

応答変位法を用いた組立立坑の非線形梁ばねモデルによる解析

Analysis of built-up type vertical shafts by a nonlinear beam-spring model using the response displacement method

國近光生*, 佐藤忠信**

Mitsuo KUNICHIKA, Tadanobu SATO and Satoru ITO

*工修 株式会社 森本組 (〒543-8558 大阪市天王寺区夕陽丘町 4-11)

**工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In the seismic design of a built-up type manhole we use a segmented beam model combining each segment with rotation and shear springs. The rotation springs should be defined by nonlinear model because of different compression and tension spring characteristics of the ring joints. The purpose of this paper is to propose efficient dimensionless parameters to define the range of applicability of the design method. The numerical analysis comparing FEM model with the one dimensional beam model of manholes reveals that a simple nonlinear beam-spring model can evaluate the response of manhole for seismic force if the manhole characteristics drop within the proper range of the proposed parameters. In addition application to one dimensional beam model of three dimensional shaft structures in response displacement method is proposed.

Key words : shaft, FEM analysis, frame analysis, static analysis, nonlinear beam-spring model

キーワード : 立坑, FEM 解析, 骨組解析, 静的解析, 非線形梁ばねモデル

1. はじめに

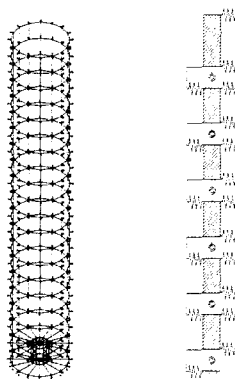
下水道でよく用いられる組立式マンホールを耐震設計する場合、従来はマンホールを単一の剛体としてモデル化し、地盤の相対変位に地盤の地盤ばねを乗じて荷重として作用させて躯体の断面力を求めていた。しかし、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震を考慮した指針の改訂に伴い、マンホールを弾性体とし、地盤ばねに支承された梁ばねモデルとして骨組計算する方法に変更された。さらに、実際の組立式マンホールの継手構造に着目し、継手の可とう性を考慮した設計が行われている。その継手は多様であるため、この多様な継手の変形性能を適切に評価する方法として、継手をばねとして評価する方法が採用されている。組立式マンホールの部材間が回転ばねとせん断ばねを有する継手で連結されている梁としてモデル化し、この梁ばねモデルに、地盤の相対変位を地盤の水平ばねを介して強制変位として作用させ、継手部や部材に発生する断面力を求める設計が行われている¹⁾。組立式マンホールのような R C 円筒リングと継手の組合せによる不連続な円筒立坑（以下、「輪切立坑」という）は、現場打ちマンホールのような剛性一様な立坑と違い、変形性能が高く各部材に発生する断面力が小さくなる。そのため大規模地震を想定した立坑の設計時に、部材力の過大な発生を防ぐことができると考えられる。しかしながら、輪切立坑の設計方法は確立さ

れているとはいえない状況であり、実務を考慮した設計方法を確立する必要がある。輪切立坑のように不連続な構造の場合、1 次元梁ばね系にモデル化できる範囲は明確ではない。リング継手の挙動を線形と仮定した場合については 1 次元梁ばねモデルの適用範囲を、地盤の特性値、立坑の高さおよび外径との関係だけでなく曲げ剛性の有効率も含めて著者らは²⁾ 評価した。このケースではリング継手の軸荷重と軸変位の関係を線形と仮定したが、通常リング継手に引張と圧縮が作用する場合では剛性が異なるため、リング継手の非線形性あるいは非対称性を考慮して解析しなければならない。そのためには、それらを考慮したリング継手の回転ばね定数を算出し、それを踏まえての 1 次元梁ばねモデルの適用範囲を明確にしておく必要がある。また、実務における地中構造物の耐震設計では、応答変位法を用いた解析が行われるため、実際の地震動による応答変位を用いて解析し現象を評価する必要がある。そこで、本研究では、リング継手の非線形性を考慮した場合の 3 次元と 1 次元モデルでの解析を行うことにより、1 次元梁ばねモデルの適用範囲を検証する。また、応答変位法を用いた解析も 3 次元と 1 次元モデルでの解析を行い、両者の適合性についても評価する。

2. 解析概要

2.1. 解析対象およびモデル

解析に用いた3次元FEMモデルおよび1次元梁ばねモデルを図-1に示す。3次元FEMモデルについては、円筒リングを平板シェル要素で、底版部はソリッド要素で、円周方向に16分割して近似する。図-2に平板シェル要素の応力図を示し、3次元FEMモデルにおける立坑の断面力はこの応力を基に算出する。また、周辺地盤を地盤ばねで評価し、地盤ばねを立坑側面に対して法線および接線方向に、立坑底面に対して鉛直およびせん断方向に配置する。円筒リングを連結するリング継手は軸方向・せん断方向・軸回転方向の合計6方向のばねで評価する。また、地盤ばねは立坑側面に対しては法線および接線方向に、立坑底面に対しては鉛直およびせん断方向に配置する。一方、1次元梁ばねモデルについては、円筒リング間を回転ばねとせん断ばねを有する継手で連結されている梁要素として評価し、周辺地盤を地盤ばねで評価する。なお、地盤ばねは圧縮力が作用したときのみ働き、引張力が生じたときは荷重を伝達しないものとする。



3次元FEMモデル 1次元梁ばねモデル

図-1 解析モデル

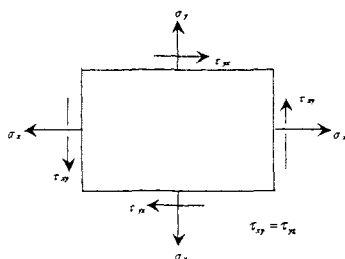


図-2 平板シェル要素の応力図

2.2. 梁ばねモデルにおけるリング継手の非線形性の評価

(1). 概要

図-3に示すように、通常リング継手は引張と圧縮が作用する場合では剛性が異なるので、リング継手の非線形性あるいは非対称性を考慮して解析しなければならない。そ

のためには1次元梁ばねモデルにおいて、それらを考慮したリング継手の回転ばね定数を算出する必要がある。本解析においては、計算の便宜上、圧縮側および引張側にピークは存在せず、無限に圧縮荷重および引張荷重に抵抗するとした。引張側の降伏点はボルト継手における継手板が降伏する場合を対象とした。

