

# 内閣府の強震動波形の業務利用事例

(エクセルによる応答スペクトルの計算)

中日本建設コンサルタント(株) 川井 望  
前本尚二

## 1. はじめに

水道施設(地上構造物)の耐震設計で、静的解析を行う場合には設計水平震度を設定する必要がある。設計水平震度の設定方法は、「水道施設耐震工法指針・解説 2009年版(以下、水道耐震という)」の表1に示した4つの方法が示されている。これら4つの方法のうち、設計対象とする構造物の想定地震の違いなどの理由により、地域防災計画等の想定地震動を用いた方法2と兵庫県南部地震の観測記録を基に設定された方法4が用いられている。

方法2により設計水平震度を設定するには、設計対象地上構造物のある場所における工学的基盤面の加速度波形が必要になる。

平成24年末から、南海トラフの巨大地震の工学的基盤面での加速度波形が内閣府<sup>1)</sup>より提供されているため、本報告では、内閣府から提供された工学的基盤面の加速度波形を使って、地上構造物の設計水平震度を設定した事例を報告する。

表1 レベル2地震動の設定方法(水道耐震 P39 より抜粋)

設定方法		動的解析に用いる設計地震動	静的解析に用いる設計地震動
方法1	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使用する。	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の時刻歴加速度波形、あるいは応答スペクトルを用いる。	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる。
方法2	地域防災計画等の想定地震動を使用する。	想定地震動の地表面、工学的基盤面の時刻歴加速度波形を用いる。	想定地震動の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる。
方法3	当該地点と同様な地盤条件(地盤種別)の地表面における強震記録の中で、震度6強～震度7の記録を用いる。	強震記録の時刻歴加速度波形を用いる。	強震記録の応答スペクトルを用いる。
方法4	兵庫県南部地震の観測記録を基に設定された設計震度、設計応答スペクトル。	「総論解説編Ⅲ(97年版指針再掲部)」の設計応答スペクトルまたは、それに適合した時刻歴波形を用いる。	「総論解説編Ⅲ(97年版指針再掲部)」の設計応答スペクトル等を用いて設定する。

## 2. 方法2と方法4の設計水平震度の設定

本報告では、方法2と方法4で設計水平震度を算定し、安全側となる大きいほうの設計水平震度を設計に採用している。

### 2.1 方法2の場合

方法2による設計水平震度の設定フローを図2に示す。

工学的基盤面における加速度波形と設計対象地点のボーリングデータを用いて表層地盤の地震応答解析を行い、地表面の加速度波形を計算する。

地表面の加速度波形から求めた加速度応答スペクトルと設計対象構造物の固有周期から

構造物の最大加速度応答値を求め、最大加速度応答値を重力加速度で割って、設計水平震度を求める。

## 2.2 方法4の場合

兵庫県南部地震の観測記録を基に設定された加速度応答スペクトルを用いて設計水平震度を設定する。

図3に今回の比較に用いた方法4のⅡ種地盤の加速度応答スペクトルを示す。

水道耐震では、設計水平震度に上限値と下限値の設定があり、施設の重要度に応じて使い分けを行っている。

構造物の固有周期から応答加速度の最大値を求め、重力加速度で割ったものを設計水平震度としている。

## 3. 工学的基盤面の加速度波形の入手

中部地方では、南海トラフの巨大地震を想定して、施設の耐震設計や耐震診断を行うようになってきている。東日本大震災以降、南海トラフの震源域の見直しが行われ、内閣府より南海トラフの巨大地震の工学的基盤面での加速度波形が提供されるようになった。

その結果、設計に用いる工学的基盤面での加速度波形として、南海トラフの巨大地震のデータを用いる機会が増えてきている。図4に南海トラフの巨大地震の強震動生成域と震度分布図を示す。

