran, Iran)

Adjunct Professor, University of Tehran, Engineering Collage, Faculty of Civil Engineering

4 立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

5 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

Kajima Cooperation, Civil Engineering Design Division

Most of historical and cultural buildings in Japan are burnable structures. In order to mitigate earthquake damage to them, not only improvement of their structural seismic performance but also protection from earthquake-followed fire is important. Water pipeline for fire fighting in cultural area has many branches connecting to hydrants and its earthquake response will be complicate. This paper assesses structural seismic vulnerability of water pipeline for fire fighting in Kiyomizu temple as an example, using the subsurface ground investigation and numerical response analysis of underground pipeline.

Key Words : *water pipeline, fire fighting, earthquake response analysis, ground investigation*

1. はじめに

我が国には多くの文化遺産と呼ばれる建造物が存在し、その大部分が可燃性の木造建造物である。兵庫県南部地震以降、文化財の地震防災研究が積極的に進められており、その多くが建造物の耐震性向上や骨董品等の転倒防止の他、地震火災については延焼シミュレーションが行われている¹⁾。著者らの調査²⁾によると、1995年の兵庫県南部地震の際に、神戸市内の寺社・神社の総数657社寺のうち、153社寺(全体の約23%)が地震による被害を受けており、さらに11社寺は日本火災学会³⁾が示す火災延焼地域に含まれていた。これらの地震火災は、寺社や神社から直接出火したのではなく、周辺の住家からの出火・延焼によるものであった。

文化財は長年培われてきた歴史的価値を有するものであり、数千年にわたって維持・保存されている。地震火災による焼失・滅失は、多額の費用を以っても以前の価値を修復することができないため、地震火災対策は文化財の地震防災を考える上で重要である。

文化財の地震火災対策においては、文化財地区の地震危険度やその地区に備えられている消火用管路網、貯水槽等の消火施設の耐震性や消火用水供給の信頼性、火災発生時の延焼エリアの把握や延焼防止施設の有

無、他水源を利用した消火機能の効果などを総合的に評価して火災が発生しても文化財を守るように適切な方策をとる必要がある。本研究では、それらの対策の第一段階として、地震時に火災延焼を阻止するための文化財地区の消火用水道管路網の耐震性の評価について検討した。文化財地区の消火用水道管路は基本的に消火用専用管路であることから、一般の飲料水用管路と比べて頻繁には利用されず、地中にあるために日々の目視点検もできない。また、管路網から分岐して接続されている消火栓は建造物の立地条件に応じて設置されるため、文化財地区の消火用管路網は屈曲部や分岐部が多くなり、配管形状は複雑になる。さらに、文化財が歴史的な重要文化財等に定められていると、掘削を含めた詳細な地盤調査を実施することが難しい場合がある。本研究では、このような条件下における文化財地区の消火用水道管路網の耐震性評価方法を示している。適用例として京都市内にある清水寺周辺の消火用水道管路網を対象とし、掘削の必要がない表面波探査を実施してその結果から地盤条件を決定した。さらに、近傍に存在する花折断層を考慮して地中管路網の地震応答解析を行い、システム全体の耐震性の評価ならびに地震応答の大きい箇所の特定制を行った。

2. 清水寺周辺の消火用水道管路網と地盤調査

図-1 は清水寺境内の消火用管路網を示している。山手の岩盤上に貯水槽が設けられ、ポンプ室を介して境内をループ状に配された配水管路によって水供給が行われている。災害時に備え、ループ状の主管はいずれの方向からもポンプ圧で供給できるようになっている。また、管路は主管上の30箇所の分岐部から地下式消火栓や放水銃に連結されている。この地域は山際に位置し、管路網にも高低差がある。そこで、GISで水平の位置情報だけでなく、標高座標を含めた3次元情報を与えて管路網のデータベースの構築を行った。