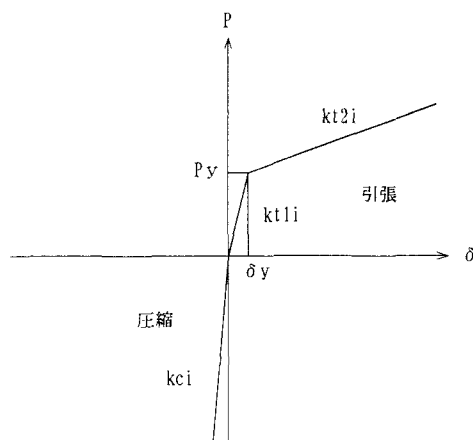


図-3 リング継手ばねの荷重変位曲線

なお、図中の横軸は軸変位(δ)、縦軸は軸荷重(P)を示す。 P_y および δ_y は引張による降伏時の軸荷重と軸変位を表す。 k_{t1} は初期引張ばね係数、 k_{t2} は降伏時以降ばね係数、 k_c は圧縮時のばね係数である。

(2). リング継手の非線形性を考慮した回転ばねの評価

図-4に示すリング継手ばねのつりあい関係から、曲げモーメントと回転の関係を求める。リング継手部の回転角 θ と最端部の引張変位 δ_t および圧縮変位 δ_c を次式に示す。

$$\delta_t = (rs+x) \cdot \theta \quad \cdots (1)$$

$$\delta_c = \left(\frac{D}{2} - x\right) \cdot \theta \quad \cdots (2)$$

個々の継手部の変位 δ_t および δ_c は中立軸 x から比例関係にあり、リング継手を円筒リング幅の中心に配置する。この場合に作用する軸力 N および曲げモーメント M は、次式で示される。円筒リングの圧縮力および曲げモーメントの算出に関しては、志波ら³⁾の論文を参照した。

$$N = Ft - Fc \quad \cdots (3)$$

$$= \sum_{i=1}^N p(\delta_{ti}) - 2 \cdot \frac{Es \cdot \varepsilon_c}{\left(\frac{D}{2} - x\right)} \cdot r \cdot t \int_0^{\frac{\pi}{2} - \varphi} (r \cdot \cos \varphi - x) \cdot t \cdot r \cdot d\alpha$$

$$= N^*$$

ここに、

$$\delta_{ti} < \delta_y : p(\delta_{ti}) = k_{t1} \cdot \delta_{ti}$$

$$\delta_{ti} \geq \delta_y : p(\delta_{ti}) = k_{t1} \cdot \delta_y + k_{t2} \cdot (\delta_{ti} - \delta_y)$$

$$M = \sum_{i=1}^N p(\delta t_i) \cdot (rs_i + x) - 2 \cdot \frac{Es \cdot \varepsilon_c}{\left(\frac{D}{2} - x\right)} \cdot r \cdot t \int_0^{\frac{\pi}{2} - \varphi} (r \cdot \cos \varphi - x)^2 \cdot t \cdot r \cdot d\alpha \quad \dots (4)$$

- ここに、
- N*: 構造物自重としての軸力
 - Ft: リング継手引張力
 - Fc: 円筒リング圧縮力
 - δy : 降伏軸変位
 - Py: 降伏軸荷重 (=k_tl_i · δy)
 - ε_c : 円筒リング圧縮縁ひずみ
 - Es: 円筒リング弾性係数
 - r: 円筒リング中心半径
 - ls: 円筒リング幅

各リング継手にk_ti,rs_iを設定し、回転角 θ を仮定し、軸力Nの釣り合いより中立軸xを求めて、曲げモーメントMを算出する。これを繰り返してM- θ 曲線を求め、回転ばねK θ を求める。以上より、回転ばねK θ は、バイリニア曲線で表現でき、その一例を図-5に示す。

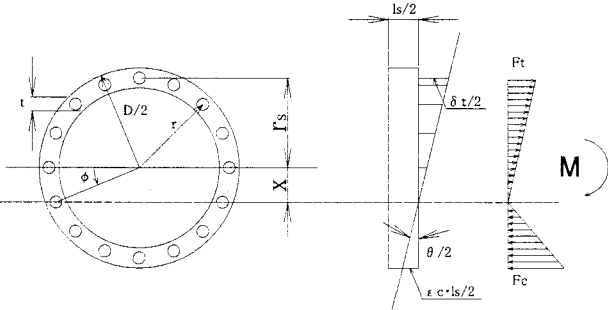


図-4 リング継手ばねのつりあい関係

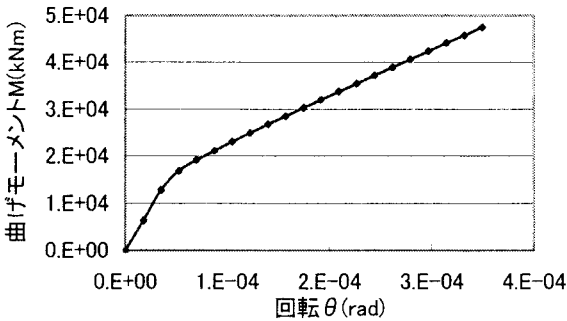


図-5 リング継手部の曲げモーメントと回転の関係

(3) 種々の立坑および地盤条件下での3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルの比較

a. 概要

リング継手の非線形を考慮した回転ばねを用いて1次元梁ばねモデルへの適用性を検証するために3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルの比較解析を試みる。