内閣府からは、図4に示した陸側ケースと基本ケースの2種類の加速度波形が提供されている。

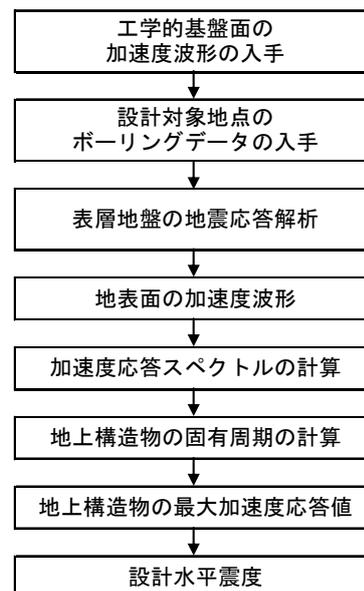


図2 設計水平震度の設定フロー

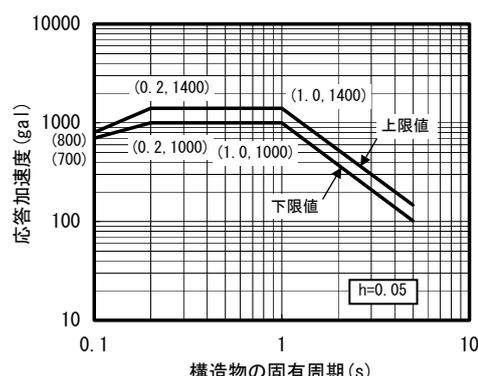


図3 方法4の加速度応答スペクトル  
(Ⅱ種地盤の場合)

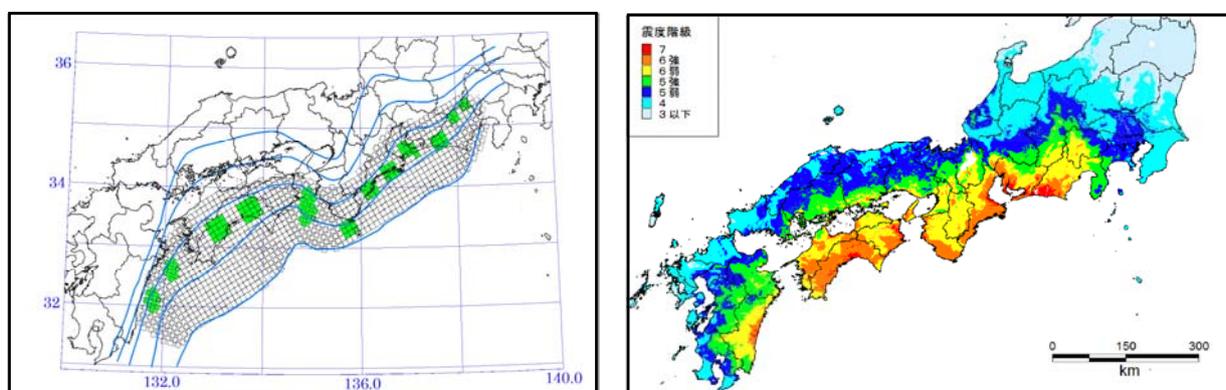
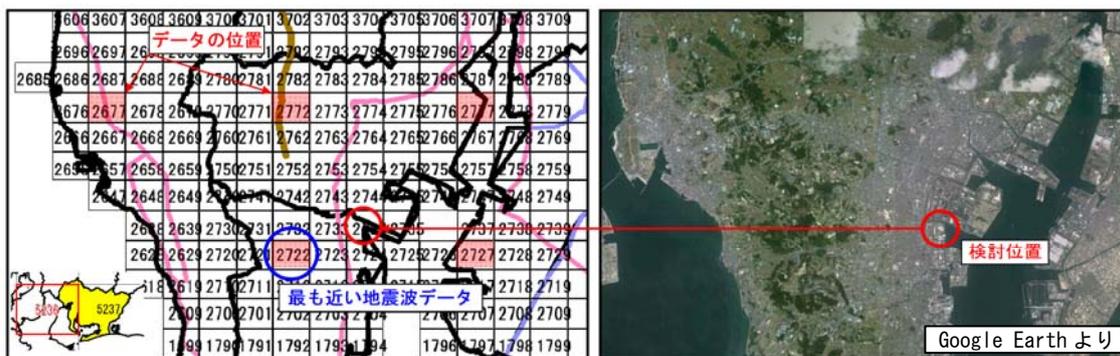


