

論文

# 組み立て方法の違いを考慮した 分割立坑の耐震性能評価

國近 光生\*・佐藤 忠信\*\*

## Evaluation of seismic capacities of divisional shafts with different assembly methods

Mitsuo KUNICHIKA\* and Tadanobu SATO\*\*

### Abstract

We have reported an earthquake-resistant design method for divisional shaft based on the response displacement method. In this paper, to make clear the effect of shaft flexibility to the shaft response we analyze segmented shafts, which are composed of (1) circular rings with blotted joints between them, (2) staggered segments with steel bolts between them and (3) butted segments with steel bolts. As the results a proper selection of the rigidity of segment joints enables the reduction of induced stresses in the segments caused by earthquake force.

キーワード：分割立坑, FEM, 静的解析, 応答変位法

Key words: divisional shaft, FEM, static analysis, response displacement method

### 1. はじめに

地盤中に設置される立坑は、要求される用途の多様化により、大規模で大深度化する傾向にある。その立坑の応答特性を検証するために、応答変位法を用いて立坑と地盤との剛性比を考慮した立坑の応答解析を行った<sup>1)</sup>。さらに、大規模で大深度化する傾向にある立坑の変形性能を向上させる方

法の一つとして、立坑をエレメントに分割し、各エレメントを鋼製のボルトなどで連結して、立坑全体を柔軟な構造にする方法が考えられる。このような構造特性の変更による断面力の低減効果を検証するために、エレメントと継手で構成された不連続な立坑（以下に、「不連続立坑」という）と従来の部材が連続した立坑（以下に、「連続立坑」

\* 株式会社 森本組（京都大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程）  
MORIMOTO Corp.

\*\* 京都大学防災研究所  
Disaster Prevention Institute of Kyoto University

本論文に対する討論は平成17年5月末日まで受け付ける。

という)をそれぞれモデル化し、発生する断面力や変位などの応答特性を比較するために、円形リングを鉛直方向に積み上げてリング間をボルトにより連結した立坑(以下に、「輪切立坑」という)について解析を行い、断面力の低減度合を検証した<sup>1)</sup>。しかしながら、大口径の立坑では、リングを分割して組み立てられるため、エレメントの組み合わせ方法により挙動が異なることが予想される。そこで、本研究では、立坑要素の組み合わせ方法の違いによる応答特性を評価し、合理的な組み立て方法を検証するために、①輪切立坑、②円弧状のエレメントを千鳥状に配置し、各エレメントをボルトにより連結した立坑(以下に、「千鳥組立坑」という)、③エレメントをイモ継ぎ状に配置し、各エレメントをボルトにより連結した立坑(以下に、「イモ継立坑」という)の3つのモデルについて解析を行い、連続立坑および分割立坑の応答特性を評価し、構造特性の変更による断面力の低減効果を検証する。なお、立坑の解析手法は3次元FEMモデルを用いた静的解析を採用する。

## 2. 解析概要

通常連続体の立坑である“連続立坑”と、リング間あるいはエレメント間をリング継手で連結した不連続な立坑である“輪切立坑、千鳥組立坑、イモ継立坑”を図1に示す。解析に用いた3次元

FEMモデルを図2に示す。3次元FEMモデルについては、円筒リングを平面版要素で、底板部はソリッド要素で分割して近似し、周辺地盤を地盤ばねで評価する。円筒リングを連結するリング継手は軸方向・軸直角方向・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。

## 3. 連続立坑と輪切立坑との比較検討

### 3.1 概要

既に著者らは、輪切立坑は、連続立坑と比較してリング間継手の効果によって立坑の断面力の低減が図れることを発表している<sup>1)</sup>。特に円形リングとリング継手の組み合わせにより曲げモーメントの低減効果が大きく、応答変位法による解析のため水平変位に関しては立坑が地盤とともに変形するためそれほど顕著な効果はないことも検証している。しかし、解析したケースは限定されたものであるため、立坑の外径の違いによる連続立坑と輪切立坑との応答特性を調べる必要がある。