b. 解析条件

表-1に示すように解析対象の構造物として12 (=4×3)タイプの立坑を想定し、リング継手特性を表-2に示す。1次元梁ばねモデルでは、リング継手部を回転ばねとせん断ばねで表現し、回転ばねは前節に示すように軸方向のリング継手と円筒リングから算出し、せん断ばねは通常リング間にずれ止め防止のせん断キーが用いられることが多いため大きな値(1×10⁹ kN/m)を設定する。一方、3次元FEMモデルでは、円筒リング間にリング継手を配置し、各継手に軸方向、せん断方向および軸回転方向のばねを設定する。なお、せん断方向ばね定数は1×10⁹ (kN/m)で、軸回転方向ばね定数は1.0×10⁵ (kNm/rad)とする。また、周辺地盤として、N値が10, 20, 30の3パターンの一様地盤を考え、立坑底版ではN値が50とし、その効果を地盤ばねにより表現する。また、立坑側面の地盤の水平方向地盤ばね係数、立坑底面の地盤のせん断および回転ばね係数は、日本下水道協会の「下水道施設耐震計算例-管路施設編-」¹⁾により算出した。荷重条件は、図-6に示すように立坑の最上部にH=3000kNの水平荷重を作用させ、リング継手を降伏させる。

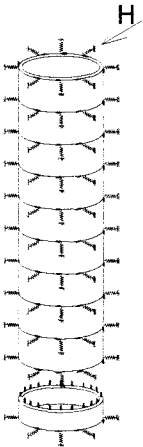


図-6 荷重作用モデル(3次元立坑の場合)

表-1 解析モデル(単位:m)

Type	外径	側厚	高さ	分割高	底版厚
	D	t	L	B	F
Type1	4.45	0.225	Type 毎 に 10, 20, 40	高さの 1/20	
Type2	6.55	0.275			
Type3	8.65	0.325			
Type4	10.80	0.400			

表- 2 リング継手特性

ケース	引張弾性 ばね定数	引張降伏 ばね定数	降伏 比	圧縮 ばね 定数	降伏 変位
	kN/m	kN/m	—	kN/m	m
Case①	1.0×10^5	2.5×10^4	0.25	1.0×10^8	3.0
Case②	1.0×10^6	2.5×10^5			$\times$
Case③	1.0×10^7	2.5×10^6			10^{-4}

(c) 解析パラメータ

3次元FEMモデルおよび1次元梁ばねモデルでの断面力を比較するために解析パラメータとして βL , L/D および η を導入する。 βL は地盤の特性値 β と立坑の全長 L と積である。地盤の特性値 β は次式で定義される。

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{kh \cdot D}{4 \cdot E \cdot I}} \quad \dots (5)$$

ここに、 kh は地盤反力係数を、 D は立坑の外径を、 E ：円筒リングのヤング係数、 I ：円筒リングの断面二次モーメントを示す。

L/D は立坑の外径 D に対する立坑の全長 L の比を示し、次式で定義される。

$$L/D = \frac{L}{D} \quad \dots (6)$$

η は立坑の曲げ剛性の有効率を示し、円筒リング間に継手のない様連続な円筒リングと考えたときの鉛直方向の曲げ剛性 $E \cdot I$ と、等価な曲げ剛 $(E \cdot I)_{eq}$ との比を意味し、次式で定義される。

$$\eta = \frac{(E \cdot I)_{eq}}{E \cdot I} \quad \dots (7)$$

ここに、 $(E \cdot I)_{eq}$ は立坑の等価曲げ剛性

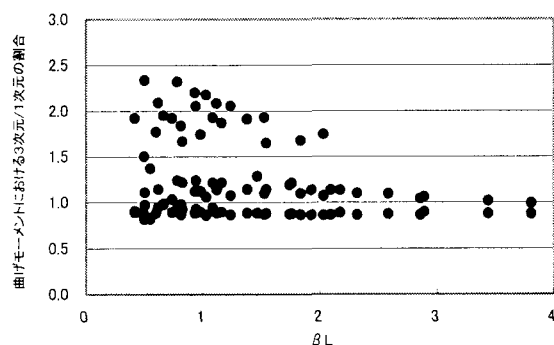
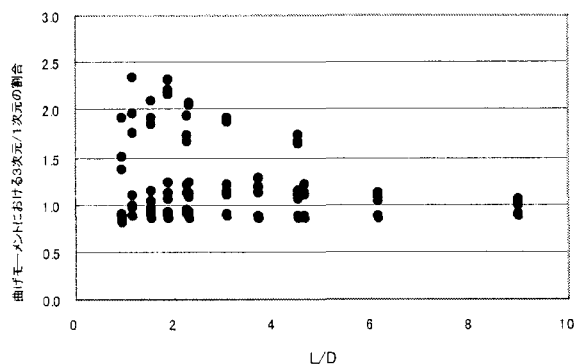
$$(E \cdot I)_{eq} = \frac{K \theta}{K \theta + \frac{E \cdot I}{L}} \cdot E \cdot I \quad \dots (8)$$

なお、 $K \theta$ はリング継手部の回転ばね定数で、図- 5 に示すリング継手部の曲げモーメントと回転の関係における初期勾配から算出した。

(d) 解析結果

解析ケースとしては、立坑12タイプ×地盤3パターン×リング軸方向ばね3パターンの108ケースである。3次元FEMモデルによる解析結果と1次元梁ばねモデルの結果を比較するために、両者の最大曲げモーメントおよび最大せん断力の比を、解析パラメータ(βL , L/D ならびに η)の関数として示したのが図- 7～図- 12 である。最大曲げ

