

水道施設の耐震診断用レベル2地震動の設定について

中電技術コンサルタント（株）	正会員	○片山	吉史
中電技術コンサルタント（株）	正会員	古川	智
広島市水道局	非会員	嘉村	真二
広島市水道局	非会員	片岡	淳
広島大学	正会員	一井	康二
広島大学	非会員	神野	達夫
広島大学	正会員	加納	誠二

1. はじめに

2009年に改訂された「水道施設耐震工法指針・解説」¹⁾では、レベル2地震の設定方法として、震源断層を想定した地震動評価を行い、当該地点での地震動を設定することが推奨されている。そこで、広島市水道局では、市内164ヶ所の上水道施設の耐震設計・診断に用いるレベル2地震動を設定するために、広島市地域防災計画の5つの想定地震を対象に統計的グリーン関数法によって地震動予測を行った。

ここでは、採用した地震動予測法のうち、i) 想定地震の震源特性を設定したこと、ii) 164ヶ所と数の多いサイト増幅特性を、市内及び市周辺部の地震観測点の既知サイト増幅特性をもとに、当該地点の常時微小動観測から設定したこと、iii) 5つの想定地震に対する当該地点の予測地震動の応答スペクトルから、耐震設計・診断に用いる一つの設計応答スペクトルを設定したことを報告する。

2. 想定地震と対象施設

想定地震は、広島市地域防災計画²⁾で想定している5つの地震とした。図-1に示すように、地殻内地震として岩国断層帯、五日市断層、己斐断層による地震を、スラブ内地震として安芸灘～伊予灘の地震を想定した。なお、海溝型地震である東南海・南海地震については、別途、中央防災会議によって予測された工学的基盤位置の地震動³⁾を利用した。

対象施設は、主要施設である取水場、浄水場を含む配水池等の構造物164ヶ所であり、図-1に示すように太田川デルタ背後の丘陵地に市街化区域が拡大したため、対象施設の多くが全市域の主に丘陵地に位置している。

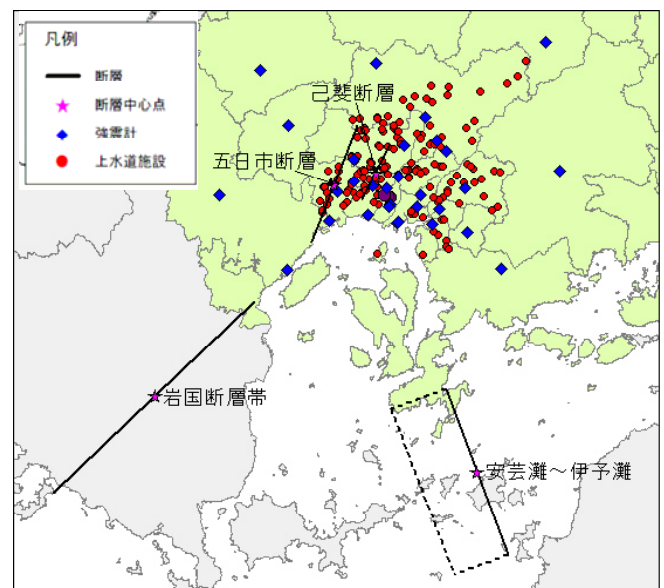


図-1 想定地震、対象施設、地震観測点の位置

3. 震源特性及び伝播経路特性の設定

地殻内地震の震源特性化モデルの設定は、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）⁴⁾を参考に、図-2((a)～(c))のように作成した。また、スラブ内地震である安芸灘～伊予灘の地震 ($M_{JMA}=7.1/4$) については、2001年芸予地震 ($M_{JMA}=6.7$) の観測記録を再現できる震源断層モデルを地盤の非線形性を考慮した経験的グリーン関数法によって作成し、これをもとに $M_{JMA}=7.1/4$ の規模の震源断層モデルを図-2(d)のように再構築したもの⁵⁾を用いた。

