

論文

応答変位法を用いた分割立坑の耐震設計法

國近 光生*・佐藤 忠信**

An earthquake resistant design methodology for divisional shaft based on the response displacement method

Mitsuo KUNICHIKA* and Tadanobu SATO**

Abstract

Shaft is often used as a vertical approach to sewerage mains and ventilation installation of railroad and road tunnels. Because of diverse construction demands its dimension becomes deeper and larger and its thickness and volume of the reinforcement increases. To design a shaft with less cost for construction a new design method should be developed to reduce stresses induced in the structural elements by increasing its flexibility especially for constructing a reinforced concrete shaft. In this paper we analyze deformation characteristics, bending moment and shear stress developed in circular RC shafts for an applied horizontal seismic force. To make clear the effect of shaft flexibility to the shaft response, we evaluate the response of shaft and soil interaction by response displacement method, and analyze segmented shafts, which are composed of circular rings with blotted joints between them. As the results a proper selection of the rigidity of ring joints enables the reduction of induced stresses in the segments caused by earthquake force.

キーワード：立坑，FEM，静的解析，応答変位法

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

* 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。

1. はじめに

下水道施設あるいは鉄道や道路の換気施設などを目的とした、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。大規模で大深度の立坑では、作用する土圧や水圧が非常に大きくなる上、地震の影響が大きく、部材厚や鉄筋量などが非常に大きくなる。このような傾向を軽減する方法として、比較的大きな構造物では、部材の塑性変形を考慮した設計が行なわれている。立坑は、通常、力学的に有利な円形の立坑が採用され、構造部材としては強度や経済性などに優れている RC 構造が用いられるケースが多い。しかし、RC 構造の立坑の変形性能はあまり高くないため、大きな荷重に対しては大きな部材厚が要求され、鉄筋量も多くなる。このため、RC 構造の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」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。また、不連続立坑については、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）のモデルについて解析する。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。立坑のような鉛直地下構造物は、一般にみかけの単位体積重量が周辺地盤に比べて小さく、また、構造物の周面を地盤によって取り巻かれている。このため、質量効果が小さく、また、逸散減衰が大きいため、地上構造物の慣性力の影響は受けにくく、主として周辺地盤の地震時の変位・変形によってその挙動が支配される。このため、耐震計算においては応答変位法が多用されている。一般的な地震時荷重としては、地盤変位による荷重、地震時周面せん断力および慣性力がある。これらの荷重を作用させて立坑に生じる地震時断面力を算出する。本研究

では、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特性を検証し、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。

2. 解析概要

通常の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」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、底版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. 応答変位法による立坑と地盤との挙動解析

3.1 概要

地盤中に地盤とは異なる性質を持つ立坑が埋設されている場合、地震時には地盤と立坑の剛性の差によって周辺地盤から外力またはそれに伴う反力が立坑に作用する。その外力は立坑の剛性、質

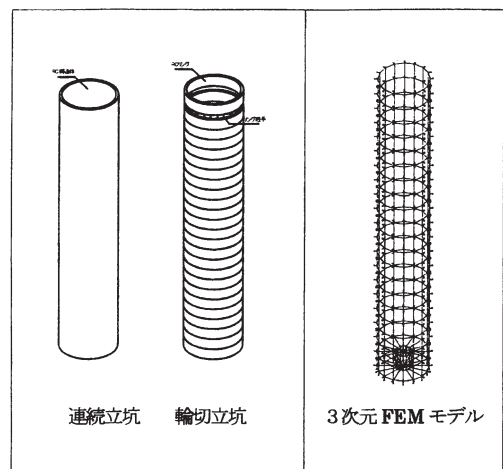


図 1 立坑構造物

図 2 解析モデル

量, 形状等によって異なるが, この中から特に外力に与える影響が大きいと考えられる, 立坑の剛性に着目して解析を行い, 立坑の応答変位および発生断面力等の基本的な応答特性を把握し, 立坑の応答変位法における外力評価について考察する。

3.2 解析条件

立坑の変形性能および質量が地盤と同じであれば, 立坑は地盤と同一に挙動し, 立坑に作用する外力もわずかである。このような観点から「等価剛性立坑」および「等価質量立坑」なるモデルを設定し解析を行った。なお, 解析に用いる立坑は, 底版厚さゼロの円筒立坑を想定する。

