

配水池の二次元フレーム・ばねモデルの三次元効果の一手法

(株)日本水道設計社 ○榎 信昭

山崎一義

矩形の RC 造配水池等の設計時の構造解析計算において二次元フレーム・ばねモデルがよく用いられている。このとき、同モデルに平行な側壁等の三次元的な効果を考慮しなければ、安全側の応答が得られるが、耐震補強などの場合は不経済な設計になることがある。ここでは、同モデルに三次元効果として構造の剛体変位を考慮した構造のせん断ばねモデルを用いた簡易な方法を提案し、その計算例を示した。

Key Words : 配水池、二次元フレーム・ばねモデル、剛体変位、三次元効果

1. はじめに

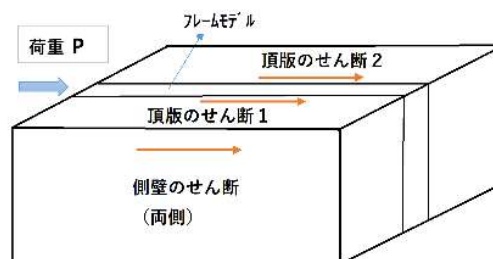
矩形の RC (鉄筋コンクリート) 造配水池等 (以下、配水池等という。) の設計時の構造解析計算において、構造を二次元フレームに、地盤や杭基礎の基礎杭をばねに置き換えたモデルがよく用いられている。このとき、二次元フレームモデル (以下、フレームモデルという。) に平行な側壁、耐震壁や隔壁等 (以下、側壁等という。) の三次元的な効果を考慮しないときは、断面力等の応答は安全側に算出される。しかし、耐震診断や耐震補強の場合は不経済な設計になることがある。このため、構造の三次元的な効果をフレームモデルに取り入れることがある。その方法として、ブレース置換モデル、壁エレメント置換モデル、D 値法、頂版を剛として側壁等をせん断ばねで置き換える方法などがある。いずれの方法も構造の三次元的な効果を近似的に二次元モデルに導入するものである。ここでは、フレームモデルに平行な側壁等とそれらとフレームモデルに接続している頂版、側壁、底版 (以下、頂版等という。) をせん断ばねでモデル化し、構造全体の剛体変位を考慮したモデルを提案する。

2. 三次元効果モデル

(1) 側壁等・頂版等のせん断抵抗ばねモデル

ここでは、フレームモデルに平行な側壁等とそれらとフレームモデルと直接つながる頂版のせん断抵抗をせん断ばねでモデル化する (図一 1)。なおこの時、構造全体の剛体変位を考慮する。