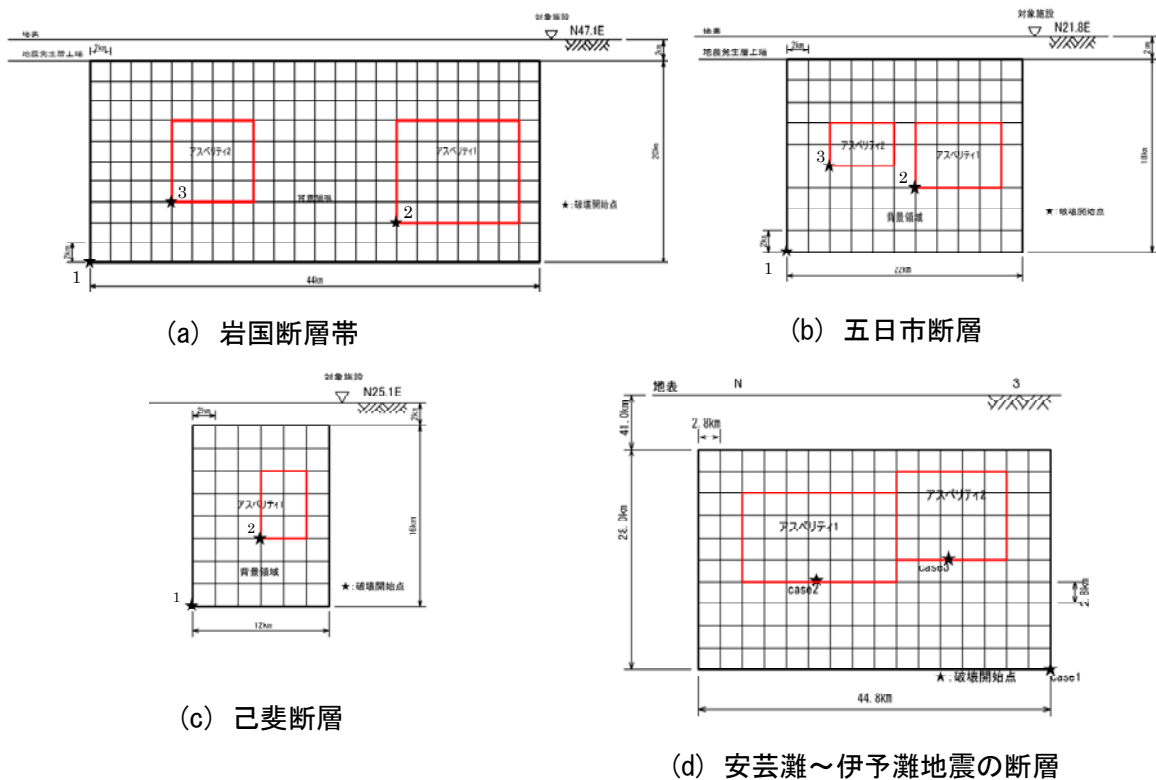


図-2 地殻内地震とスラブ内地震の震源断層モデル

4. サイト特性の設定

統計的グリーン関数法による地震動予測に用いるサイト特性の設定は、工学的基盤から地表までの表層地盤に加え、地震基盤から工学的基盤までの深層地盤の情報が重要である。そこで、広島市周辺のK-NET, KiK-net の強震観測点で得られた地震動記録のフーリエスペクトルに対して、スペクトルインバージョンによって求められたサイト増幅特性⁶⁾を利用することを考えた。また、K-NET, KiK-net の観測点は、10ヶ