(1) 等価剛性立坑の設定

図3に示すように下部が固定された片持ち梁の上端に集中荷重 P が作用する時の頂部の水平変位 δs と, 立坑によって取り除かれた地盤要素に立坑と同様な荷重が作用したときの頂部の δg が等しくなる剛性を有する立坑を「等価剛性立坑」と定義する。以下に等価剛性の算出方法を示す。片持ち梁の頂部の水平変位 δs は立坑の高さを L , 立坑の曲げ剛性を EI とすると,

$$\delta s = \frac{PL^3}{3EI} \quad (1)$$

により与えられる。一方, 地盤についてはせん断剛性を G , せん断応力を τ , せん断ひずみを γ , 立坑によって取り除かれた地盤要素の断面積を A ($= \pi D^2/4$), 上端の水平変位を δg とすると,

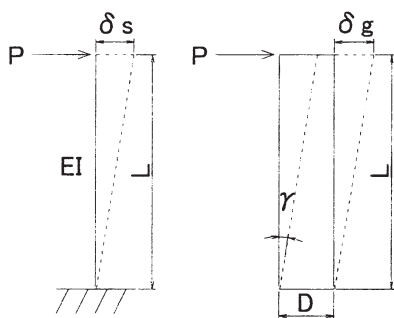


図3 等価剛性・等価質量算出モデル

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P/A}{\delta g/L} \quad (2)$$

となる。これより, 上端の水平変位 δs は,

$$\delta g = \frac{PL}{GA} \quad (3)$$

により与えられる。ここで, $\delta s = \delta g$ とおくことにより立坑の等価剛性 $E_{eq}I$ は次式より求められる。

$$E_{eq}I = \frac{1}{3} \cdot GAL^3 \quad (4)$$

(2) 等価質量立坑の設定

立坑によって除かれた地盤の質量と等しい質量を有する立坑を「等価質量立坑」と定義する。以下に, 等価質量の算出方法を示す。立坑の断面積を A , 立坑の高さを L , 密度を ρs とすると, 立坑の質量 M_s は,

$$M_s = \rho s AL \quad (5)$$

また, 立坑によって取り除かれた地盤の体積を V , 地盤の密度 ρg とすると, 構造物によって取り除かれる地盤の質量 M_g は,

$$M_g = \rho g V \quad (6)$$

である。ここで, $M_s = M_g$ とおくと

$$\rho s = \rho g \cdot \frac{V}{AL} \quad (7)$$

ここで, 得られた ρs を立坑の密度とすることにより, 立坑によって除かれた地盤とみかけ上等しい質量を持つモデルを定めることができる。

このようにして定義した等価剛性, 等価質量をそれぞれ E_{eq} , M と表し, M を固定して E_{eq} を 0.1, 1, 10 倍したモデルを設定した。地盤および立坑の諸元を表1～表2に, 解析ケースを表3に示す。なお, 地盤は剛な基盤を有する単層地盤でモデル

表1 地盤特性

	記号	単位	表層	基盤
地質			砂質土	砂質土
層厚	H	m	40	—
N値			10	50
せん断波速度	Vs	m/sec	172.3	294.7
せん断剛性	G	kN/m ²	515000	150600
ポアソン比	ν		0.45	0.45
単位体積重量	ρ	kN/m ³	17	17
固有周期	Tg	sec	1.16	—

表2 立坑の断面性能

	記号	単位	構造物
外径	Do	m	6.55
内径	Di	m	6.00
厚さ	t	m	0.275
高さ	L	m	40.0
断面積	A	m ²	5.42
断面二次モーメント	L	m ⁴	26.7
単位体積重量	ρ	kN/m ³	25
ポアソン比	ν	—	0.2
等価質量(重量表示)	ρs	kN/m ³	211
等価剛性	E _{eq}	kN/m ²	5573000

表3 解析ケース

	Case1	Case2	Case3
立坑の剛性	0.1E _{eq}	1E _{eq}	10E _{eq}
立坑の質量	M		
立坑の1次固有周期(sec)	8.4	2.7	0.8