地中管路の地震応答は周辺地盤の特性に左右される。とくに地震応答解析には管路と地盤との相互作用を表す地盤ばねの設定が必要となる。一般的には掘削を含めた地盤調査が行われるが、清水寺は文化財地区であり地盤調査に制限があるため、本研究では表面波探査によって地盤特性を設定した。表面波探査は、地表面に沿って伝播する波（表面波）を観測し、波長による伝播速度の違いを逆解析することで、地盤のせん断波速度構造を求めることができる。表面波探査機器は、応用地質㈱のMcSEIS-SXWを用いた。

図-2 は、清水寺周辺の鳥瞰図に管路網を表示しており、表面波探査を行った測線も併せて表示している。測定は清水寺境内の計5箇所で行い、消火用管路網周辺において直線で約50mを確保でき、可能な限り解析対象地区全体をカバーできる位置を選定した。また、日中は観光客が多いため、ノイズの少ない早朝に調査を行った。観測結果から解析を行い、測線断面のせん断波速度構造を算定した。図-3 は、測定結果を示している。調査地区内で平行した3本の測線（測線1、2、5）はいずれも類似した地盤構成である。表層のせん断波速度が遅い層でも $V_s=230\text{m/s}$ 以上であり、地表から約3~5mで $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層となる。また、山手の測線4では、表層に堆積層が見られず基盤が露頭している。したがって、清水寺周辺の地盤には厚い堆積層はなく、表層に薄く風化土が堆積していることが示された。また、これらの結果を既往の電磁探査結果^{4),5)}と比較したが、表層地盤の層厚については整合的であることが分かった。



図-1 清水寺消火用管路網

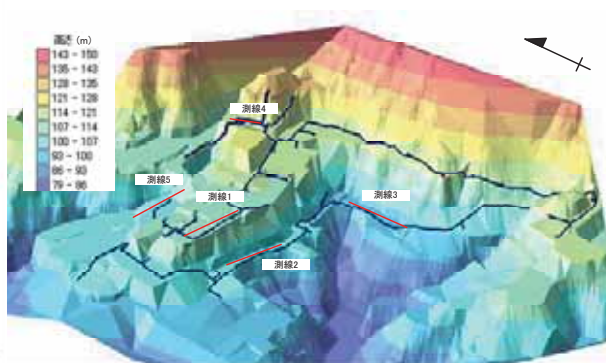


図-2 表面波探査測定位置

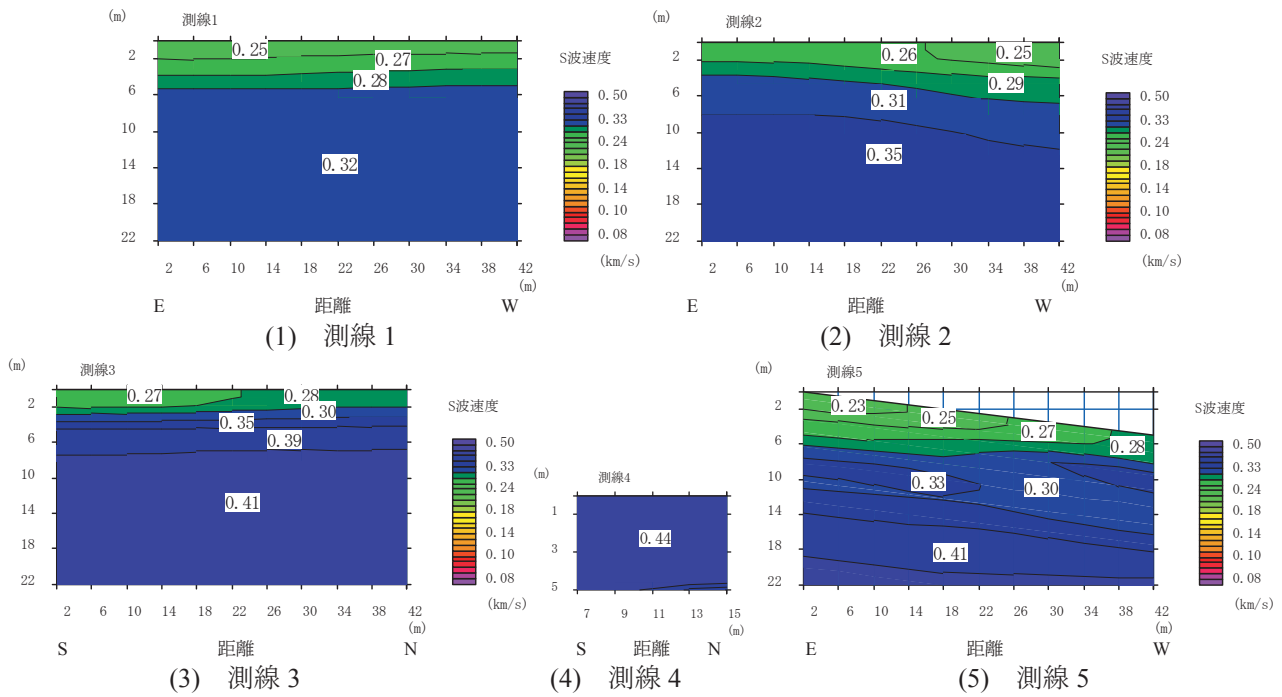
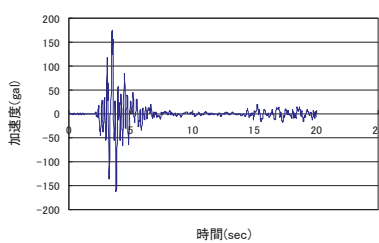