### 3.2 立坑の外径の違いによる影響検討

#### (1) 概要

外径の違いによる輪切立坑の応答特性を比較するために、外径の異なる4種類の立坑について解

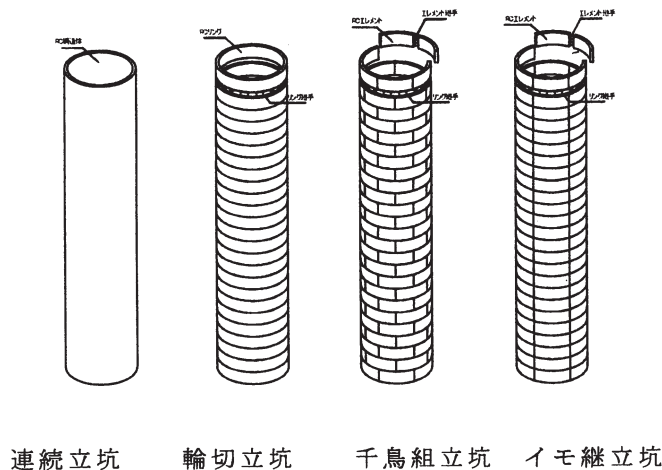


図1 立坑構造物

析を行い、変位および断面力について評価した。

(2) 解析条件

解析に用いた輪切立坑の一覧を表1に示す。分割幅は一定として立坑の外径と厚さを変化させて解析を実施した。解析に用いた立坑の物理定数を表2に示す。立坑を取り巻く周辺地盤は、立坑の側面がN値5、10および20の3種類とし、立坑の底面がN値50の基盤として、地盤をばねで評価する。地震荷重として応答変位法による地盤変位による荷重、周面せん断力および慣性力を考慮し、入力地震波形は「2002年制定コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕<sup>2)</sup>」に示されるレベル1地震動を用いる。レベル1地震動の時刻歴加速度波形を図3に示し、次元重複反射理論により3種類の地盤条件に応じた上記の地震荷重を設定する。また、輪切立坑の柔軟性はリングの軸方向ばね定数を変化させることにより表現させるため、その場合のリング継手のばね定数を表3に示す。通常円形リングにはずれ止め防止のために、せん断キーが用いられることが多いので、立



3次元FEMモデル

図2 解析モデル

坑の円形リング間の軸直角方向(せん断方向)ばね定数は、かなり大きな値を用いることで評価する。

(3) 解析結果

輪切立坑の断面力および水平変位の値を連続立坑の値で割った比率を求めた結果、図4に立坑外径と鉛直方向曲げモーメント比率の関係を、図5に立坑外径とせん断力比率の関係を、図6に立坑外径と水平変位比率の関係を、図7に立坑外径と円周方向曲げモーメント比率の関係を示す。なお、図中において輪切立坑のリング継手のばね定数の

表1 輪切り立坑一覧表

タイプ	直径 (m)	厚み (m)	分割幅 (m)	高さ (m)
Type A	4.45	0.225	2.0	40.0
Type B	6.55	0.275		
Type C	8.65	0.325		
Type D	10.8	0.400		

表2 立坑の物理定数

物理定数の種類	記号	単位	構造物
単位体積重量	$\gamma_c$	KN/m <sup>3</sup>	25
設計基準強度	$\sigma_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	45
ヤング係数	E	KN/m <sup>2</sup>	$3.6 \times 10^7$
せん断弾性係数	G	KN/m <sup>2</sup>	$1.5 \times 10^6$
ポアソン比	$\nu$	-	0.2

表3 輪切り立坑のリング継手のばね定数

ケース	軸方向ばね定数 (kN/m)	軸直角方向ばね定数 (kN/m)	軸回転方向ばね定数 (kNm/rad)
Case 1	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^9$	0.0
Case 2	$1 \times 10^5$		
Case 3	$1 \times 10^6$		
Case 4	$1 \times 10^7$		
Case 5	$1 \times 10^8$		

リング継手数：16個

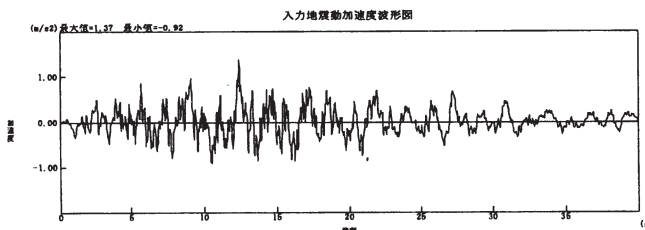


図3 時刻歴加速度波形

Case 1～Case 5 の中でCase 1, Case 3 ならびに Case 5 について表示する。Case 2 は Case 1 と Case 3 の, Case 4 は Case 3 と Case 5 の中間的な結果を示す。

鉛直方向曲げモーメントに関しては、図 4 に示すように、いずれの場合においても立坑周辺の地盤がやわらかい(図中の N 5 の場合)ときは、立坑の外径が大きくなると最大曲げモーメントの比率は漸増する傾向にある。しかし、周辺地盤が硬くなる(図中の N 10 および N 20 の場合)につれて相違が無くなる。また、せん断力については、図 5 に示すように、いずれのケースおよび地盤条件(N 5, N 10, N 20)においても顕著な変化は見られないが、全体的に漸減する傾向にある。また、水平変位については、図 6 によりいずれのケースおよび地盤条件(N 5, N 10, N 20)においても、ほとんど変化がないが、立坑と周辺地盤との剛性比による影響のため変形モードは異なる。一方、図 7 により円周方向曲げモーメントの比率を

見ると立坑周辺地盤が軟らかく、立坑外径が大きくなるほど曲げモーメントの低下は顕著である。

以上のことから、立坑の外径の相違によらずにリング軸方向ばね定数の変化による鉛直方向曲げモーメント、せん断力ならびに水平変位の変化は同様であると判断される。しかし、円周方向曲げモーメントに関しては地盤が柔らかくなるほど外径による顕著な相違が見られる。そのため、立坑の剛性に比較して地盤の剛性が相対的に小さい場合は外径が大きくなるにつれて円周方向曲げモーメントがかなり減少する点に留意する必要がある。よって、リング軸方向ばね定数が小さい場合は、曲げモーメントやせん断力は連続立坑と比較して小さくなる。リング軸方向ばね定数が大きくなるにつれて、曲げモーメント、せん断力および水平変位は連続立坑の結果と同様な結果が得られる。したがって、輪切立坑を採用することによりリング継手の剛性とのバランスを考慮すれば連続立坑よりも地震時に有利な構造とすることができると