図4 南海トラフの巨大地震の強震動生成域と震度分布図(陸側ケース)

南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ「南海トラフ巨大地震について(最終報告)」平成25年5月より

内閣府から提供されている南海トラフの巨大地震の工学的基盤面の加速度波形データは、**図5**の赤色のメッシュに示したように5km×5kmのメッシュのデータで提供されている。

設計で使用する場合は、設計対象地点の近傍にあるメッシュのデータを使用することになり、**図5**の場合は、メッシュ番号「5236-2722」のデータとなる。加速度波形データはテキストデータで提供されている。



**図5** 工学的基盤面の加速度波形データの提供位置の例

#### 4. 表層地盤の地震応答解析

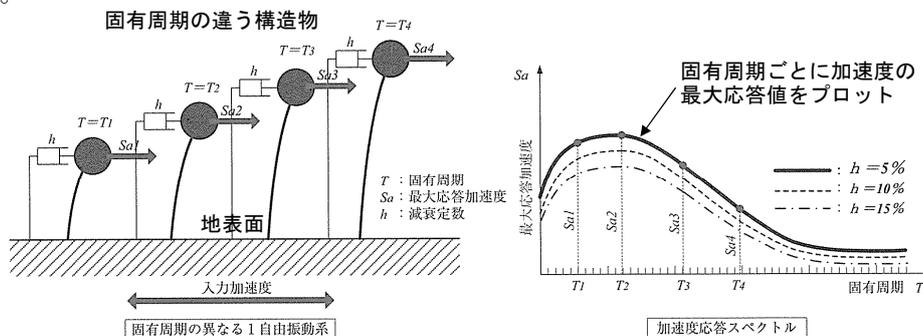
内閣府より入手した工学的基盤面の加速度波形と設計対象地点のボーリングデータを用いて、表層地盤の地震応答解析を行い、地表面の加速度波形を求める。

表層地盤の地震応答解析は、SHAKE を用いて実施した。南海トラフの巨大地震のように、工学的基盤面の入力加速度の最大値が700gal~800gal と非常に大きい場合は、地盤条件によっては、地盤のせん断ひずみが等価線形解析の適用範囲を超えることがある。今回の場合は地盤のせん断ひずみが最大で2%程度となる地盤があったため、非線形解析を行った。

#### 5. 地表面での加速度応答スペクトルの計算

##### (1) 加速度応答スペクトルの計算方法

加速度応答スペクトル(固有周期の最大加速度)は、**図6**に示すように1質点減衰系の地震応答解析から求めることができる。地表面の加速度波形を入力して、構造物の固有周期と減衰定数に対して、絶対加速度応答の最大値を計算して固有周期ごとにプロットしたものである。



**図6** 加速度応答スペクトルの概念図(水道耐震 P180 に加筆)

加速度応答スペクトルは、文献<sup>2)</sup>にある下記の式を使って計算した。式中の記号は、文献を参照する。

$$\begin{aligned}x_{i+1} &= A_{11}x_i + A_{12}\dot{x}_i + B_{11}\dot{y}_i + B_{12}\dot{y}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= A_{21}x_i + A_{22}\dot{x}_i + B_{21}\dot{y}_i + B_{22}\dot{y}_{i+1} \\ (\ddot{x} + \ddot{y})_{i+1} &= -(2h\omega\dot{x}_{i+1} + \omega^2x_{i+1})\end{aligned}$$

$$A_{11} = e^{-h\omega\Delta t} \left( \cos \omega_d \Delta t + \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t \right)$$

$$A_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \cdot \frac{1}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{21} = -e^{-h\omega\Delta t} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left( \cos \omega_d \Delta t - \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t \right)$$

$$B_{11} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ \left( \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3\Delta t} \right) \cos \omega_d \Delta t + \left( \frac{h}{\omega\omega_d} - \frac{1-2h^2}{\omega^2\omega_d\Delta t} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{2h}{\omega^3\Delta t}$$