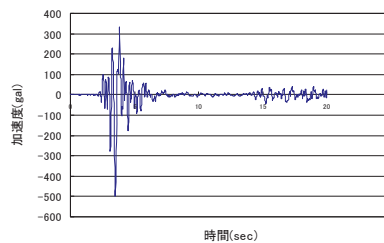
図-3 表面波探査結果

3. 地震動レベルの設定

京都盆地の周辺の活断層の中で、文化財が集積する東山山麓に多くの被害をもたらすと考えられるのが断層長さ約 50km の花折断層である。花折断層については、地震調査研究推進本部によって長期評価⁶⁾が行われている他、盆地内の強震動予測⁷⁾が行われている。そこで、花折断層を震源断層とする地震の当検討地域の想定地震動を用いて基盤面での加速度波形(図-4 参照)⁷⁾から表層地盤の速度応答スペクトルを図-5 に示すように算出した。表面波探査結果から、平地部分の $V_s=400\text{m/s}$ 以下の地盤を表層のモデル地盤と設定し、モデル地盤の固有周期は $T_G=0.25$ 秒とした⁸⁾。したがって、花折断層地震による当該地域の地盤応答は 34.1cm/s として設定している。



(1)NS 成分



(2)EW 成分

図-4 基盤面における加速度波形⁷⁾

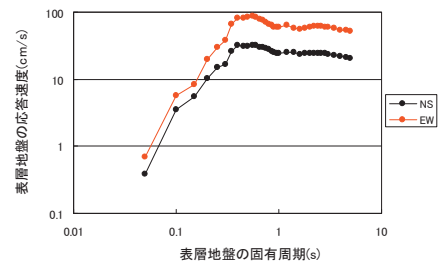


図-5 速度応答スペクトル

4. 地中管路のモデル化と解析入力設定

地中管路の地震応答解析⁹⁾には、管路埋設地点の地盤変形を入力して、その地盤変形を動的相互作用を表現する地盤ばねを介して管路に伝達させる応答変位法を用いている。本研究は 3 次元管路地震応答解析を行っている。管路ははりとし、地盤ばねは管軸方向と管軸直角方向 2 方向のばねを設定した。当検討地区は上述したように高低差のある地形であるため、管路モデルは立体的な配管でモデル化している。