化した。

(3) 地震荷重の設定

応答変位法に用いる地震荷重は、自然地盤を対象とした1次元地震応答解析を実施し、地震荷重として①地盤変位による荷重、②地震時周面せん断力、③立坑の慣性力を考慮する。解析に用いた地震波形は「2002年制定コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕¹⁾」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4に示し、基盤および表層での加速度応答スペクトルを図5～図6に示す。

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

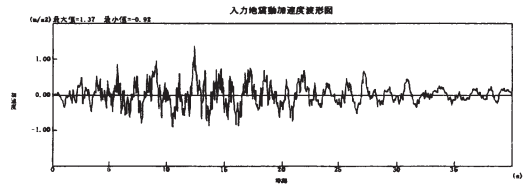


図4 時刻歴加速度波形

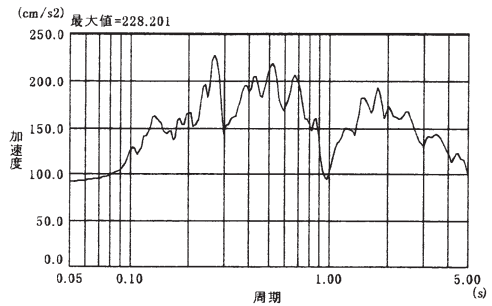


図5 加速度応答スペクトル(基盤部)

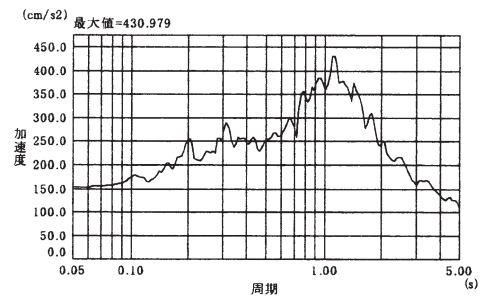


図6 加速度応答スペクトル(地表部)

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。地震時の地盤加速度は、一次元重複反射理論により求めた地盤加速度を用いる。

(4) 地盤ばねの設定

評価した地盤ばねは、地盤のせん断剛性Gとポアソン比 ν より算出した地盤の変形係数Eを用いて、「道路橋示方書 IV下部構造編²⁾」に掲載されている地盤反力係数の算出式より評価した。なお、地盤のせん断剛性は、等価線形化手法を用いた一次元重複反射理論により地盤の剛性低下を考慮し

た。そのときの地盤のせん断剛性 (G) および減衰定数 (h) のひずみ (γ) との関係を図 7 および図 8 に示す。40 m の表層地盤を 4 分割し、地盤が浅いほど、剛性低下の度合は緩やかで、地盤が深くなるほど、あるひずみを境に急激に低下するように地盤の剛性低下曲線を設定した。

3.3 解析結果

立坑の全体の変形を図 9 ~ 図 11 に示す。これより、立坑は周辺地盤とほぼ同様な動きをするが、みかけのせん断剛性によって少しずつ違った動きをする。すなわち、立坑のみかけのせん断剛性が地盤のせん断剛性と等しい場合 ($1 E_{eq}$) の場合には、自然地盤と同じようにせん断変形する。この場合の立坑は実質的に地盤と同一とみなせるため地盤と同じ挙動を示す。また、立坑のみかけのせん断剛性が地盤のせん断剛性よりも大きい場合 ($10 E_{eq}$) は、せん断変形よりも変形が小さくなる。立坑の剛性が地盤よりも大きいため、その剛性の違いにより地盤と比較して変形しにくく、立坑が並進ならびに回転の挙動を示すため、全体的な変