$$B_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ -\frac{2h}{\omega^3\Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{1-2h^2}{\omega^2\omega_d\Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3\Delta t}$$

$$B_{21} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ -\frac{1}{\omega^2\Delta t} \cos \omega_d \Delta t - \left( \frac{h}{\omega\omega_d\Delta t} + \frac{1}{\omega_d} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] + \frac{1}{\omega^2\Delta t}$$

$$B_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ \frac{1}{\omega^2\Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{h}{\omega\omega_d\Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2\Delta t}$$

## (2) 応答スペクトルの計算結果

筆者らが作成した応答スペクトルの計算を行うエクセルシートの例を図7に示す。

表層地盤の地震応答解析によって得られた時刻と地表面の加速度のデータを図7の左側に入力すると応答スペクトルが計算される。右側は地表面の加速度波形を示している。

設計対象地点のボーリングデータを用いて応答スペクトル(加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルの3種類)を計算した結果を図8に示す。

図9に今回の設計対象地点にある6本のボーリングデータを用いて加速度応答スペクトルを計算した結果を示す。図9中の黒の実線が、水道耐震に示されている方法4の応答スペクトルの上限値を示している。図9の結果より、この設計対象地点では構造物の固有周期が0.10秒~0.18秒と0.25秒~0.50秒の場合は方法4の値よりも設計水平震度が大きくなり、固有周期が0.50秒以上の場合は、かなり設計水平震度が小さくなることがわかる。

設計対象の水道施設は施設の高さが幅に比べてかなり小さく、せん断剛性が大きい池状構造物であることから、比較的固有周期が短い構造物である。構造物の固有周期を0.1secとした場合、この時の最大加速度 $\alpha_{\max}$ より、設計水平震度を計算すると次のようになり、方法4の兵庫県南部地震を基に設定する設計水平震度より大となった。

$$\text{設計水平震度 } k_h = \frac{\alpha_{\max}}{g} = \frac{868}{980} = 0.886 \doteq 0.90 > 0.80 (\text{方法4の設計水平震度})$$