表-1 対象施設位置のサイト増幅特性の設定

①K-NET, KiK-net の地震観測点の既知サイト増幅特性を抽出	②K-NET, KiK-net と県・市の地震観測点の同一小地震記録のフーリエ ⁶⁾ スペクトル比	③県・市の地震観測点のサイト増幅特性を推定
KiK-net 広島南	KiK-net 広島南と県の地震観測点 A のフーリエ⁶⁾スペクトル比	県の地震観測点 A
④地震観測点 A の常時微動観測により H/V スペクトルを算出	⑤対象施設 B の常時微動観測により H/V スペクトルを算出	⑥地震観測点と対象施設の H/V スペクトルの類似性を評価
県の地震観測点 A	対象施設 B	地震観測点 A と対象施設 B の比較

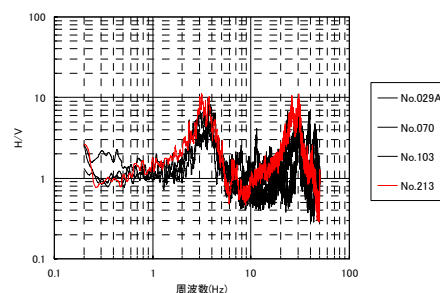
所と少ないため、広島県と広島市が設置している図-1 に示す対象施設に近い 19 ヶ所の地震観測点のサイト増幅特性を利用することとした。

表-1 には、地震観測点のサイト増幅特性の求め方を具体的に示す。まず、①10 ヶ所の K-NET, KiK-net 観測点の既知サイト増幅特性を抽出し、②県・市の観測点における同一小地震記録のフーリエスペクトル比を作成して、③既知サイト増幅特性にこれに乗じて 19 ヶ所の県・市の観測点のサイト増幅特性を求めた。

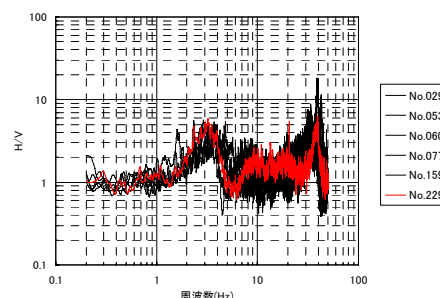
次に、求めた 19 ヶ所の地震観測点のサイト増幅特性を対象施設のサイト増幅特性として利用するため、地震観測点と 164 ヶ所の対象施設位置において、常時微動観測を実施した。使用した観測機器は、加速度計 V243FA(株式会社ミットヨ製)と記録器 GPL-6A3P(株式会社ミットヨ製)である。測定した波形から水平成分のスペクトルを鉛直成分のスペクトルで除して H/V スペクトルとした。表-1 の④には地震観測点 A の H/V スペクトルを、⑤には対象施設 B 位置の H/V スペクトルを示す。これらを⑥のように比較し、H/V スペクトルのピーク周波数 $f_{\max}$ とスペクトル形状 $(H/V)_{\max}$ 等の類似性を評価して各対象施設のサイト増幅特性を決定した。

図-3 に代表的な地震観測点の H/V スペクトルに類似する対象施設位置の H/V スペクトルを重ね書きしたものを示す。(a) は地震観測点のピーク周波数 $f_{\max}=1\sim5\text{Hz}$ 、スペクトル形状 $(H/V)_{\max}\div 10$ の H/V スペクトルに類似する対象施設 3 ヶ所の H/V スペクトルを重ね書きしたものを示す。同様に、(b) はピーク周波数 $f_{\max}$ は同じであるが、スペクトル形状 $(H/V)_{\max}\div 5$ と小さいもの、(c) は $f_{\max}=5\sim10\text{Hz}$ 、(d) は $f_{\max}=10\sim30\text{Hz}$ とピーク周波数が高周波数側に移動した H/V スペクトルである。