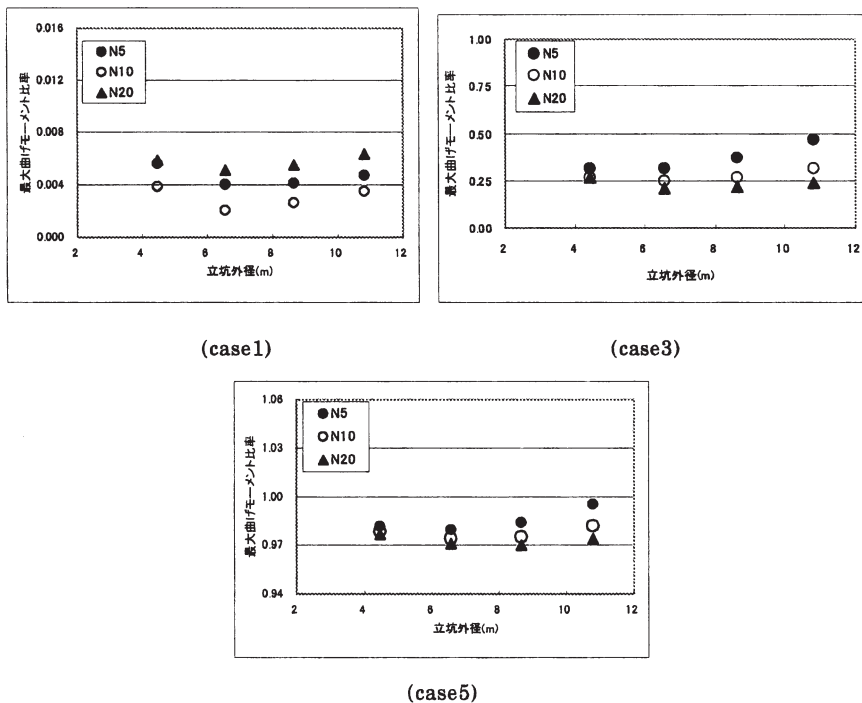


図 4 立坑外径と鉛直方向曲げモーメント比率

図5 立坑外径とせん断力比率

図6 立坑外径と水平変位比率

図7 立坑外径と円周方向曲げモーメント比率

判断される。

#### 4. 輪切立坑、イモ継立坑および千鳥組立坑の比較

##### 4.1 概要

輪切立坑の場合，その外径が大きくなるとリング状としては設置が困難であるため，エレメントに分割してリング状とする。エレメントの組み立て方法は千鳥組およびイモ継ぎがあり，組み立て方法の違いによる立坑の応答を比較する。

##### 4.2 解析条件

構造仕様，地盤条件および荷重条件は，「連続立坑と輪切立坑との比較検討」の章で用いた条件を用いる。エレメント間の継手部の結合度によって立坑の組み立て方法による違いを明確にするためにエレメント間の円周方向のばね定数を変化させる。立坑のリング間接続およびエレメント間接続に用いる継手のばね定数を表4に示す。また，リ

表4 立坑のエレメント継手のばね定数

Case	エレメント間		
	円周方向 ばね定数 (KN/m)	円周直角方 向ばね定数 (KN/m)	円周回転方向 ばね定数 (KNm/rad)
Case1	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^9$	0.0
Case2	$1.0 \times 10^5$		
Case3	$1.0 \times 10^6$		
Case4	$1.0 \times 10^7$		
Case5	$1.0 \times 10^8$		
Case6	$1.0 \times 10^9$		
注：エレメント継手数 2個			

ング間のばね定数は，各ケースにおいて同一とし，鉛直軸方向ばね定数は  $1.0 \times 10^5$  (kN/m)，鉛直軸直角方向ばね定数は  $1.0 \times 10^9$  (kN/m) および鉛直軸回転方向ばね定数は 0.0 (kNm/rad) とする。なお，リング継手数は 32 個である。