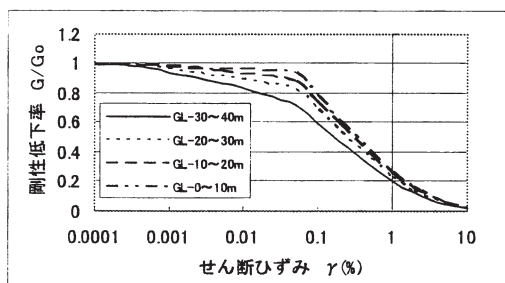


図 7 $G-\gamma$ 曲線

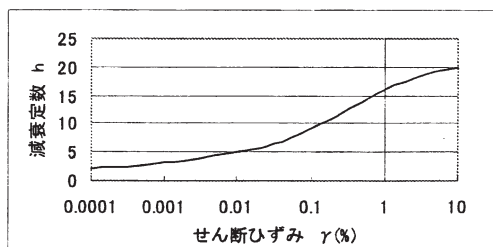


図 8 $h-\gamma$ 曲線

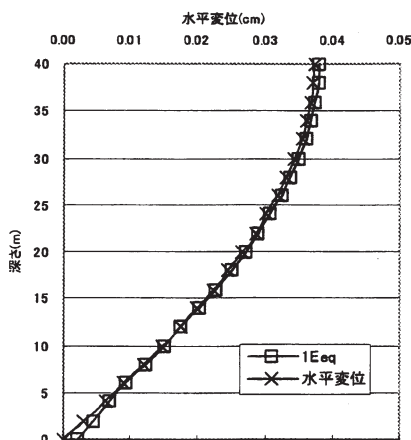


図 9 立坑および地盤の水平変位 ($1 E_{eq}$ の場合)

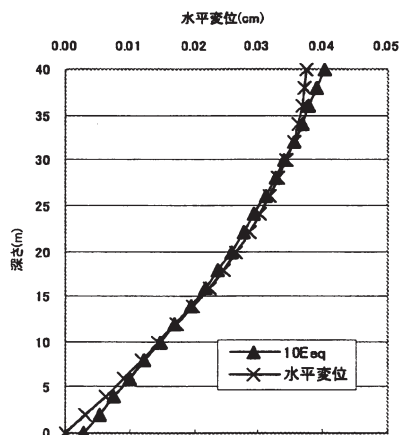


図 10 立坑および地盤の水平変位 ($10 E_{eq}$ の場合)

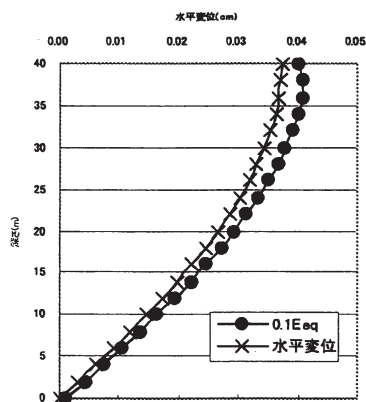


図 11 立坑および地盤の水平変位 ($0.1 E_{eq}$ の場合)

形モードが地盤よりも異なる結果となっている。さらに、地盤のせん断剛性よりも小さい場合 ($0.1 E_{eq}$) には、自然地盤のせん断変形よりも大きくなっている。これは立坑の剛性が地盤と比較してかなり小さく、立坑が非常に変形しやすくなっているためと考えられる。

図 12 および図 13 に曲げモーメントおよびせん断力の結果を示す。立坑と地盤のせん断剛性が同じ ($1 E_{eq}$) の場合では発生する曲げモーメントが小さい。立坑のせん断剛性が地盤よりも小さい ($0.1 E_{eq}$) の場合には若干曲げモーメントが発生

し、地盤よりもせん断剛性が大きい ($10 E_{eq}$) 場合ではかなりの曲げモーメントが立坑全体に発生している。立坑と地盤との剛性比および両者の変形モードの違いが小さいと発生する曲げモーメントも小さくなるので、立坑と地盤との剛性比が同じ場合が最も発生する曲げモーメントが小さくなる。また、地盤の剛性が立坑よりも大きい場合でも曲げモーメントが発生し、立坑の剛性が地盤より大きくなるほど曲げモーメントは大きくなる。いずれの場合も底部において曲げモーメントが発生しているのは、立坑底部の地盤は立坑側面の地盤よりもかなり堅いため立坑が固定された状態となっているからである。一方、せん断力においては、立坑のせん断剛性が地盤よりも小さい ($0.1 E_{eq}$) 場合、同じ ($1 E_{eq}$) 場合、大きい ($10 E_{eq}$) 場合の順にせん断力が大きい。せん断力の大きさは、曲げモーメントの分布勾配に比例するため $0.1 E_{eq}$ の場合が他と比べて最も曲げモーメントの分布の傾きが小さいのでせん断力も小さくなっており、曲げモーメントの分布の変化の度合いが大きい $10 E_{eq}$ の場合が最もせん断力が大きい値を示している。