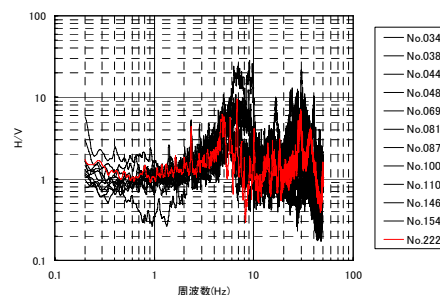
$f_{\max}=10\text{Hz}$ 以下の低周波数側にピーク周波数を持つ場合にはある程度の類似性は確保できたと考えるが、(d) のように $f_{\max}=10\text{Hz}$ 以上のピーク周波数を持つ場合には、ばらつきが大きい。対象施設の多くが丘陵地に位置しているため、 $f_{\max}=10\text{Hz}$ 以上のピーク周波数が観測される対象施設は、164 ヶ所のうち 87 ヶ所と多い。対象施設の多くは比較的剛性の高い池状構造物であり、構造物の固有周波数は 10Hz 前後の場合が多いため、今後、この周波数帯域での類似性の確保が必要と考える。



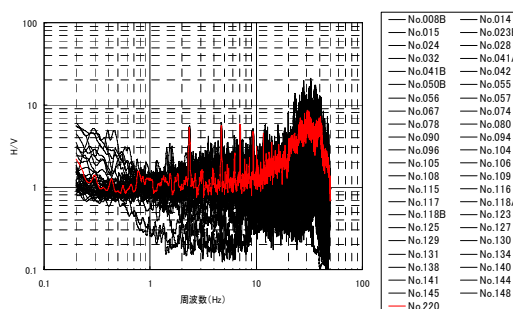
(a) $f_{\max}=1\sim5\text{Hz}$, $(H/V)_{\max}\div 10$



(b) $f_{\max}=1\sim5\text{Hz}$, $(H/V)_{\max}\div 5$



(c) $f_{\max}=5\sim10\text{Hz}$, $(H/V)_{\max}\div 10$



(d) $f_{\max}=10\sim30\text{Hz}$, $(H/V)_{\max}\div 10$

図-3 H/V スペクトルの類似性の評価

5. 設計応答スペクトルの設定

設定した震源特性、伝播経路特性、サイト特性（地震基盤～工学基盤）を入力して、統計的グリーン関数法により、想定地震ごとに 164 ヶ所の対象施設位置における工学的基盤の加速度波形を算出した。さらに、対象施設位置の工学的基盤から地表の地盤モデルを用いて工学的基盤の加速度波形を入力地震動とする等価線形応答解析を行い、地表面の加速度波形を算出した。

対象施設の耐震診断においては、耐震解析法として動的解析と震度法等の静的解析を想定しているため、設計応答スペクトルの設定が必要となる。このため、対象施設において想定される何種類かのレベル 2 地震動による応答スペクトルを包絡する設計応答スペクトルを設定することを考えた。そこで、想定するレベル

2 地震動を「震源特性のばらつき」を持つ母集団と考え、各想定地震動の周期ごとの応答スペクトル値について、90%非超過確率で評価することとした。ただし、応答スペクトル値は横軸の固有周期に対する変動が大きいため、90%非超過確率値の応答スペクトル曲線を震度法でそのまま採用すると、構造物の周期が少し変わるだけで水平震度が大きく変化する点で問題がある。したがって、周期ごとの 90%非超過確率値を用いるのではなく、設定した周期帯ごとの 90%非超過確率値を折れ線で結ぶ標準化を考えた。

すなわち、周期帯として対数グラフで等間隔に 0.05-0.1 秒 0.1-0.2 秒 0.2-0.5 秒 0.5-1.0 秒 1.0-2.0 秒 2.0-5.0 秒に設定し、各周期帯の 90%非超過確率値を求め、最大となる周期帯をフラットにした後、短周期側、長周期側の周期帯については外側端部を折れ線で結ぶこととした。この方法は、最大となる周期帯では 90%非超過確率値を採用し、短周期側、長周期側の周期帯では 90%非超過確率値より安全側の値を採用したことになる。

