

# プレキャスト製雨水槽の耐震計算

鈴木崇伸

正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350 川崎市鯨井 2100)

地中構造物の耐震計算は応答変位法が一般的に用いられており、地盤条件から計算される地盤変位分布を地盤バネで支持された構造物に加えて計算される。地中構造物の中でも小規模なものは建設環境の変化から工場生産されるプレキャスト製品も多くなってきており、一定の耐震性能を作り込む必要が生じてきている。本研究はプレキャスト製雨水槽を対象に、幅広で高さが低く、スレンダーな構造的特徴を勘案して震度法的に近似計算する方法を提案する。地盤条件(固有周期、地盤変位)によらず、設計水平震度0.2Gを基本に計算する本手法は応答変位法の近似として、工場生産品の設計に向いている。

**Key Words** : Seismic design, Water reserver tank, Slender underground structure

## 1. はじめに

昨今では土中構造物の建設においても、熟練した作業者の不足や建設コスト削減の観点から工場加工した部品を現場で組み上げる工法が多く用いられるようになった。今回、耐震性に関する研究を行うのはプレキャスト製の雨水貯留槽であり、工場生産された部品を現場で早く、安く組み立てる方式の貯留槽の耐震性評価法について研究を行う。

地下構造物の耐震設計においては震度法、応答変位法、動的解析法の3種類の計算手法がよく用いられているが、最近では応答変位法が広く用いられている。耐震設計方法がまとめられている構造物のうち、雨水槽と比較的形狀の似たものに地下駐車場があるが、同指針は応答変位法と震度法を組み合わせた解析法を採用しており、有限要素法による計算結果とよくあうことが確認されている。

応答変位法あるいは震度法は地盤あるいは構造物の動的応答を大胆に近似した静的計算法であり、それぞれ適用の限界はある。また動的解析法には計算が煩雑で、結果が一般化しにくい問題がある。そこでプレキャスト製雨水槽の構造的特徴を踏まえて簡易に耐震計算する方法について研究を行った。

## 2. 応答変位法適用上の問題点

### (1) プレキャスト製雨水槽の特徴

プレキャスト製雨水槽は地下の比較的浅い位置に箱型の躯体を組み上げて埋設するもので、地下構造物の中では小規模な構造物である。高さに比べて横方向にはある程度広がりがある構造である。プレキャスト化をして軽量化しているためにはり部、柱部にあたる部材は現場打ちのものに比べて細くなっており、横方向のせん断剛性は小さくなっている。また工場で大量生産するという制約から建設サイトごとの個別設計には対応しづらい特徴がある。

以上の特徴から応答変位法適用の問題点について考察する。表層地盤の1次振動モードにもとづいた

計算式にあてはめれば、浅いところに埋設される構造物では地震動の低減は期待できず、地表と同等の地震動が加わると考えられる。第二に幅広の薄型の構造であることから、上下面にはたらくせん断力が主体になる。第三に部材がスレンダーで剛性が低いために、構造全体の水平方向の剛性が小さく、周辺地盤よりもせん断変形しやすい点が特徴的である。この点については次節でさらに分析する。第四に工場の生産ラインで標準設計にしたがつてつくられるために、建設サイトごとの個別設計には対応しづらい特徴がある。

### (2) せん断剛性の影響

上述の特徴のうちせん断剛性の影響について考えてみる。地表近くにある幅広で低剛性の構造を1次元波動問題に置き換えて、動的応答を考えてみる。図1中に示すように地表を含む3層の構造を想定し、中間の層を幅広の構造物とみなす。地盤のせん断剛性を $G$ 、構造物のせん断剛性を $G_s$ とし、単位質量を同程度として、伝達関数を計算する。図1は層厚、物性を仮定して計算した結果であるが、構造物の剛性が高いと一様地盤の条件に比して揺れが抑制されるのに対して、構造物の剛性が低い場合には、揺れが増幅される周波数域が現れている。