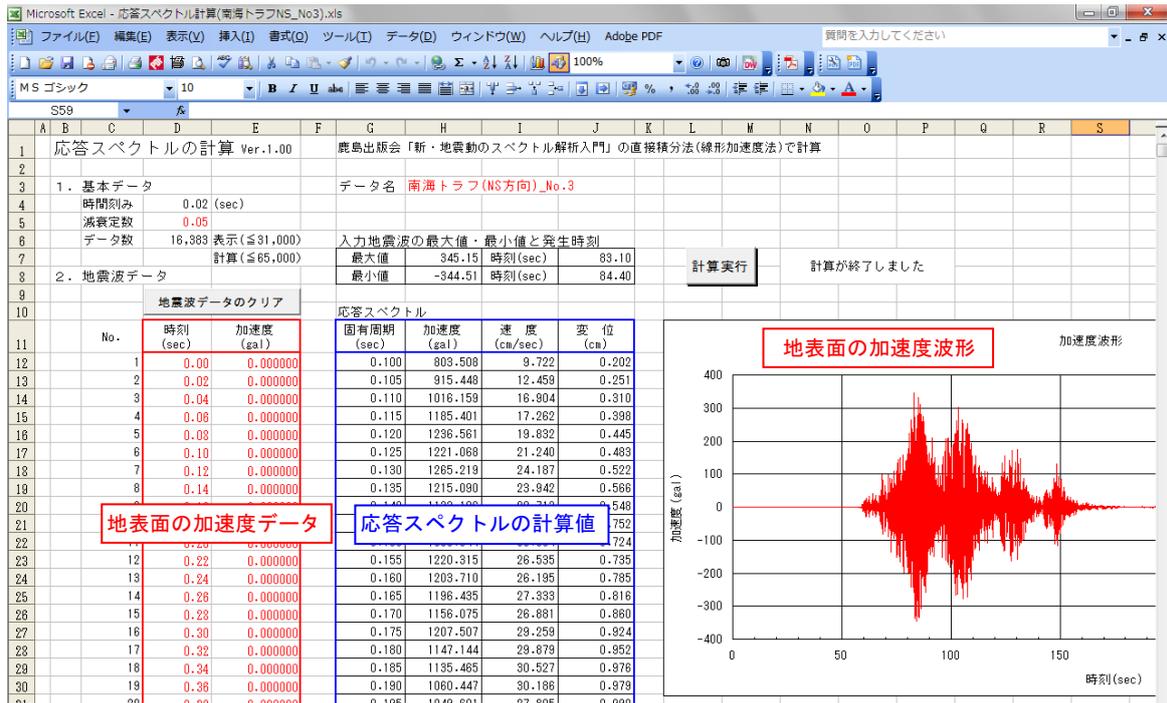


図7 応答スペクトルを計算するエクセルシートの例

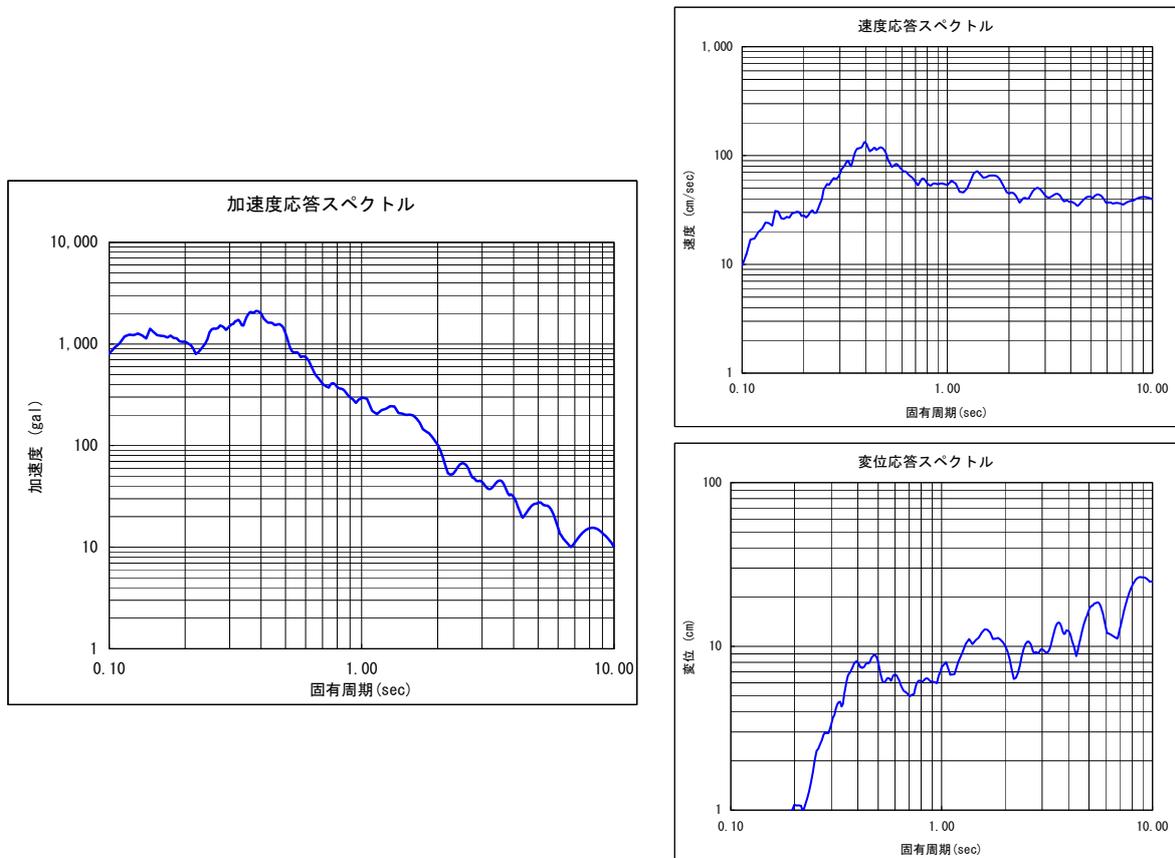


図8 応答スペクトルの計算結果(Bor. No. 3)