##### 4.3 解析結果

N 値 10 の場合でのエレメント間円周方向ばね定数をパラメータとして，水平変位，せん断力，

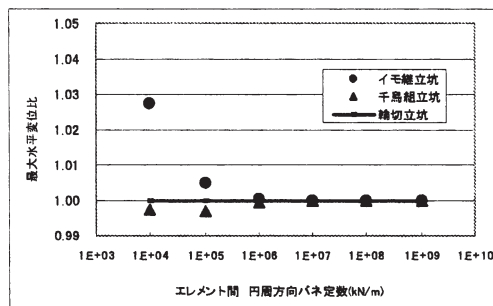


図8 ばね定数と最大水平変位比との関係

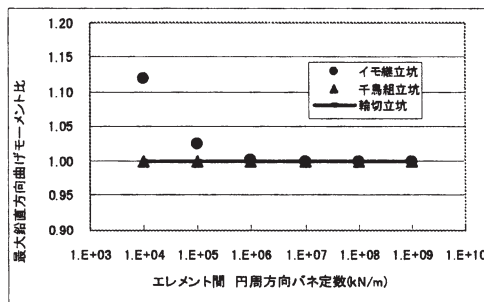


図10 ばね定数と最大鉛直方向曲げモーメント比との関係

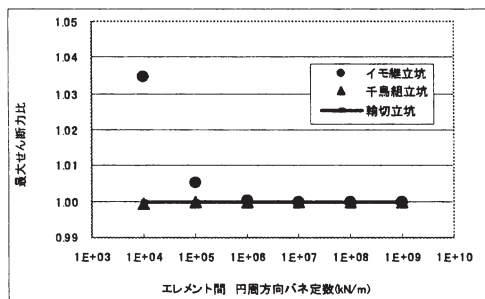


図9 ばね定数と最大せん断力比との関係

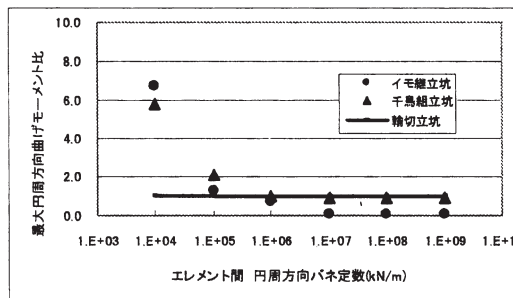


図11 ばね定数と最大円周方向曲げモーメント比との関係

鉛直方向曲げモーメントおよび円周方向曲げモーメントの最大値を輪切立坑における値で除した比率により比較を行った解析結果を図8～図11に示す。この図から判断すると全般的にエレメント間円周方向ばね定数が  $1 \times 10^6$  (kN/m) を超えると、千鳥組立坑およびイモ継立坑の結果と輪切立坑の結果とがほとんど一致する。ただし、最大円周方向曲げモーメントはエレメント間円周方向ばね定数が小さいとイモ継立坑および千鳥組立坑においてばらつきが大きくなる。さらに、円周方向ばね定数が  $1 \times 10^7$  (kN/m) 以上ではイモ継立坑だけが輪切立坑の  $1/10$  程度となる。この要因としては以下のことが考えられる。リング継手は軸回転方向のばね定数をゼロと設定しているため、リング継手部ではヒンジ節点となり曲げモーメントを伝達しない構造となっている。イモ継立坑の場合には立坑の頂部から底部まで同一の配列構造であり、そのヒンジ部が上から下まで同じ位

置にあることから、円周方向の曲げモーメントは輪切立坑や千鳥立坑と比較してかなり小さい値となったと考えられる。千鳥立坑の場合は、ヒンジ継手部の上下はリングに拘束されるため、輪切立坑に近く、円周方向曲げモーメント値もほぼ一致する傾向にある。これらの傾向はN値が5または20においても、ほぼ同様な傾向を示す。また、実構造物では、エレメント継手の円周方向ばね定数は  $k=1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$  (kN/m) が採用される場合が多いため、輪切立坑、千鳥組立坑およびイモ継立坑において解析結果はほぼ一致する。ただし、円周方向に関してはエレメント間継手ばね定数および組み立て方法による違いが顕著に現れる。

#### 4.4 立坑の外径の違いによるセグメント間継手の影響検討

##### (1) 概要

立坑の外径の違いによるエレメント継手の影響を確認するために、外径の異なる4種類の立坑について解析を行い、変形および応力度などの応答の相違を評価した。

### (2) 解析条件

解析に用いた立坑一覧を表5に示す。構造仕様、地盤条件および荷重条件は、「連続立坑と輪切立坑との比較検討」の章で用いた条件を用いる。また、立坑のリング間およびエレメント間に用いるばね定数については、実構造物の現状を考慮し、表6に示すように限定した。また、エレメント間継手による外径への影響をより具体的に評価するために、表5に示す外径の異なる立坑を取り上げ、表7に示すようにエレメント間円周直角方向のばね定数を低減させることにより各立坑の応答が顕著になるようにして解析を実施した。なお、リング間のばね定数は、いずれのケースにおいても同一とし、鉛直軸方向ばね定数は $1.0 \times 10^5$  (kN/m)、鉛直軸直角方向ばね定数は $1.0 \times 10^9$  (kN/m) および鉛直軸回転方向ばね定数は $0.0$  (kNm/rad) とする。また、リング継手数は32個である。

### (3) 解析結果

N値10の周辺地盤における外径の異なる立坑を4種類取り上げ、エレメント間の円周方向ばね定数をパラメータとして水平変位、曲げモーメントの最大値を比較した結果を図12～図14に示す。いずれもイモ継立坑および千鳥組立坑での解析結果を輪切立坑での解析結果で除して縦軸に表示している。