揺れが増幅される周波数域での1次の振動モードイメージを図2に示す。構造物のせん断剛性が高い場合には、構造物位置での変形は抑制されるのに対して、せん断剛性が低い場合には変形が構造物位置に集中して現れる。同図中に構造物がない場合の地盤の振動モードも示しているが、構造物のせん断剛性が周辺地盤のそれより低い場合には、地表の応答から推定される地盤変位を構造物に作用させる方法では変形の過小評価となることがわかる。一方周辺地盤の剛性より高い地下構造物の場合には、自由地盤の変位を強制的に作用させることは、大き目の外力を与えることになる。

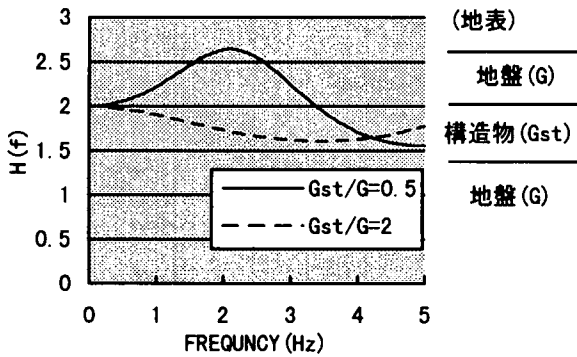


図-1 地盤-構造物系の伝達関数の例

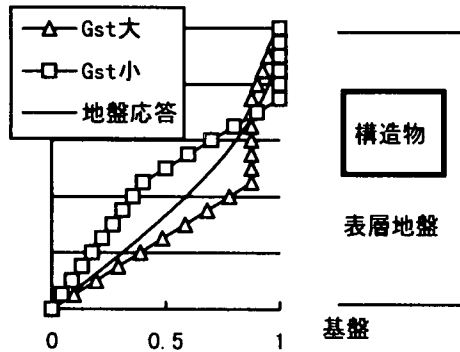


図-2 地盤-構造物系の変形モード

よってせん断剛性の低い地下構造物の場合には、地震動に応じた水平力を作用させる震度法的な耐震計算がむいていていると考える。

### 3. 震度法による地震荷重の表現

#### (1) 表層地盤の運動

地震動は表層地盤の影響によって増幅されることが知られており、地下構造物の設計では基盤面で入力地震動を与え、表層地盤による増幅を考慮した設計地震動を用いるのが一般的である。振動数が高くなると減衰も大きくなることも考え合わせ、1次の振動モードだけを取り出して設計地震動とするのが一般的である。地表で最大変位となるとき、変位の深さ方向の分布は次式となる。この式が応答変位法の基本となる地震動を表現する式となる。

$$u(z) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{H}{V_s} \cdot S_v \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H} \cdot z\right) \quad (1)$$

ただしHは表層厚、 $V_s$ はせん断波速度、 $S_v$ は設計速度応答スペクトルを表している。また加速度の深さ方向の分布は

$$a(z) = -\frac{2H}{V_s} S_v \cos\left(\frac{\pi}{2H} z\right) \quad (2)$$

となり、変位  $u$  と逆符号で相似な分布となる。次に深さ方向のひずみ分布を変位分布から計算すると

$$\gamma = \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_v}{V_s} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) \quad (3)$$

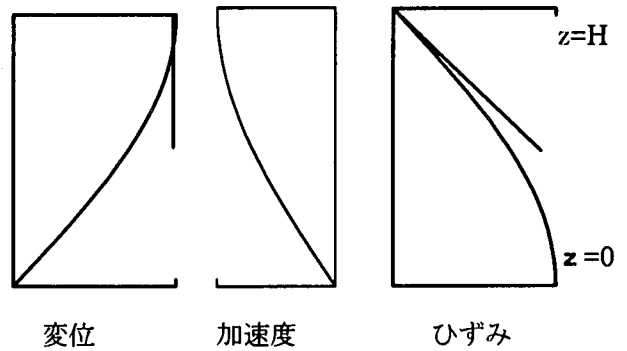


図-3 深さ方向の運動の分布

となり、基盤面で最大、地表面で0となる分布となる。なおこの時刻において速度は深さに関係なく0となっている。図3に変位が地表面で最大となる時の変位、加速度、ひずみの深さ方向の分布を示す。