図-4 には、対象施設 B におけるレベル 2 地震動の減衰定数 5%の設計応答スペクトルを示す。凡例は、上から順に、1997 年度版指針⁷⁾の設計応答スペクトル (I 種地盤、II 種地盤)、各想定地震の加速度応答スペクトル、周期ごとの 90%非超過確率値、設定した周期帯ごとの 90%非超過確率値 (図中には非超過確率 90%(区間)と示す) を示している。なお、1997 年度版の「水道施設耐震工法指針・解説」⁷⁾では、レベル 2 地震として兵庫県南部地震の観測記録をもとに阪神地区の 150 地点で求めた加速度応答スペクトルを、周期帯域 0.2~1.0s の応答スペクトル値について、地盤種別ごとの母集団の「地盤特性のばらつき」を 90%非超過確率で評価している。

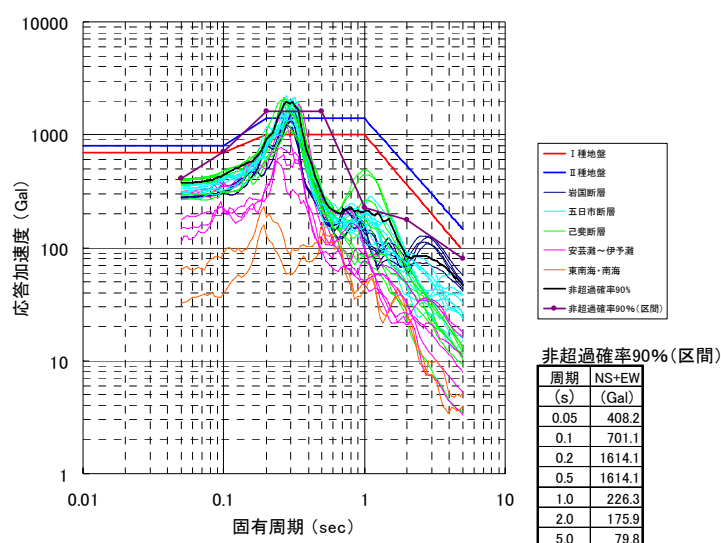


図-4 設計応答スペクトルの設定 (対象施設 B)

対象施設 B では、設定した設計応答スペクトルが固有周期 0.3 秒 (周波数 3Hz) 付近において 1997 年度版指針の設計応答スペクトルに比べて大きい。これは、表-1 の⑤に示した対象施設 B 位置の常時微動観測結果から H/V スペクトルのピーク周波数 $f_{max}=3$ Hz であること、④に示した採用したサイト増幅特性のピーク周波数 $f_{max}=3$ Hz であることから、この周波数帯域で地震基盤からの大きな増幅特性が反映された結果である。

6. まとめ

水道施設の耐震診断用レベル 2 地震動の設定事例から、地域防災計画の想定地震に対する震源特性の設定、対象施設のサイト増幅特性の設定、耐震診断における設計応答スペクトルの設定について報告した。

広島市水道ビジョン(2010~2020)では、構造物の耐震化計画として 2020 年までに全ての耐震診断を実施し、その結果に基づいた耐震化計画の策定、耐震補強を実施するものとしている。このため、今後、本成果を有効に活用し、効果的、経済的な構造物の耐震化を図る必要がある。

本報告で用いた地震記録は、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net、広島県震度情報ネットワーク、広島市地震情報ネットワークで観測されたものである。ここに記して感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009。
- 2) 広島市：地域防災計画，2009。
- 3) 中央防災会議：東南海・南海地震の被害想定について，東南海，南海地震等に関する専門調査会
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測法 (レシビ)，2009。
- 5) 神野達夫他：地盤の非線形性を考慮した経験的グリーン関数法による 1905 年芸予地震の強震動評価，日本建築学会中国支部研究発表会，2010。
- 6) 武田純也，神野達夫，三浦賢治：スペクトルインバージョンに基づく中国地方の強震観測点における地盤増幅特性評価ーその 2 推定精度向上に関する検討ー，日本建築学会中国支部研究発表会，2010。
- 7) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997。