また、枝管端部は写真-1、2に示すように消火栓や放水銃などの消火施設に連結している。そこで、分岐した管路端部は立ち上がり配管としてモデル化を行った。消火用管路網の主管の管種は鋼帯外装ポリエチレン管（ポリエチレン管の内圧強度を鋼帯によって補強しており、最外装の低密度ポリエチレン層によって、耐食性に優れた管路。可とう性に優れているため、海底のパイプや消火用管路によく埋設されている）であり、全域にわたって口径 $\phi=150\text{mm}$ が使用されている。枝管は消火用外面被覆鋼管(VS)であり、口径 $\phi=100\text{mm}$ 、 $\phi=80\text{mm}$ が混在している。管路は継手がない一体構造管として扱い、消火施設に連結する立ち上がり配管の管材料に関しては、消防庁告示第36号¹⁰⁾によって定められているダクタイル鋳鉄管で設定した。立ち上がり管の埋設深さに関して、一律140cmとした。各管材料の特性値を表-2に示す。枝管の材料特性については、使用管路の特性が明らかでなかったために、圧力配管用炭素鋼管(STPG)の管体特性を参考に設定した。管体は非線形性を考慮し、ポリエチレン管、鋼管ともに降伏ひずみで塑性するバイリニア型のはりとしてモデル化した。



写真-1 放水銃



写真-2 地下式消火栓

表-2 管体諸元^{11)、12)}

	主管(ポリエチレン管)	枝管(鋼管)		消火栓(ダクタイル鉄管)	
口径(mm)	152	100	80	118	93
弾性係数(N/mm ²)	1,000	210,000		160,000	
管厚(mm)	16.4	4	4	4	4

地盤ばねについては表面波探査結果によってモデル地盤から水道施設耐震工法指針⁸⁾に基づいて表-3に示すように算出した。地盤の非線形性を考慮して、指針⁸⁾を参考にすべり出し変位を定め、バイリニア型の地盤ばね係数を設定した。なお、地盤ばねのすべり限界変位量は管軸方向0.2cm、管軸直角方向2.6cmとした。入力波動については速度応答スペクトルにより設定した地盤応答速度から表-4のように設定した。

地形の急変部においては地震動の反射等によって表面波が生じ、地震動は複雑なものになる。ここでは、それらの影響については考慮せず、波長や位相は同じで表層地盤の厚さから地震動増幅によって振幅を調整して入力地震動とした。したがって、標高の高く表層厚の薄い箇所管路へ入力されている振幅は小さくなる。

表-3 地盤ばね係数

管軸方向地盤ばね係数(kN/cm ³)	1.03
管軸直角方向地盤ばね係数(kN/cm ³)	2.06

表-4 入力波動設定値

地盤応答速度 Sv(cm/s)	34.1
固有周期 T_G (s)	0.25
振幅(cm)	1.7
波長(m)	33.1
地震波速度 C(m/s)	130

5. 管路網の地震応答解析

地震応答解析では、入力波動の位相・入射角をランダム変数と見なし、乱数を与えて入力条件の異なる50ケースの解析を行った。当検討地区の管路網のような一体構造管路の耐震性評価は管体歪みで判断した。降伏歪みだけでなく、圧縮応力による座屈破壊の可能性を考慮して降伏圧縮歪みも考える。主管のポリエチレン管の降伏歪みは資料¹³⁾より10%とした。一方、枝管の鋼管の降伏引張り歪みは指針¹⁴⁾より5%としている。50ケースの解析の内、各管要素に最大のひずみが発生した値をその管要素の応答値として、降伏ひずみに対する応答値の比率（応答比率）で評価した。