雨水槽の特徴として一般に表層厚さに比べて埋設深さが小さいという特徴があるが、 $(z/H)$ が十分小さいとして、設計地震動を線形近似する。変位、加速度、ひずみの式を変形して

$$u(z) = u_0 = \frac{8H}{\pi^2 V_s} S_v$$

$$a(z) = -a_0 = -\frac{2V_s}{H} S_v$$

$$\gamma(z) = \frac{4S_v}{\pi V_s} \left( \frac{\pi}{2H} z \right) = \left( \frac{2V_s}{H} S_v \right) \frac{z}{V_s^2} = \left( \frac{a_0}{V_s^2} \right) z \quad (4) \sim (6)$$

よって、表層厚さに比べて浅い部分では、変位と加速度は深さに関わりなく一定で地表面と同じ値となり、地中のせん断ひずみは深さに比例して増加することになる。またせん断ひずみの大きさは地表の加速度に比例し、深さに比例して増大する形となっている。

#### (2) 耐震設計に考慮する荷重

幅広地下構造物の設計方法として代表的なのは「地下駐車場施設設計・施工指針」であり、この指針にしたがって地震荷重を設定する。

##### a) 構造物の自重に起因する慣性力

設計水平震度は標準値を0.2として、地域別補正係数(1.0~0.7)、地盤別補正係数(0.8~1.2)、深度別補正係数(0.5~1.0)を乗じて計算する。工場生産品であることを考えれば一定の値を採用する方が合理的であり、補正係数を除いた標準値0.2が設計水平震度として適当である。

##### b) 地震時土圧

地震時土圧は構造物の存在を考えない自然地盤の地震時地盤変位の鉛直方向の分布  $u(z)$  を用いてこれに単位面積あたりの地盤ばねを乗じて土圧計算をする。埋設深さが浅いことと構造物の高さが小さいことを考えて計算式をつくる。

構造物の重心深さを  $z_G$  として、この位置で地盤ひ

ずみを計算すると

$$\gamma(z_G) = \frac{a_0}{V_s^2} z_G \quad (7)$$

構造物の高さが大きくないことを考え、底面から計った相対変位  $\Delta u$  が直線分布すると仮定すれば、土圧  $p(z)$  も直線分布となり、

$$p(z) = k_H (\Delta u - u_{st}) = k_H \left[ \frac{a_0 z_G}{V_s^2} (z_B - z) - u_{st} \right] \quad (8)$$

と表わされる。ただし  $z_B$  は構造物下面の位置、 $u_{st}$  は構造側壁の変位である。これは側面にそった三角形の土塊の慣性力の定数倍が側圧として加わること示している。

### c) 地震時周面せん断力

雨水槽側面にはたらくせん断力は高さが幅に比べて小さいことから無視して、上面にはたらくせん断力を求める。下面にはたらくせん断力は上面より大きい偶力となって構造物のせん断変形に関与するのは上面にはたらくせん断力  $\tau$  である。

$$\tau = \rho V_s^2 \left( \frac{a_0 z}{V_s^2} \right) = \rho a_0 z \quad (9)$$

加速度振幅として設計水平震度  $k_h = 0.2$  に対応する  $k_h g$  を用いると

$$\tau = k_h (\rho g z) \quad (10)$$

となり、上載土の重量に設計水平震度をかけたものが周面せん断力になることを示される。

以上によりプレキャスト製雨水槽の構造的特徴を考慮して、地震時土圧と周面せん断力を震度法形式に置き換えた。これらの計算式は地盤条件にかかわらず設計水平震度から計算できる。

## 4. 耐震計算方法

「地下駐車場施設設計・施工指針」では箱型ラーメンを地盤バネで支持して、体積力として慣性力を、表面力として周面せん断力、側壁土圧を作用させる計算を行っている。地盤バネは設置地盤の条件を反映させて有限要素法により算出するとしているが、個別設計に対応しづらいプレキャスト製品では計算が煩雑であり、一般性を得にくい問題があると考えられる。そこで部材設計時に支配的な曲げ変形に注目して簡単な計算方法をつくる。