モーメントに関しては図- 7 および図- 8 に示すように βL および L/D が大きくなると1次元解析に対する3次元解析の割合が1.0に近づくが、それらのタイが小さいところでは、かなりのばらつきがある。曲げ剛性の有効率 η に関しては図- 9 に示すように η が0.05以上では両者の割合がほぼ1.0に近づく傾向にある。一方、最大せん断力に関しては図- 10～図- 12 に示すようにどの解析パラメータにおいても1次元解析結果と3次元解析結果の比は全体的に1.0である。リング継手の非線形性を表現するパラメータは降伏荷重、降伏変位あるいは回転ばね定数など、かなりの数になるので、あらゆるケースに適用されるとは断定できないが、今回の解析結果から判断すると、リング継手の非線形性を考慮した1次元梁ばねモデルで3次元的效果を精度よく表現できる曲げ剛性の有効率の範囲は、 $\eta > 0.05$ となる。そこで、 $\eta > 0.05$ の場合に対して、3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルによる解析結果の最大曲げモーメントの比と、 βL および L/D との関数として図- 13 および図- 14 に示す。これより最大曲げモーメントの比は、 $\beta L > 0.5$ ならびに $L/D > 1$ 程度で、ほぼ1.0に近づくことが分かる。したがって、今回の解析結果から判断すると、リング継手の非線形性を考慮した1次元梁ばねモデルで組立立坑の応答特性を表現するための適用範囲は、 $\eta > 0.05$, $\beta L > 0.5$ および $L/D > 1$ となる。さらに、より汎用性を持たせるには他のケースについても解析を行い、データを蓄積していく必要がある。

図- 7 βL と3次元/1次元の最大曲げモーメント比図- 8 L/D と3次元/1次元の最大曲げモーメント比

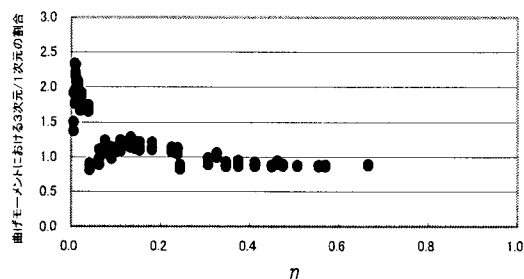


図- 9 η と 3 次元 / 1 次元の最大曲げモーメント比

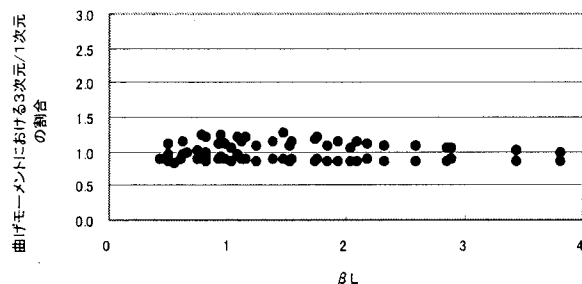


図- 13 βL と 3 次元 / 1 次元の最大曲げモーメント比
($\eta > 0.05$ の場合)

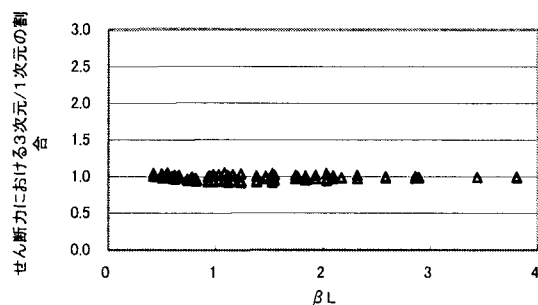


図- 10 βL と 3 次元 / 1 次元の最大せん断力比

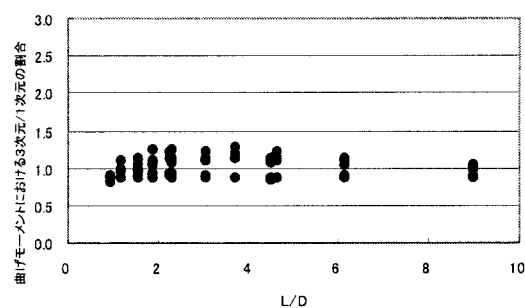


図- 14 L/D と 3 次元 / 1 次元の最大曲げモーメント比
($\eta > 0.05$ の場合)

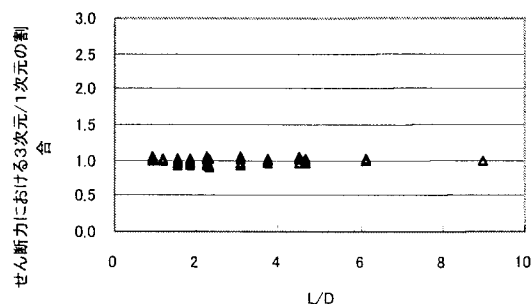


図- 11 L/D と 3 次元 / 1 次元の最大せん断力比

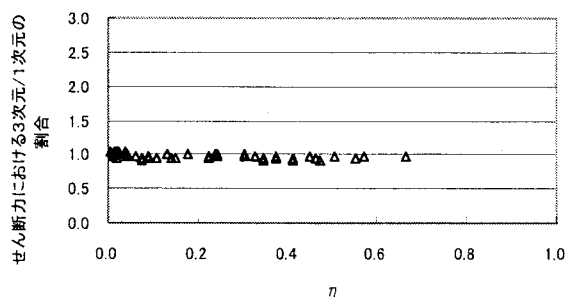


図- 12 η と 3 次元 / 1 次元の最大せん断力比

3. 応答変位法を用いた非線形梁ばねモデルの解析

3. 1. 概説

リング継手の非線形性を考慮した回転ばねを用いて実際の立坑と地盤を想定して、応答変位法による 3 次元解析と 1 次元解析を比較する。

3. 2. 解析条件

(1). 解析モデル

図- 15 に示すように地盤中に立坑が埋設され、立坑底版は硬質地盤で支持されたモデルを想定し、硬質地盤の下端に地震波形を入力する。立坑の仕様としては、外径 D を 6.55m、厚み t を 0.275m、全長 L を 40.0m、分割高さ B を 2.0m とした。6 パターンのリング継手を考えた。それらの特性と曲げ剛性の有効率を表- 3 に示す。

(2). 地震荷重

解析に用いたレベル 1 およびレベル 2 地震波形⁴⁾を図- 16 および図- 17 に示す。また、応答変位法に用いる地震荷重としては、自然地盤を対象とした 1 次元地震応答解析を実施し、①地盤変位による荷重、②地震時周面せん断力、および③立坑の慣性力を考慮する。なお、地震波を入力した