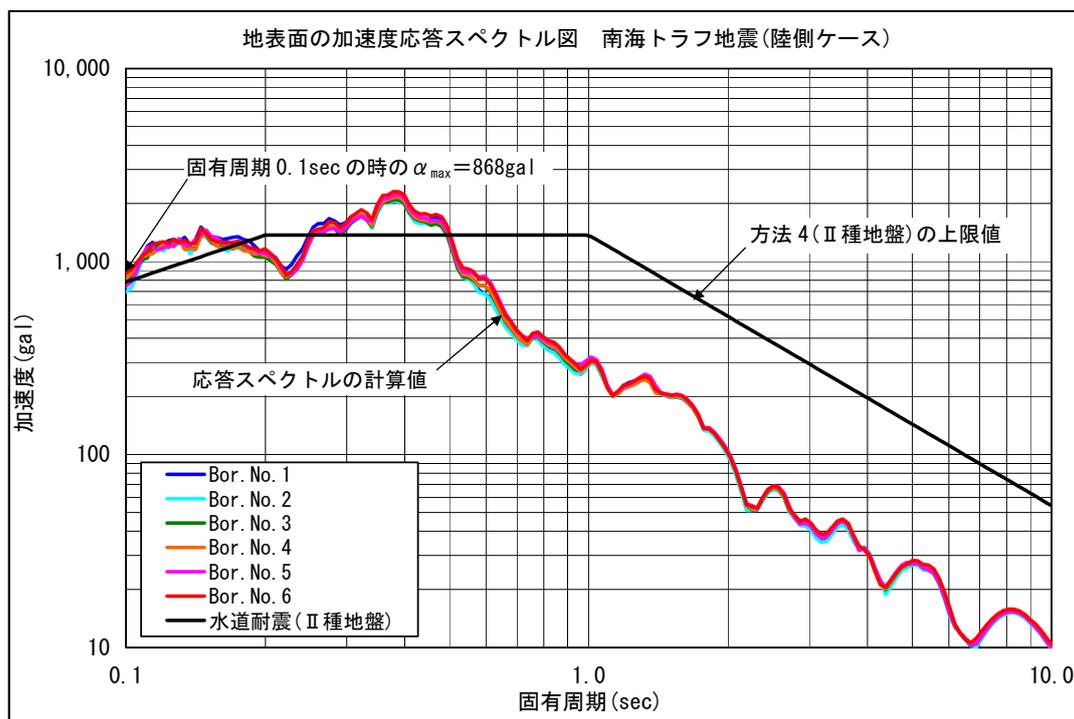


図9 南海トラフの巨大地震による地表面での応答スペクトルの比較

## 6. おわりに

水道施設において南海トラフの巨大地震の工学的基盤面の加速度波形を用いて設計水平震度を設定した事例を紹介した。

内閣府より南海トラフの巨大地震の工学的基盤面での加速度波形が提供されるようになり、方法2に対してこの加速度波形を用いる機会が増えてきている。

エクセルで応答スペクトルを計算することにより、方法2と方法4の地表面での応答スペクトルの比較が容易になった。また、応答スペクトルの計算を専用ソフトで行っていた時と比べると、計算が非常に簡単になり、計算に対する敷居が低くなったようにも思える。

計算を簡単に行えるツールを利用することにより、本来の目的である設計水平震度の議論を行い易くなったと感じている。

## 参考文献

- 1) 内閣府防災情報のページ「南海トラフの巨大地震モデル検討会」  
南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布、浸水域に係るデータ提供について ([http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data\\_teikyou.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyou.html))
- 2) 大崎順彦著「新・地震動のスペクトル解析入門」鹿島出版会
- 3) (社)日本水道協会「水道施設耐震工法指針・解説 2009年版」