### (1) バネ支持の影響

バネ支持されている影響を上下面と側面に分けて考察する。上下面に作用する力は周面せん断力であり、また上下面はほぼ水平にせん断変形すると考えられる。下面に直角方向に作用するバネは鉛直方向の構造物変位を固定する役割となり、構造物に作用するモーメントとつりあうように分布反力が発生する。よって格点をヒンジ支点で支えるモデルを基本とし、格点間に分布して作用する反力を等変分布(三角形分布)の外力でおきかえて計算できる。また上

面の直角方向のバネは水平方向に変形することからその効果は小さいと考えられる。面に平行なバネの場合、下面では直角方向と同様に水平方向の剛体変位を固定して軸力を発生させる。が軸力は支配的な断面力ではないので影響は小さいといえる。上面では周辺地盤の変位につれて構造物も変位するために面に平行なバネの影響は小さいと考えられる。よって上下面のバネをとり、格点をヒンジ支点として下面に等変分布の反力を作用させるモデルで曲げモーメント、せん断力を計算すれば、地盤バネモデルと同等と考えられる。

側面にはたらく地盤バネのうち面と平行なバネは鉛直方向の変位がないことを考えると影響は小さく、無視しようとする。一方、側面に直角なバネは地震時土圧が周辺地盤と構造物の相対変位に比例すると考えているために無視し得ないバネとなる。次に側面に直角方向に作用するバネをみこんだ簡単な計算式を作成する。

### (2) 箱型ラーメンの水平せん断剛性

複数の柱で構成される箱型ラーメンのみかけの水平方向のせん断剛性を求める。高さ  $h$  の両端固定ばりの上端に強制変位  $\delta$  を与えると両端のモーメント  $M_0$  とせん断力は  $Q_0$  は次式で計算できる。

$$M_0 = \frac{6EI}{h^2} \delta, \quad Q_0 = \frac{12EI}{h^3} \delta \quad (11)$$

ただし  $EI$  は柱の曲げ剛性である。複数の柱がある場合には並列バネとみなして曲げ剛性の単純和を求めれば一般化することができる。箱型ラーメンの横幅を  $b$  として上下面にはたらくせん断力を  $Q$  とすると

$$\tau = \frac{Q}{b} = \frac{12 \sum EI}{bh^2} \left( \frac{\delta}{h} \right) \quad (12)$$

$(\delta/h)$  はみかけのせん断ひずみを表わしており、係数部はみかけのせん断剛性となる。これを  $G_{st}$  とおく。

$$G_{st} = \frac{12 \sum EI}{bh^2} \quad (13)$$

プレキャスト製雨水槽の場合は前にも述べたようにスレンダーな構造であり曲げ剛性が小さくせん断変形しやすい構造である。周辺地盤よりもみかけのせん断剛性は小さく、この点を考慮した耐震計算が必要とされる。

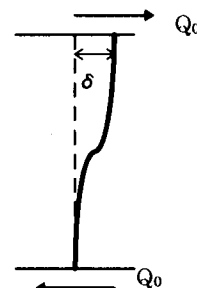


図-4 両端固定ばりの強制変位

### (3) バネ支持されたせん断ばりの計算

図5に示すようなバネ支持されたせん断ばりを考える。はりのせん断剛性を  $G_{st}b$ 、単位長さあたりのバネ係数を  $k_H$ 、はりの変位を  $u_{st}$ 、地盤変位を  $u_g$  とするとつりあい方程式は

$$-G_{st}bu_{st}'' = k_H(u_g - u_{st}) \quad (14)$$

構造物下面を基準に  $z$  軸をとると

$$(G_{st}b)u_{st}'' - k_H u_{st} = -k_H \alpha z, \quad \alpha = \gamma(z_G) \quad (15)$$