配水池等は、それに力、例えば水平力が作用したとき、側壁等は底版に対して、頂版は

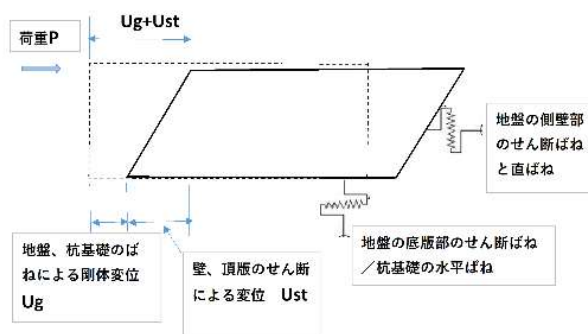


図一 1 側壁と頂版のせん断

側壁等に対してそれらの面内にせん断変形が生じる。また、このとき配水池等の周辺地盤や杭基礎の基礎杭（以下、地盤等という。）

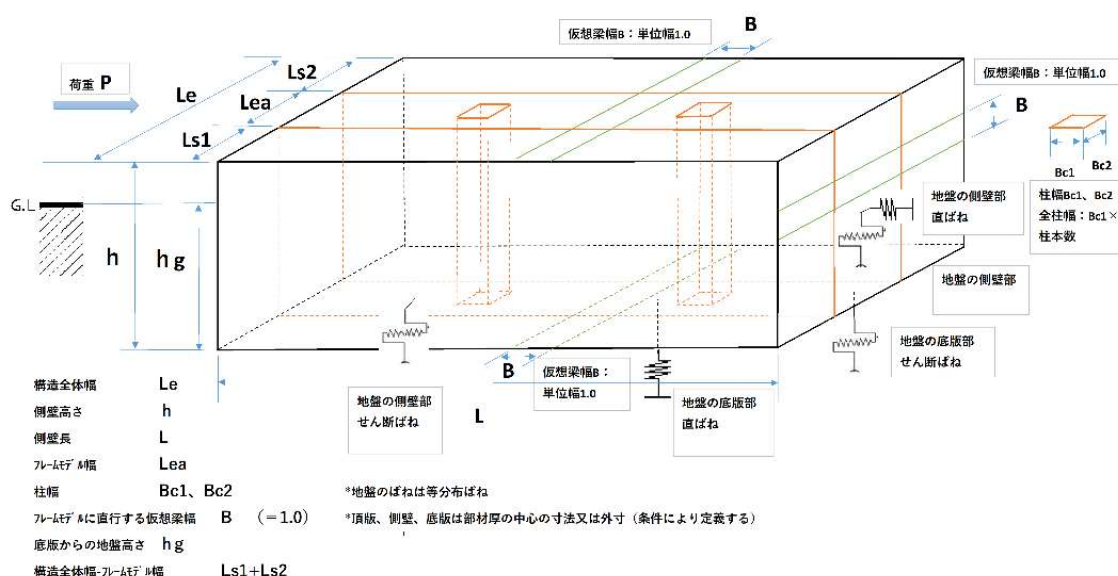
に対しては構造全体に剛体変位が生じる（図—2）。

フレームモデル（幅 Le_a ）（図—3）は、構造全体（幅 Le ）に作用する水平荷重のうち Le_a/Le の割合で分担するものとする。したがって、構造全体の側壁等と頂版のせん断ばね及び地盤等のばねのうち、フレームモデルは同じ割合で分担するものとする。



図—2 構造のせん断変位と剛体変位

いまフレームモデルの頂版部に着目するとその変位は、側壁等と頂版のせん断変位と構造全体の剛体変位の和となる。



図—3 モデル図の凡例

まず、水平荷重 P 、側壁等のせん断ばね K_w 、頂版のせん断ばね K_s のとき、側壁等のせん断変位は $U_w = P/K_w$ 、頂版のせん断変位は $U_s = P/K_s$ となる。

側壁等と頂版の変位の和は $U_{st} = U_w + U_s = P(1/K_w + 1/K_s)$ となり、側壁等と頂版の合成せん断ばねを K とすると $U_{st} = P/K$ 、すなわち、 $U_{st} = U_w + U_s = P(1/K_w + 1/K_s) = P/K$ であり、 $P \neq 0$ から側壁等と頂版のせん断ばねの直列の合成せん断ばね K は、 $K = 1 / (1/K_w + 1/K_s) = K_w K_s / (K_w + K_s)$ となる。

なお、頂版が工学的に剛とすることができるときは $U_s \equiv 0$ となり側壁等の構造の合成せん断ばねは $K \equiv K_w$ となる。なお、頂版等のうち、フレームモデルに直接つながる頂版以外の

せん断変形を考慮する場合は、同様の考え方で合成せん断ばねを求めることができる。

つぎに、地盤または杭基礎の基礎杭をばねでモデル化するとき、構造全体に作用する水平荷重 P 、地盤と基礎杭の杭軸直角方向のばね（以下、地盤等ばねという。） K_g のとき構造全体の剛体変位は $U_g = P / K_g$ である。このとき、地盤等ばね K_g は、地盤に接している側壁のフレームモデルに平行な地盤のせん断ばね K_{sg1} 、フレームモデルに直行する地盤ばね K_{vg} 、底版に接している地盤のせん断ばね K_{sg2} の和となる。ただし、杭基礎の場合は底版に接している地盤のせん断ばね K_{sg2} のかわりに基礎杭の杭軸直角方向のばね K_p を用いる。すなわち、 $K_g = K_{sg1} + K_{vg} + K_{sg2}$ （または K_p ）である。

そして、構造に水平荷重 P が作用したときの頂版部の水平変位 U は、構造のせん断変形による変位 $U_{st} = P / K$ と地盤等ばねによる水平方向の剛体変位 $U_g = P / K_g$ の和 $U = U_{st} + U_g = P (1 / K + 1 / K_g)$ である。構造のせん断ばね K と地盤等ばね K_g の合成ばねを K_t とすると $U = P / K_t$ 、すなわち、 $U = U_{st} + U_g = P (1 / K + 1 / K_g) = P / K_t$ であり、 $P \neq 0$ から構造のせん断ばね K と剛体変位に関する地盤ばね K_g の直列の合成ばね K_t は、 $K_t = 1 / (1 / K + 1 / K_g) = K K_g / (K + K_g)$ となる。