位置は立坑底面のある硬質層の下層である。具体的には、地震変位による荷重は、一次元重複反射理論により求めた地盤の応答変位を、地盤ばねを介して立坑に作用させる。地震時周面せん断力は、一次元重複反射理論により求めた地盤応答変位の層間の勾配にせん断弾性係数を乗じた荷重を用いる。慣性力は、立坑の質量に地震時の地盤加速度を乗じた値とする。地震時地盤加速度は、一次元重複反射理論により求めた地盤加速度を用いる。レベル 1 およびレベル 2 の相対変位を図- 18 に示す。なお、相対変位は 1 次元地盤の等価線形地震応答解析により算出した。レベル 2 地震動を対象とした場合には、大きな地盤ひずみが発生し、解析の上限として規定されている地盤ひずみの有効範囲を多少超えたが、本論文では解析モデルの比較を対象としているので、得られた結果をそのまま用いた。

表- 3 リング継手特性

Case		1	2	3	4	5	6
有効率 η	%	10	17	24	34	40	57
引張ばね ($\times 10^3$)	KN/m	3	6	10	20	30	100
圧縮ばね	KN/m	1×10^8					
降伏比	—	0.25					
降伏変位	m	3×10^{-4}					

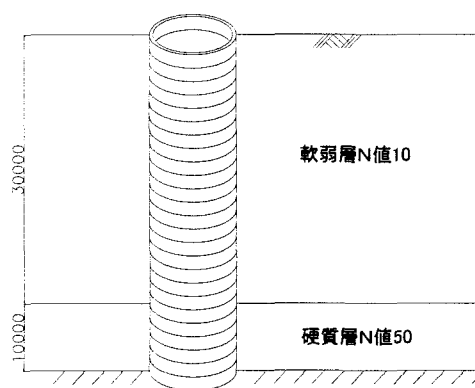


図- 15 立坑および地盤モデル

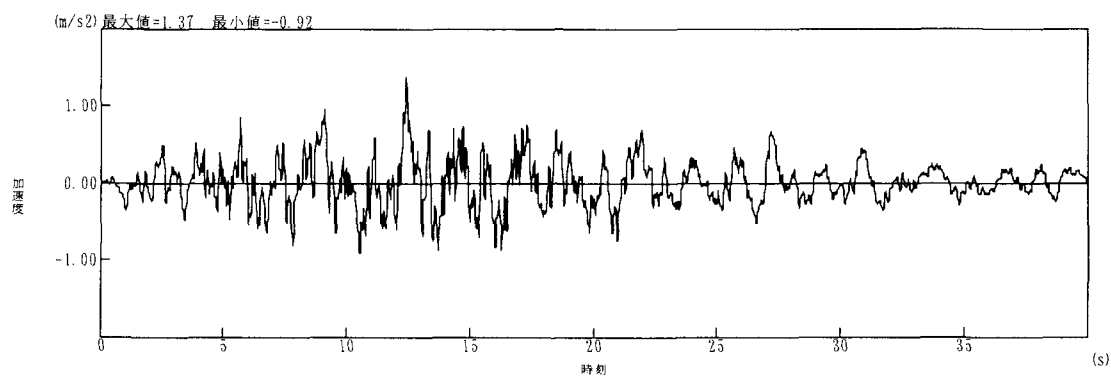


図- 16 レベル 1 地震動 (模擬地震波形) ⁴⁾

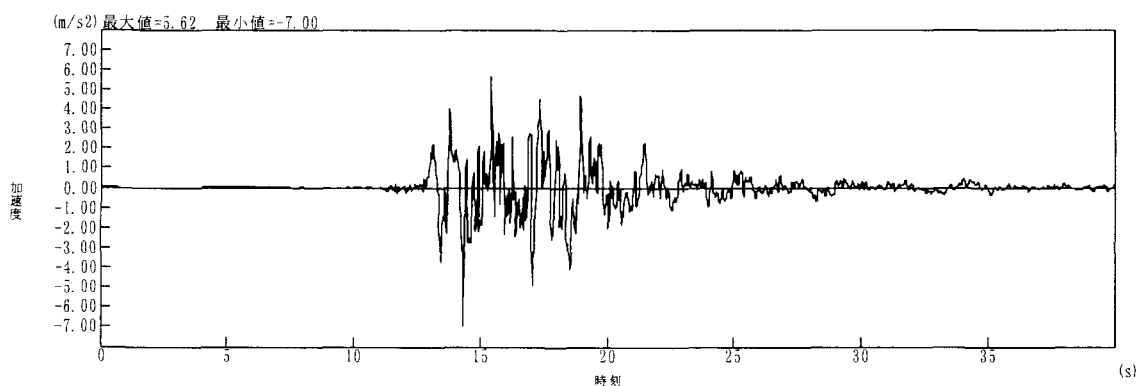


図- 17 レベル 2 地震動 (模擬地震波形) ⁴⁾

3. 3. 解析結果

解析ケースは地震動2パターン×リング軸方向6パターンの12ケースである。3次元FEMモデルおよび1次元梁ばねモデルから求められる最大曲げモーメントの比率、最大せん断力の比率および最大水平変位の比率と曲げ剛性の有効率 η との関係を図-19および図-20に示す。これより、最大水平変位および最大せん断力に関してレベル1およびレベル2のいずれも1次元モデルで3次元モデルの解析結果を近似できることが分かる。しかし、最大曲げモーメントに関しては、曲げ剛性の有効率 η が小さくなるほど、3次元と1次元の比が大きくなり、かつ地震レベルが大きくなるほど両者の差が大きくなっており、1次元モデルでは断面力が過小評価されることになる。この原因として、回転ばねの算定に当たっては、リング継手の特性と円筒リングの自重を考慮するが、中立軸の位置が最初に設定したとき状態のままであり、地震レベルが大きくなるほど中立軸の位置が移動し、回転ばね値が変化したことが挙げられる。3次元モデルによる解析結果から中立軸の位置を算出し、それを用いて1次元梁ばねモデルにおけるリング継手の回転ばねを計算して解析した結果、ほぼ一致した。Case1でレベル2地震動の場合の曲げモーメントおよびせん断力の分布図を図-21および図-22に示す。