図-6は、解析の結果をGISで表示しており、顕著な値（応答比率で0.2以上）を示した位置（図中の○）と応答比率の数値を示している。また、図-7は管路の応答比率を示している。全体的に軸歪みよりも曲げ歪みが卓越している。主管のポリエチレン管については、山側の薄い表層地盤の地区では応答比率0.01以内であり、標高が低く標準的な表層地盤モデルの箇所では応答比率0.05以内になっている。また、分岐部周辺で大きな応力が発生している。他の異形部が隣接している箇所では、互いの管路挙動の拘束により分岐部に大きな応力が発生しているが、最大歪みは約2%程度であり、応答比率で約0.2であるため、想定される地震動に対して十分安全であると考えられる。枝管の鋼管については曲部で直管部よりも大きな値が発生し（例えば、図-6中の応答比率0.24、0.29の箇所）、主管と同様に異形部が連続する箇所では大きなひずみが見られた。

消火施設と連結している枝管端部の立ち上がり管（ダクタイル鋳鉄管）と枝管の鋼管の境界部分では、両者の剛性の違いにより大きな応力が集中し、比較的大きな応答が発生していたことが、鉛直方向の応力分布より確認できた。しかし、一般的には立ち上がり管と枝管の境界の曲部にコンクリート等による補強が行われており¹⁵⁾、解析結果は過大評価をしていると考えられる。

以上のことから、想定される地震に対して清水寺内の管路網の応答は全て弾性範囲内に収まり、降伏しないことが分かった。しかし、本研究で想定した地震波動のレベルは34.1cm/s程度であり、地形効果によってはそれ以上の地震動が発生することも考えられる。また、当地区は斜面地域であり、地すべり等の危険性がある。これらについては今後検討が必要であるといえる。また、管路網がループ状を成しているので1箇所でも管路が破断しても逆方向から送水すれば管路の機能を維持できる。そのためにも、地盤変状が起ころうな箇所については、適宜遮断弁を設けるなどして管路網全体に地震被害が波及しないような対策を兼ね備える必要がある。

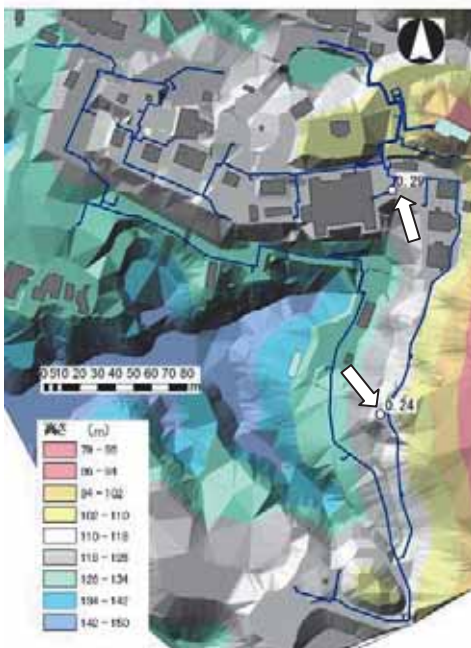


図-6 顕著なひずみが発生する箇所
(図中の値は応答比率)