これより、水平変位および鉛直方向曲げモーメントに関しては、エレメント継手のばね定数が小さい場合、イモ継立坑の外径が大きくなるほど比率は小さくなる。しかし、他のケースではほとんど差がない。実際のエレメント継手のばね定数としてはcase2の場合が多いので、水平変位および鉛直方向曲げモーメントに関しては立坑外径の違いによる影響は少ない。一方、円周方向曲げモーメントに関しては、イモ継立坑においてエレメント間継手ばね定数による違いが顕著に表れている。

外径の異なる立坑において組み立て方法の違いによる影響が比較的少ないのは、実際にエレメン

表5 立坑一覧表

Case	直径 (m)	厚み (m)	分割幅 (m)	高さ (m)
Type A	4.45	0.225	2.0	40.0
Type B	6.55	0.275		
Type C	8.65	0.325		
Type D	10.8	0.400		

表6 立坑のエレメント継手の解析条件

Case	エレメント間		
	円周方向 ばね定数 (kN/m)	円周直角方向 ばね定数 (kN/m)	円周回転方向 ばね定数 (kNm/rad)
Case1	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^9$	0.0
Case2	$1.0 \times 10^6$		
Case3	$1.0 \times 10^8$		

注：エレメント継手数：2個

表7 立坑のエレメント継手の解析条件

Case	エレメント間		
	円周方向 ばね定数 (kN/m)	円周直角方向 ばね定数 (kN/m)	円周回転方向 ばね定数 (kNm/rad)
Case1 <sup>*</sup>	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^5$	0.0
Case2 <sup>*</sup>	$1.0 \times 10^6$		
Case3 <sup>*</sup>	$1.0 \times 10^8$		

注：エレメント継手数：2個

トに採用されるズレ止め防止を考慮して円周直角方向のばね定数を大きくしていることが原因と推定される。

そこで、表7に示すようにエレメント間の円周直角方向ばね定数を低減させた場合についても解析を行った。エレメント間の円周方向ばね定数をパラメータとして水平変位および曲げモーメントの最大値の結果を図15～図17に示す。

水平変位に関しては、イモ継立坑が他よりも5%程度大きく、千鳥組立坑は輪切立坑とほぼ同じである。立坑の外径が大きくなると多少増加する傾向にあるが、あまり顕著な相違はみられない。

また、鉛直方向曲げモーメントに関しても立坑の外径による違いはほとんどないが、case1～3と比べてイモ継立坑および千鳥組立坑においてかなりの断面力の低減効果が見られる。これはエレメント間の横ズレによる影響と考えられる。