しかし、実際の立坑での曲げ剛性の有効率は数%程度であるのと、設計実務上は3次元ではなく1次元で解析されるのが一般的であるため、これらの解析結果を有効に活用して1次元モデルで評価する方法が必要とされる。そこで、1次元解析結果を3次元モデルによる解析結果に近づけるための検討を加えた。図-19および図-20から分かるように1次元モデルの解析結果は3次元モデルと比較してかなり小さい。リング継手の剛性が小さくなり地震動レベルが大きくなるほど両者の差は大きくなる傾向にある。その原因はリング継手部の中立軸が移動することであると考えられる。そこで、最も両者の差が大きいCase1について以下に検討する。3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルの解析結果から各リング継手部における軸変位を算出し、回転角との関係で表現したものを図-23および図-24に示す。レベル1地震動の場合、回転角が大きくなるにつれ軸変位量も増大し、ある地点からほぼ一定となる。一方、レベル2地震動では回転角がレベル1地震動と比較して大きいため軸変位は回転角と比例関係ではなく、ほぼ一定値から更に回転角が大きくなると増大する傾向にある。この関係を用いて軸変位量を加味して中立軸の位置を求め、リング継手部の曲げモーメントと回転角の関係を再度計算して回転角を求め、上記の関係から軸変位量を算出し、その軸変位量が収束するまで計算することとした。そのときのCase1のリング継手でのレベル1およびレベル2での曲げモーメントおよびせん断力の解析結果を図-25～図-28に示す。図中の“FEM”と表示されているのが3次元FEMモデルによる結果であり、

“はり”と表現されているのが最初の1次元梁ばねモデルによる結果であり、“修正はり”と表現されているのが収束計算した結果である。この図から分かるように1次元モデルによる解析結果と3次元モデルによる解析結果がほぼ一致している。しかし、立坑、地盤条件および地震荷重の組合せ方法は膨大であるので全ての場合に適用できるとは断定できないため、より汎用性を持たせるには他のケースについても解析を行い、特に軸変位と回転角の関係についてデータを蓄積していく必要がある。

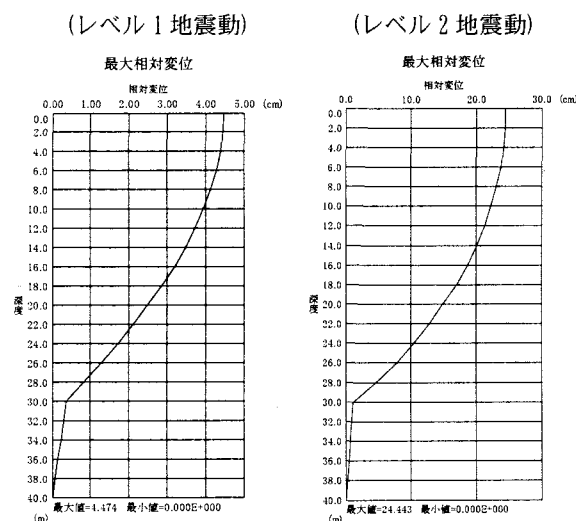


図-18 相対変位

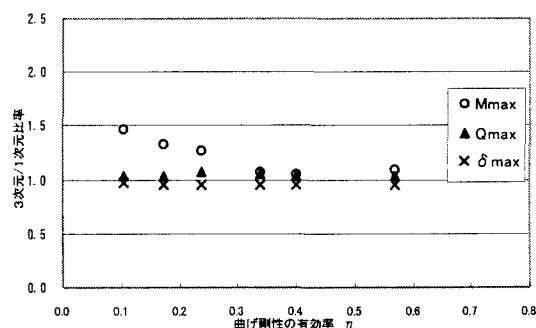


図-19 曲げ剛性の有効率 η と3次元/1次元の比率
(レベル1地震動)

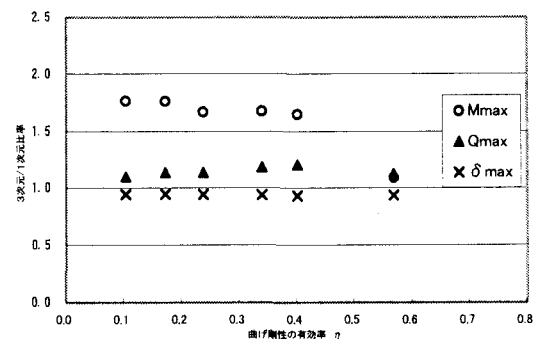


図-20 曲げ剛性の有効率 η と3次元/1次元の比率
(レベル2地震動)

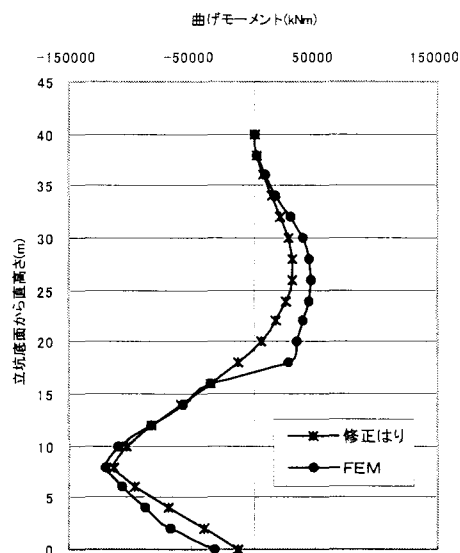


図- 21 曲げモーメント図 (Casel:レベル2 地震動)