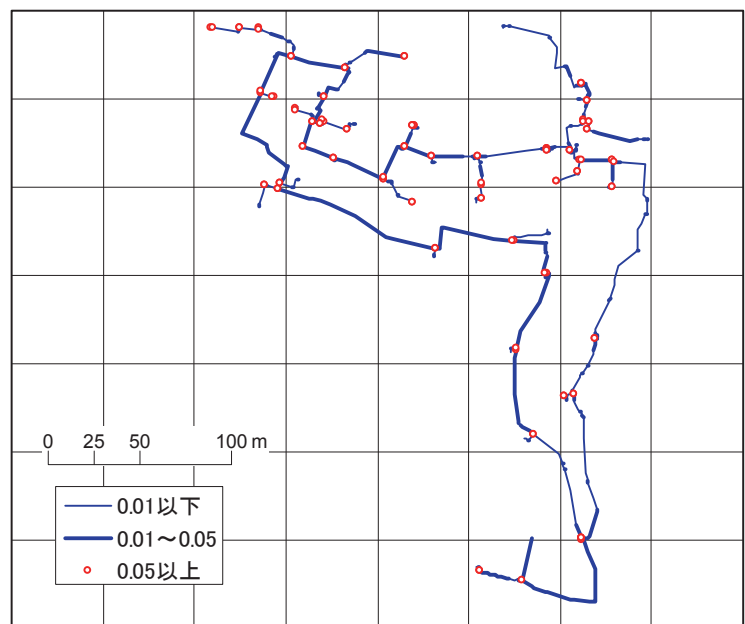


図-7 管路の応答比率分布

6. まとめ

本研究では、文化財地区の消火用水道管路網の耐震性を明らかにするため、表面波探査ならびに3次元での管路応答解析を用いて評価する方法を示した。適用事例として清水寺の消火用水道管路網を対象にして、調査ならびに解析を行った。本研究は、以下のとおりにまとめられる。

- 本研究では一つの消火用水道管路網を事例に挙げて、曲部、分岐部などの異形部に歪みが集中しやすいなど、定性的な傾向を示すことができた。設定した地震に対してシステムの根幹を成す主管は十分安全であることが分かった。枝管については管種の変化する消火施設の連結部分に歪みが集中することが分かった。
- 消火用水道管路網に対して、コンクリートによる補強や離脱防止機構の継手の設置によって相対変位を吸収するなどの対策による効果や、地震波動の他に地すべり等に対する管路の応答についても解析技術によって明らかにしていく必要がある。
- 本研究で用いた表面波探査による表層地盤の調査は簡便であり、さらに消火栓などの消火施設に接続するために分岐部が多くなる管路網の地震応答解析には本研究で用いた解析手法であれば応答が大きくなる箇所が特定できるので消火用水道管路網の耐震性評価には有用である。これらの耐震性評価によってより効果的な地震火災対策を行うことが期待される。

なお、本研究は文部科学省による学術フロンティア推進事業「文化遺産と芸術作品を自然災害から防御するための学理の構築」（推進拠点：立命館大学 歴史都市防災研究センター）の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 例えば、立命館大学歴史都市防災研究センター：文化遺産と芸術作品を自然災害から制御するための学理の構築，学術フロンティア推進事業年度2007年末報告書，2008
- 2) 高田至郎，鉄田泰子，山崎修一，Rasoul Khoshnavan Azar，土岐憲三：兵庫県南部地震における文化財の火災事例と文化財構内消火システム管路の耐震性検討，建設工学研究所論文報告集，第49号，pp.197-209，2007
- 3) 日本火災学会：1995年兵庫県南部地震に関する火災報告，1996
- 4) (株)日本清涼飲料水研究所，東海鑿泉株式会社：清水寺境内水源調査報告書，1996
- 5) (株)日本清涼飲料水研究所，東海鑿泉株式会社：清水寺水源ボーリング工事報告書，1988
- 6) 地震調査研究推進本部：三方・花折断層の長期的評価について
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/03mar_mikata/index.htm
- 7) 土岐憲三，岸本英明，古川秀明，酒井久和：花折断層による京都盆地の3次元非線形有限要素法による強震動予測，日本地震工学会論文集，第7巻，第5号，pp.45-59，2007
- 8) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説-1997年版-，p.9，pp.17-18，71-73，300-301，1997
- 9) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版，p.101，1991
- 10) 総務省消防庁：<http://www.fdma.go.jp/concern/law/kokuji/hen52/52030101140.htm>
- 11) 日本ダクタイル鉄管協会：便覧，pp.256-285，2005
- 12) 日本プラスチック工業株式会社：「PORITEC PE パイプ」技術説明資料，2000
- 13) 竹内友章，高橋晃，中井秀信，石井健一，牧野良之，今井浩三，井上哲夫：送ガス用鋼帯補強ポリエチレン管（1）管の開発一，古河電工時報第114号，pp.15-21，2004
- 14) 日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針，p.104，2001
- 15) 消防科学総合センター：消防用設備のしくみと働き(消防水利編)，p.72，1994