構造全体（幅 Le ）に対してフレームモデル（幅 Le_a ）に作用する水平荷重は $P \times (Le_a / Le)$ 、この荷重に対してフレームモデルが U の変位を生じるためにフレームモデルにセットするせん断ばねは $K_t \times (Le_a / Le)$ となる。フレームモデルに平行な側壁等および頂版のせん断は、フレームモデルに頂版を介して伝わることから、このばねをフレームモデルの頂版部にセットする。フレームモデルの頂版部に分布ばねとしてセットするときは、その分布ばねはフレームモデルの頂版部の長さが L_f のとき、 $K_t \times (Le_a / Le) / L_f$ となる。

以上の考え方は、側壁等や頂版等のせん断抵抗を近似的にフレームモデルに取り入れるものである。近似に当たっては、安全側に近似し、危険側にならないよう留意する。

（２）（１）の三次元効果ばねの計算例

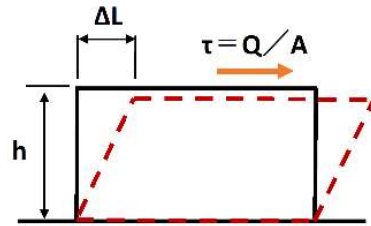
ここでは、矩形の RC 造地下式配水池の三次元効果ばねの計算例を示す。

計算対象とした配水池の外寸は、たて $5\text{m} \times$ よこ $5\text{m} \times$ 高さ 4m （底版下～頂版上）、側壁厚は 0.3m 、底版厚は 0.4m 、頂版厚は 0.25m である。基礎形式は直接基礎である。コンクリートの圧縮強度は 24N/mm^2 、ポアソン比は 0.2 、地盤の N 値は側壁部が $N=10$ 、底版部が $N=25$ である。構造幅 Le は側壁外面間の距離として 5m 、せん断ばねを求める側壁と頂版の長さは壁厚さ中心間の距離とし、せん断ばねを求める側壁高さは底版上面から頂版の厚さ中心までとする。フレームモデルは配水池の中央を通り、その幅は $Le_a = 1.0\text{m}$ である。この例では、構造のせん断ばねは側壁と頂版の合成せん断ばねを考慮している。

フレームモデルの頂版部にセットする分布せん断ばねをエクセルの表計算形式で計算した例を以下に示す。

入力
Excel参照入力

1.フレームモデル		(頂版部)
構造奥行幅	フレームモデル幅	フレームモデル長
Le	Lea	Lf
m	m	m
5.0	1.0	4.7



せん断力 $Q = \text{断面積 } A \times \text{せん断応力 } \tau$
 せん断ひずみ $\gamma = \Delta L / h$
 せん断弾性係数 G
 $\tau = Q / A = G\gamma$ $Q = G\gamma A = GA\Delta L / h$
 せん断ばね $K_S = Q / \Delta L = GA / h$

図—4 せん断変形

2.側壁のせん断ばね。		ここでは、h:底版上面～頂版中央 4.0-0.4-2.5/2=3.475m				
長さ	厚さ	面積	高さ	せん断弾性係数	せん断ばね	
Lw	T	A	h	G	Kw	
m	m	m ²	m	KN/m ²	KN/m	
4.7	0.3	1.41	3.475	10416667	4226619	側壁1
4.7	0.3	1.41	3.475	10416667	4226619	側壁2
					8453238	合計
A=Lw×T		Kw=GA/h		(図—4)		

3.頂版のせん断ばね						
長さ	厚さ	面積	幅	せん断弾性係数	せん断ばね	
L	T	A	Ls1、Ls2	G	Ks	
m	m	m ²	m	KN/m ²	KN/m	
4.7	0.25	1.175	1.85	10416667	6615991	頂版1
4.7	0.25	1.175	1.85	10416667	6615991	頂版2
					13231982	合計
A=L×T		Ks=GA/Ls1 又は GA/Ls2				

4.側壁／耐震壁と頂版の合成せん断ばね		
側壁ばね	頂版ばね	合成ばね
Kw	Ks	K
KN/m	KN/m	KN/m
8453238	13231982	5158034
$K = (Kw \times Ks) / (Kw + Ks)$		