一方、円周方向曲げモーメントに関してはイモ



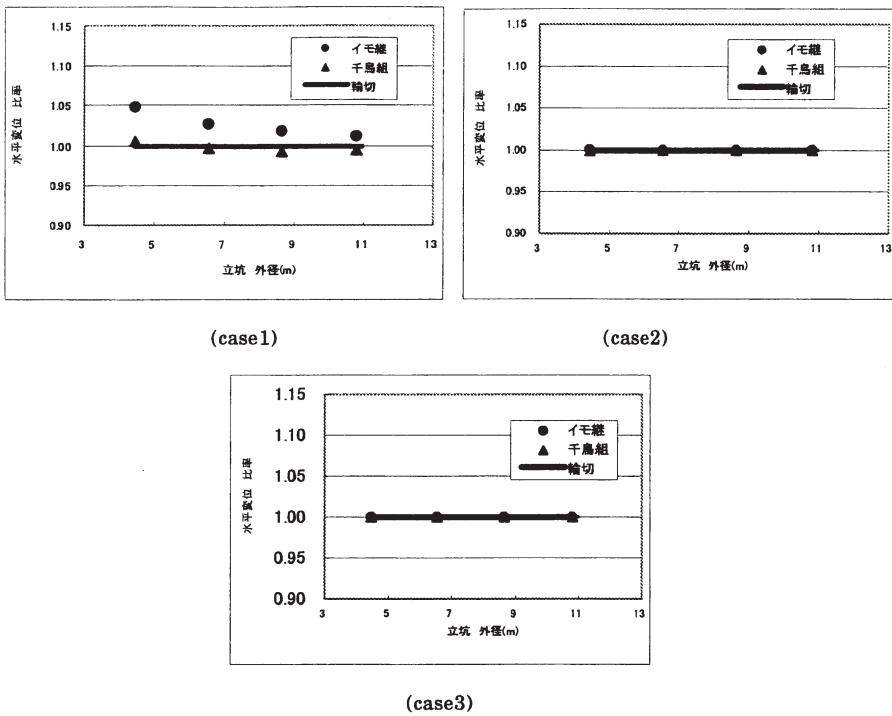


図 12 立坑外径と水平変位比率

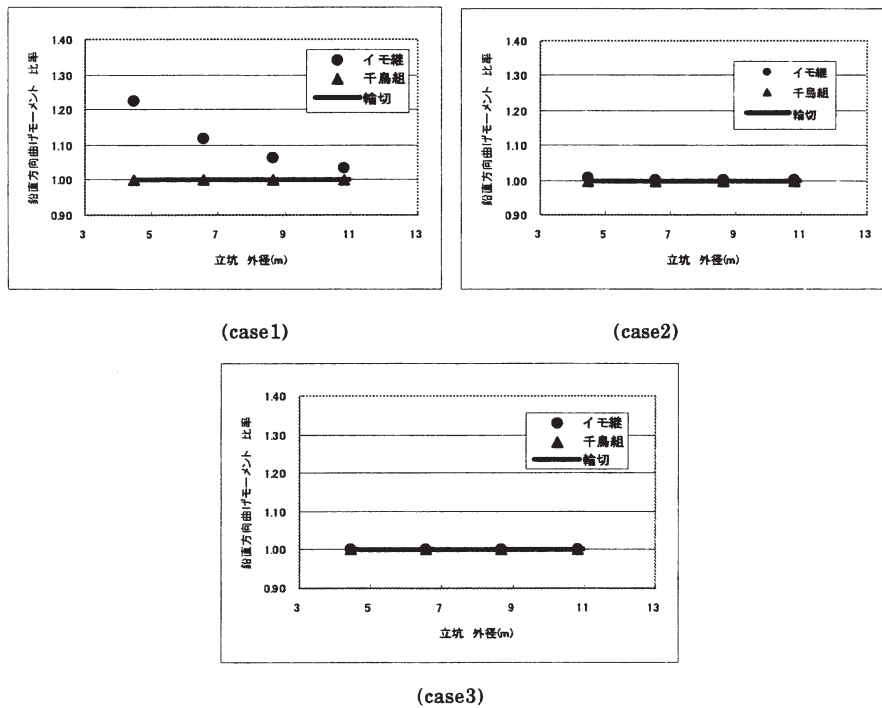


図 13 立坑外径と鉛直方向曲げモーメント比率

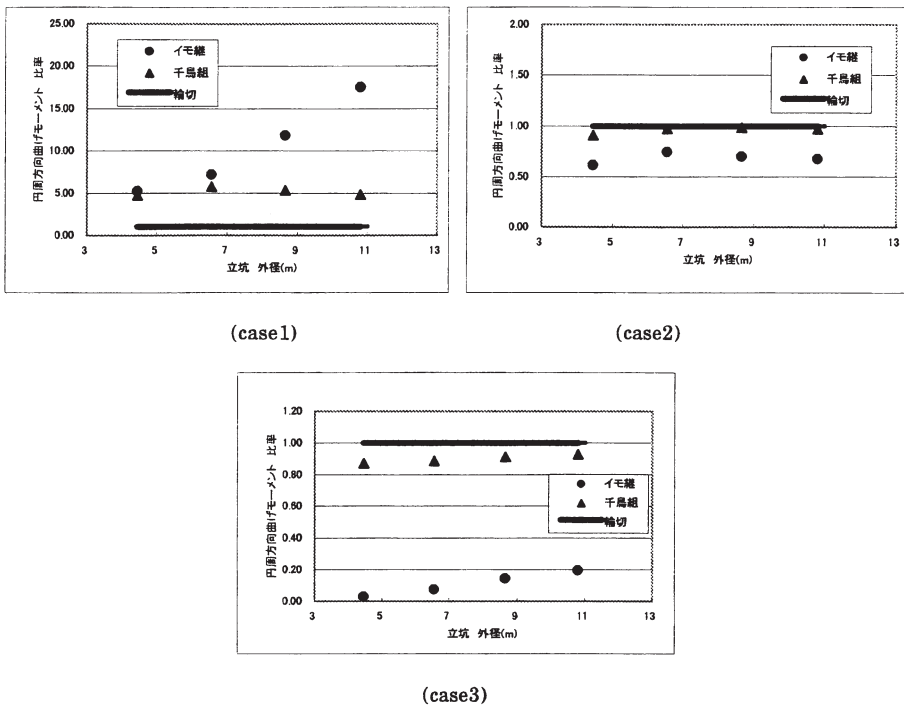


図 14 立坑外径と円周方向曲げモーメント比率

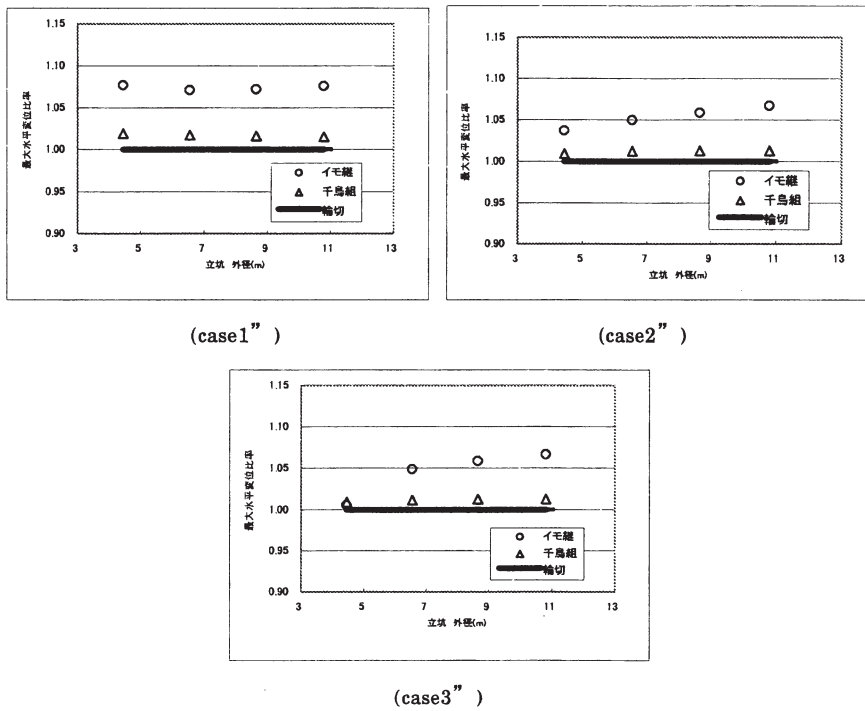


図 15 立坑外径と水平変位比率

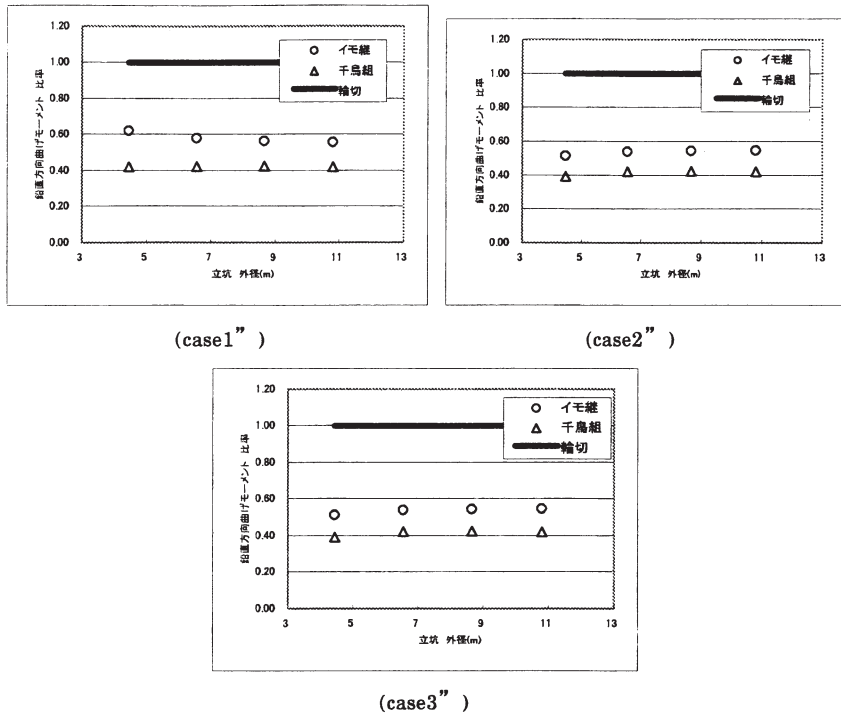


図 16 立坑外径と鉛直方向曲げモーメント比率

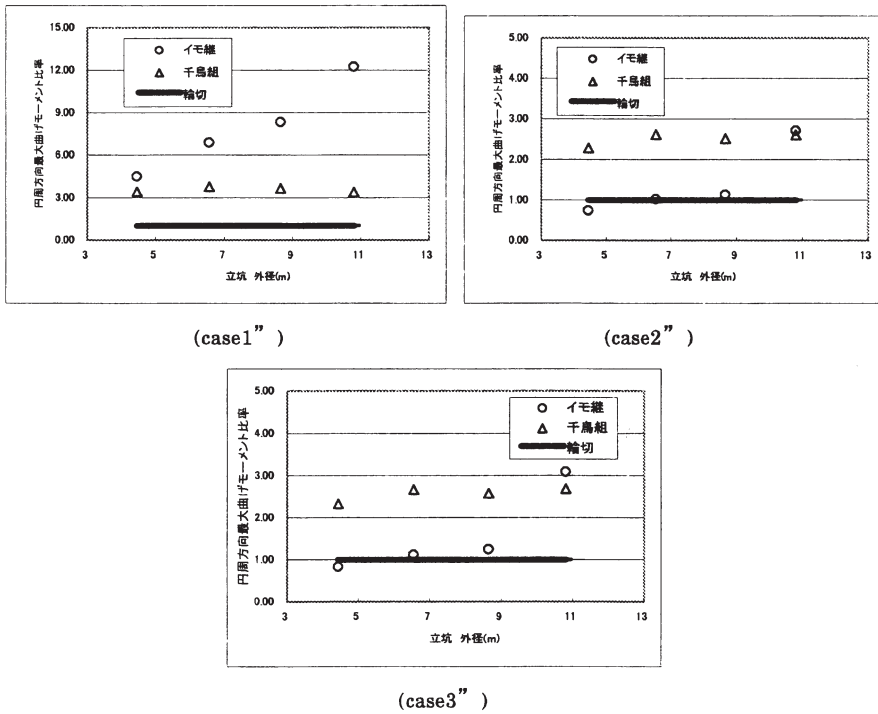


図 17 立坑外径と円周方向曲げモーメント比率

継立坑において立坑の外径による違いはあまり見られないが、エレメント間継手ばね定数による違いが顕著に表れている。

以上より、エレメント間の円周直角方向ばね定数が小さくなると、イモ継立坑および千鳥組立坑は輪切立坑とは異なる挙動を示す。逆に、エレメント間の円周直角方向ばね定数が大きくなると、千鳥組立坑と輪切立坑については、ほとんど同じ挙動を示す。しかしながら、イモ継立坑においては円周方向曲げモーメントに関しては他の立坑と比較して顕著な相違がみられる。実際にはエレメント間にズレ止め防止対策として、せん断キーなどの溝が設けられることが多く、エレメント間の円周直角方向ばね定数を大きく評価できる。

そこで、以上の事柄を総合的に判断すると水平方向荷重に対してはエレメント間の円周方向ばね定数を変化させても千鳥組立坑および輪切立坑の水平変位および曲げモーメントへの影響は少なく、千鳥組立坑を輪切立坑として評価しても実務上の問題は少ないと考えられる。しかしながら、イモ継立坑に関しては円周方向曲げモーメントに違いが見られるため輪切立坑の解析結果をイモ継立坑として評価する場合はその範囲が限定される。なお、これらのことはN値が5または20の地盤においてもほぼ同様な傾向を示す。