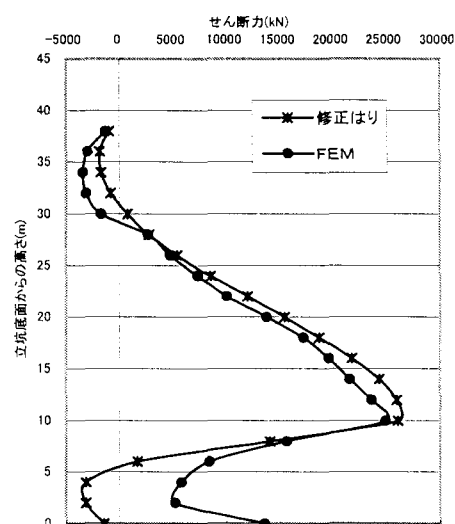


図- 22 せん断力図 (Casel:レベル2 地震動)

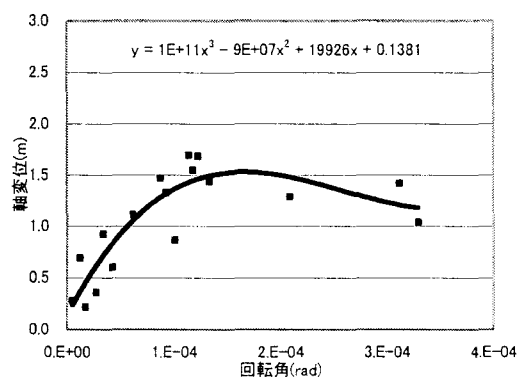


図- 23 回転角と軸変位との関係(Casel:レベル1 地震動)

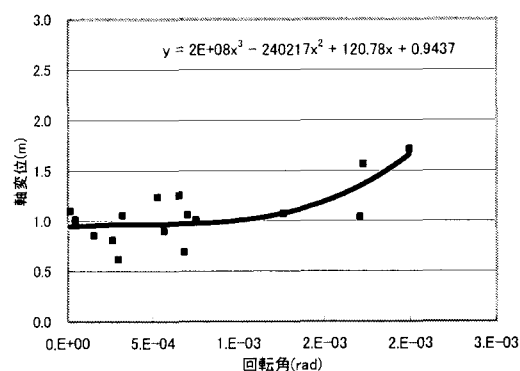


図- 24 回転角と軸変位との関係(Casel:レベル2 地震動)

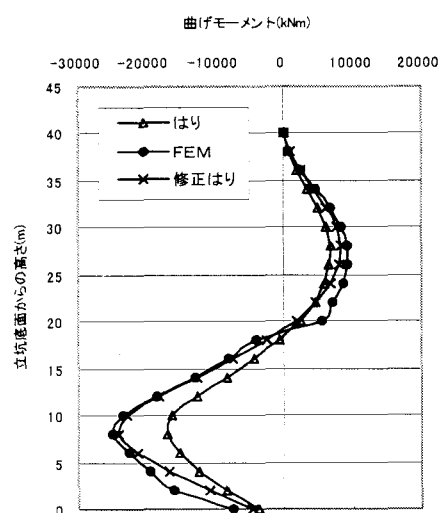


図- 25 曲げモーメント図 (Casel:レベル1 地震動)

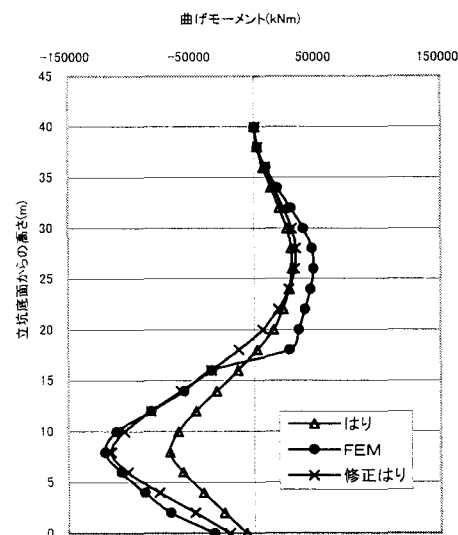


図- 26 曲げモーメント図 (Casel:レベル2 地震動)

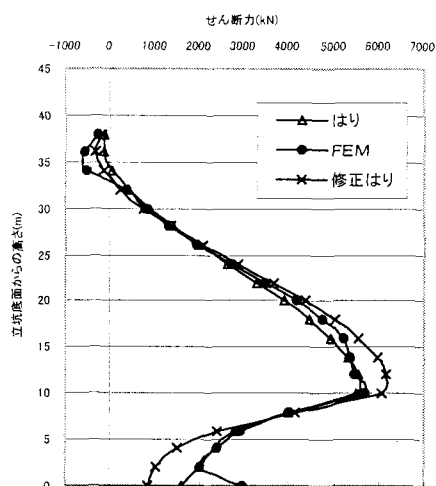


図- 27 せん断力図 (Case1: レベル1地震動)

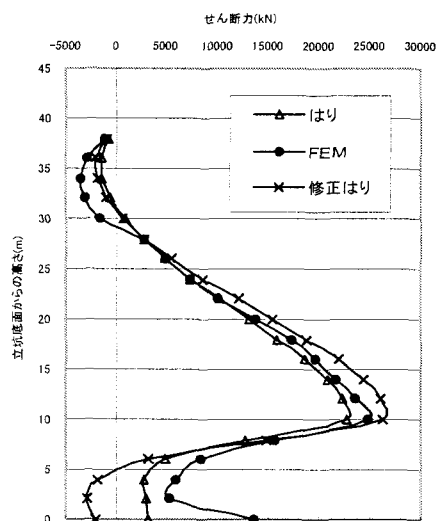


図- 28 せん断力図 (Case2: レベル2地震動)

4. まとめ

本研究では、3次元FEM解析を行い、実務レベルでの設計手法としてリング継手の非線形性を考慮して1次元梁ばねモデルによる解析を行い、3次元FEM解析結果の再現性について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- a. リング継手の非線形性を考慮した回転ばねを評価すると曲げモーメントと回転角とはバイリニアの関係にある。また、輪切立坑における3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルによる解析結果から、輪切立坑に関しては、1次元梁ばねモデルの適用範囲は、 βL 、 L/D および η で評価することができ、解析結果から判断してその適用範囲は、 $\eta > 0.05$ 、 $\beta L > 0.5$ および $L/D > 1$ となった。
- b. 応答変位法の解析でリング継手の非線形性を考慮した