微分方程式を一般解、特解にわけて解くと

$$u_{st} = C_1 \sinh\left(\sqrt{\frac{k_H}{G_{st}b}}z\right) + C_2 \cosh\left(\sqrt{\frac{k_H}{G_{st}b}}z\right) + \alpha z \quad (16)$$

境界条件  $u_{st}(0) = 0$ ,  $u_{st}'(h) = 0$  に代入して未定の係数を求めると

$$u_{st}(z) = \alpha z - \sqrt{\frac{G_{st}b}{k_H}} \frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{k_H}{G_{st}b}}z\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{k_H}{G_{st}b}}h\right)} \quad (17)$$

構造物上面位置での地震時土圧は

$$p(h) = p_0 = \alpha \sqrt{G_{st}bk_H} \tanh\left(\sqrt{\frac{k_H}{G_{st}b}}h\right) \quad (18)$$

となる。この値から直線状に低減して土圧を作用させれば相対変位を考慮した地震荷重となる。構造物のみかけのせん断剛性が周辺地盤に比して小さくなれば構造物も地盤に追従して変形するようになり、剛体壁に作用するとした地震時土圧よりも小さな土圧となることが計算される。側壁が比較的低いことを考慮して地震時土圧の分布を直線で近似して  $p_0$  を頂点とする3角形分布で作用させることにより、地盤バネの影響を考慮した耐震計算が簡単に行える。

### (4) 耐震計算のまとめ

以上のべたことをまとめると、上載土まで含めた箱型ラーメンモデルに水平慣性力を加え、さらに側壁に逆三角形分布の地震時土圧を付加することにより、プレキャスト製雨水層について「地下駐車場施設設計・施工指針」と同等の耐震計算を行うことができる。この簡易な計算方法は地盤バネで支持された構造モデルを必要としない。また震度法を基準としているために、建設する地盤条件にかかわらず

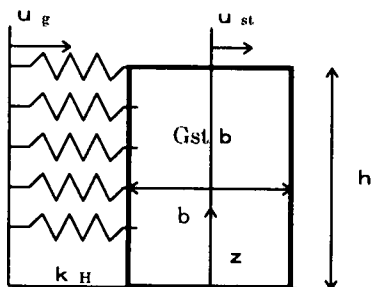


図-5 バネ支持されたせん断ばり

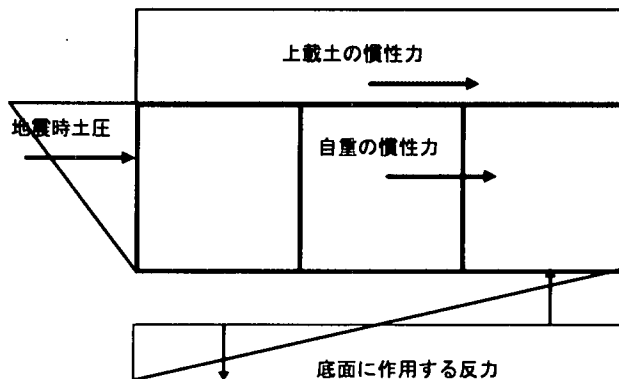


図-6 雨水槽に作用する地震力の概念図

設計水平震度 0.2 の設計を行うことができる。

### 5. まとめ

比較的浅い位置に埋設される幅広のプレキャスト製の地下構造物を対象に耐震計算方法の研究を行った。周辺地盤よりも剛性が低く変形しやすいことと、工場生産品のため個別の耐震計算には向いていない点を考慮して、震度法による計算式を考案した。既往の幅広地下構造物の設計計算と同様に慣性力、周面せん断力、側面の地震時土圧を箱型ラーメンに作用させることにより、簡易に計算を行うことができる。今後は動的解析による揺れの増幅とより大きな地震入力についての設計方法の研究を行う予定である。

### (参考文献)

- 1) 日本道路協会：地下駐車場設計・施工指針、1992
- 2) 川島一彦編：地下構造物の耐震設計（鹿島出版会）