したがって、千鳥組立坑による立坑の解析を行う場合、エレメント間継手の影響は小さく、リング間継手の剛性を考慮した検討を行えばよいと判断される。

なお、本検討では、構造物の変形モードが曲げ変形が支配的となるような立坑で解析を行い、水平変位および曲げモーメントを比較検討した。そのため、構造物の変形モードがせん断変形主体となる立坑の形状においては別途検討が必要である。さらに、地盤特性による影響もあるため、あらゆる立坑に適用できるかどうかは、より詳細な検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、立坑の地震時における応答の低減を図るために、立坑を不連続体とした場合につい

て評価した。本研究より得られた知見を以下にまとめる。

a) 立坑の外径の違いによる輪切立坑の応答特性の違いは、あまりないと考えられる。これはリング間継手部にせん断キー等のずれ止め防止対策が前提となり、それ以外のケースでは条件に適合した解析が必要となる。

b) 輪切立坑と千鳥組立坑の応答特性を比較した結果、エレメント間の円周方向ばね定数の値が大きい場合、立坑に発生する部材力および水平変位は同じような結果となった。しかし、エレメント間の円周方向ばね定数を小さくした場合では多少ばらつきが見られた。また、この傾向は立坑外径の大小に、あまり影響されない。また、イモ継立坑においては円周方向の曲げモーメントによる違いがあるため輪切立坑の解析結果をイモ継立坑として評価する場合はその範囲が限定される。

c) 立坑外径の違いによる千鳥組立坑およびイモ継立坑の応答特性では、エレメント間継手による立坑の応答への影響は小さい。なお、この解析では、エレメント間継手部に円周直角方向にずれ止め防止対策が前提となる。

また、今回は曲げ変形が支配的な立坑を想定して解析を行ったため、あらゆる立坑に適用するためには個別に検討する必要がある。

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するだけでなく動的解析による検証や、リング継手の非線形性を考慮した解析により、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) 國近光生・佐藤忠信: 応答変位法を用いた分割立坑の耐震設計法, 自然災害学会, Vol.23, No.3, pp.37-46, 2004.