回転ばねを用いて3次元FEMモデルと1次元梁ばねモデルを比較した結果、曲げ剛性の有効率が小さくなるほど最大曲げモーメントに関しては両者の相違がかなり大きくなる。最大せん断力に関しては多少大きくなる程度であることが判明した。しかし、実際の立坑での曲げ剛性の有効率は数%程度であるのと、設計実務上は1次元梁ばねモデルにより解析されるのが一般的であるため、これらの解析結果を有効に活用して1次元梁ばねモデルで評価する方法を検討した。結果として、リング継手における軸変位量と回転角の関係をを用いれば1次元梁ばねモデルによる解析結果で3次元FEMモデルによる解析結果をよく近似できることが分かった。しかし、立坑、地盤条件および地震荷重の組合せ方法は膨大であるので全ての場合に適用できるとは断定できないため、より汎用性を持たせるには他のケースについても解析を行い、データを蓄積していく必要がある。

今後は、静的解析において実際の地震動による応答変位を用いて解析し現象を評価するだけでなく、動的解析による検証や構造物あるいは地盤の非線形性を考慮した解析の実施により、より地震時の挙動を的確に把握できるように検討していく予定である。

最後に、今回の成果をまとめるにあたり、ご指導・ご協力を頂いた関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道施設耐震計算例-管路施設編-，日本下水道協会，2001年版
- 2) 國近光生，佐藤忠信，伊東悟：不連続円筒立坑における1次元モデルへの適用，構造工学論文集 Vol. 50A，2004年3月
- 3) 志波由紀夫，川島一彦，大日方尚巳，加納尚史，シールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法，土木学会論文集 No.398，I-10，1998，10
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕，2002年
- 5) 川島一彦：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会，pp. 151-152，1994年6月。
- 6) 國近光生，佐藤忠信：応答変位法における3次元立坑構造物の1次元梁モデルへの適用，第48回地盤工学会シンポジウム，2003年11月。
- 7) 小泉淳，村上博智，西野健三：シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について，土木学会論文集 No.394/III-9，pp. 79-88，1988年6月。
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編，2002，3，p131
- 9) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説1997年版，1997年9月。

- 10) 日本下水道協会: シールド工事に用標準セグメント, 2001 年 7 月.
- 11) 大保直人, 林和生, 上野建治, 鄭京哲: 大深度鉛直地下構造物の耐震設計用地震荷重, 鹿島技術研究所年報, pp. 63-70, 1992 年 10 月.
- 12) 土木学会関西支部: シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン (案), 2001 年.
- 13) 大塚久哲: 最新 地中・基礎構造の耐震設計, 九州大学出版会, 2001 年 11 月.
- 14) 土木学会: トンネルライブラリー第 9 号 開削トンネルの耐震設計, 1998 年 10 月.
- 15) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル, 2002 年 12 月.
- 16) 鉄道総合技術研究所: シールドトンネル設計標準に関する手引き, 2001 年 3 月.
- 17) 土木学会: 土木構造物の耐震設計入門, 平成 13 年 10 月.
- 18) 土木学会: トンネルライブラリー第 6 号 セグメントの設計, 1994.
- 19) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 1) シールドトンネルの等価剛性の評価および応答変位法の適用, 第 2262 号, 1985 年 10 月.
- 20) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 2) 覆工の軸剛性の非線形性を考慮した動的応答解析, 第 2277 号, 1985 年 12 月.
- 21) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 3) 鉄筋コンクリートシールドセグメントの載荷実験, 第 2381 号, 1986 年 4 月.
- 22) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 4) トンネル軸直角方向の地盤の変化を考慮した併設シールドの地震応答解析, 第 2496 号, 1987 年 2 月.
- 23) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 5) 軸方向正負交番荷重を受けるシールドトンネル模型の実験, 第 2649 号, 1987 年 7 月.
- 24) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 6) 正負交番の曲げ及びねじり荷重を受けるシールドトンネル模型の載荷実験, 第 2786 号, 1989 年 7 月.
- 25) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 7) 曲線部を有するシールド管梁に生じる地震力の検討, 第 2920 号, 1990 年 11 月.
- 26) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 8) シールド管渠の地震応答に及ぼす立杭の影響, 第 2815 号, 1988 年 2 月.
- 27) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 9) シールドトンネル曲線部に生じる地震力の検討, 第 3007 号, 1991 年 6 月.
- 28) 建設省土木研究所: シールドトンネルの耐震性に関する研究 (その 10) 二次覆工剛性に関する正負交番載荷実験, 第 3516 号, 1997 年 6 月.
- 29) 建設省土木研究所: 鉄筋コンクリート製シールドトンネルの耐震設計法に関する研究, 第 188 号, 1993 年 3 月.
- 30) 建設省土木研究所: シールドトンネル履行構造特性に関する研究報告書—シールドセグメント用継手の載荷実験—, 第 2599 号, 1988 年 3 月.
- 31) 国土交通省: 大深度地下使用技術指針・同解説, 平成 13 年 6 月.
- 32) 土岐憲三: 構造物の耐震解析, 技報堂出版, 1981.
- 33) 日本道路協会: 共同溝設計指針, pp858, 1986.
- 34) 田村武, 足立紀尚, 廣松智樹, 坂本寛章: 剛体セグメントを用いたシールドトンネルの 3 次元解析, 土木学会論文集 No.652/Ⅲ-51, 61-72, 2000. 6.
- 35) 日本トンネル技術協会: 電力用立坑の性能照査型設計の手引き, 平成 14 年.
- 36) 日本トンネル技術協会: シールドトンネルを対象とした性能照査型設計法のガイドライン, 平成 15 年 6 月.

(2004 年 9 月 17 日受付)