5.地盤ばね（側壁のフレームモデルに平行なせん断ばね）					
側壁長	側壁高さ	面積	地盤反力係数	地盤せん断ばね	
Lw1	hg	Aw1	ksg1	Ksg1	
m	m	m ²	KN/m ³	KN/m	
5.0	4.0	20.0	7381	147629	側壁1
5.0	4.0	20.0	7381	147629	側壁2
				295259	合計
Aw1=Lw1×hg Ksg1=ksg1×Aw1					

6.地盤ばね（側壁のフレームモデルに直行する直ばね）				
側壁長	側壁高さ	面積	地盤反力係数	地盤直ばね
Lw2	hg	Aw2	kvg	Kvg
m	m	m ²	KN/m ³	KN/m
5.0	4.0	20.0	24605	492098
Aw2=Lw2×hg Kvg=kvg×Aw2				

7.地盤ばね（底版のせん断ばね） 杭基礎のときは なし				
底版長	底版幅	面積	地盤反力係数	地盤せん断ばね
Lb=Lw1	Bb=Lw2	Awb	ksg2	Ksg2
m	m	m ²	KN/m ³	KN/m
5.0	5.0	25.0	16972	424308
Awb=Lb×Bb Ksg2=ksg2×Awb				

8.杭の杭軸直角（水平）方向ばね → 杭なし			
杭1本のばね	杭本数	杭ばね	
kp	n	Kp	
KN/m		KN/m	
0	0	0	
Kp=n×kp			

9.地盤ばね・杭ばねの合計				
地盤ばね			杭ばね	地盤・杭ばね計
Ksg1	Kvg	Ksg2	Kp	Kg
KN/m	KN/m	KN/m	KN/m	KN/m
295259	492098	424308	0	1211665
Kg=Ksg1+Kvg+Ksg2+Kp				

10.側壁/隔壁・頂版と地盤/杭の合成ばね（地盤/杭による構造の剛体変位を考慮）					
構造合成ばね	地盤・杭ばね	全体合成ばね	構造奥行幅	フレームモデル幅	フレームばね計
K	Kg	Kt	Le	Lea	Kft
KN/m	KN/m	KN/m	m	m	KN/m
5158034	1211665	981178	5.0	1.0	196236
$Kt = (Kg \times K) / (Kg + K)$			$Kft = Kt \times (Lea / Le)$		

ここでの例では、

側壁・頂版の合成ばね K と側壁ばね Kw の比は $K/Kw=0.610$

剛体変位を考慮したばね Kt と側壁・頂版の合成ばね K の比は $Kt/K=0.190$

剛体変位を考慮したばね Kt と側壁のみのばね Kw の比は $Kt/Kw=0.116$ である。

11.フレームモデルの頂版部にセットする分布せん断ばね		
全体合成ばね	フレーム長	分布せん断ばね
Kft	Lf	Ku
KN/m	m	KN/m/m
196236	4.7	41752
$Ku = Kft / Lf$		

3. おわりに

配水池等の池状構造物は、日本で、過去の地震のときに指針「水道施設の耐震工法 水道協会 1953」に基づいて設計されたものは、地盤変状、すなわち基礎地盤等周辺地盤の滑り等の破壊、断層上の地盤変位や液状化等が主な原因となるものを除いて、地震動で壊れた例は極めて少ない。しかし、フレームモデル以外の解析モデルで設計されたと思われるものを含めた既設の配水池等を、フレームモデルを用いて構造の三次元効果を考慮せずに耐震診断を行うと、耐震性が不足する結果になることが多い。このことは、言い換えると三次元効果を考慮せずにフレームモデルを用いた構造断面の設計は、安全側にあるといえることができる。しかし、耐震補強などの場合は不経済な設計になることがある。また、配水池等がレベル 2 地震動相当の大きな地震動を受けた場合にもほとんど被害を受けていない理由として、地震時の土圧、地震動の入力損失や地盤の逸散減衰等減衰など、地盤と構造物の動的相互作用の影響が設計では安全側に取り入れられていることも考えられる。

配水池等について、レベル 2 地震動相当の実際の地震時の挙動の要因、すなわち地盤と構造物の動的相互作用が考慮された実験や地震観測などにより、ここでの三次元効果の精度の検証を行うのが望ましいが、現実にはその実施は難しい。ただし、構造に関しては、構造の FEM（有限要素法）の 3 次元モデルの解析計算結果との比較により、このモデルの三次元効果を確認することはできる。

なお、本手法は、静的解析の線形ばね・二次元フレームモデルに適用するものである。動的解析に対しては、地震時の地盤剛性の低下を考慮した地盤の線形ばねを安全側に採用した同モデルに適用できる。