- 2) 土木学会: 2002年制定 コンクリート標準示方書 [耐震性照査編], pp.7-8, 2002.12.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書IV下部構造編, pp.131, 2002.

- 4) 日本下水道協会: 下水道施設耐震計算例—管路施設編一, pp.12-1~59, 2001.
- 5) 建設省土木研究所: 大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案), pp.53-56, 1992.
- 6) 川島一彦: 地下構造物の耐震設計, 鹿島出版会, pp.141-154, 1994.
- 7) 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, 日本トンネル技術協会, pp.10-11, 2002.
- 8) 日本下水道協会: シールド工事に用標準セグメント, 2001.
- 9) 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.
- 10) 日本溶接協会: 地下・基礎構造物, 日本溶接協会, pp.47-106, 1989.
- 11) 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.
- 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9月.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 建設省土木研究所: 地下構造物の耐震設計技術の開発に関する共同研究報告書, 整理番号第29号, 平成1年8月.
- 17) 建設省土木研究所: 地下構造物の耐震設計技術の開発に関する共同研究報告書, 整理番号第63号, 平成3年3月.
- 18) 建設省土木研究所: 地下構造物の耐震設計技術の開発に関する研究平成元年度報告書, 平成2年3月.

(投稿受理:平成15年10月24日  
訂正稿受理:平成16年5月11日)