応答変位法で採用された 3 つの荷重 (地盤変位による荷重、周面せん断力、立坑の慣性力) がどの程度の割合で発生する曲げモーメントおよびせん断力に影響を与えるか検証した結果を図 14 および図 15 に示す。曲げモーメントに関しては地盤変位による荷重による影響が 80 % 以上を占め、周面せん断力による影響が 10~20 % であり、慣性力による影響は小さい。立坑の場合は曲げ変形が支配的であるため曲げモーメントは地盤変位による荷重の影響を強く受け、周面せん断力による変形の影響は小さい。ただし、立坑と地盤との剛性比が同じ ($1 E_{eq}$) 場合では変形モードの違いによる差がほとんどないため相対的に地盤変位による影響よりも周面せん断力による影響が強く出た結果となった。一方、せん断力に関しては、立坑のせん断剛性が地盤と同じ ($1 E_{eq}$) 場合は、地盤変位による荷重およびせん断力による影響がそれぞれ 50 % 程度であり、慣性力による影響は小さい。また、立坑のせん断剛性が地盤よりも小さい

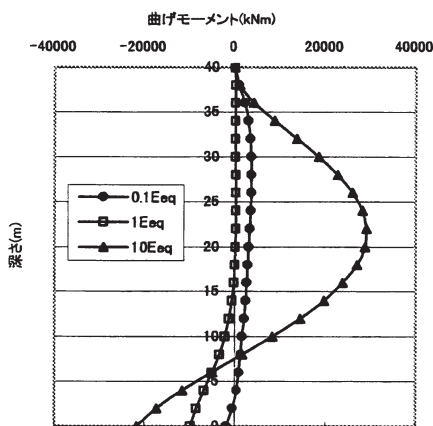


図 12 曲げモーメント比較

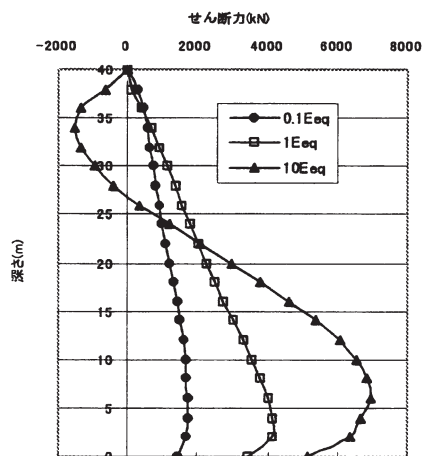


図 13 せん断力比較

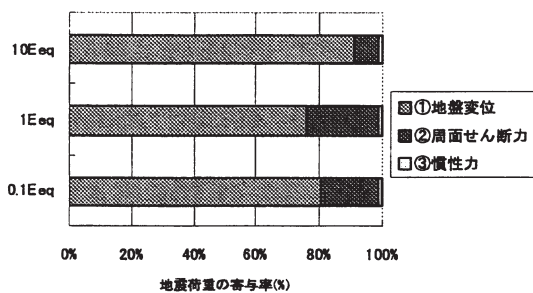


図 14 曲げモーメントに寄与する地震荷重の寄与率

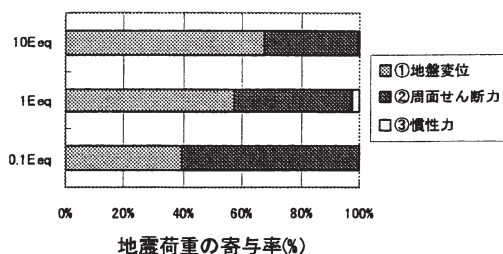


図 15 せん断力に寄与する地震荷重の寄与率

(0.1 E_{eq}) 場合は、周面せん断力が 60% で地盤変位による荷重が 40% で、慣性力による影響は無視できる。立坑のせん断剛性が地盤よりも大きい (10 E_{eq}) 場合は、地盤変位による荷重と周面せん断力の影響が逆転する結果となった。この要因としては、地盤に対する立坑の剛性比が大きくなるほど地盤変位による荷重および周面せん断力により発生するせん断力も大きくなる。しかし、曲げ変形の卓越する立坑においては地盤に対する立坑の剛性比が大きくなるにつれて地盤変位による影響が周面せん断による影響よりも相対的に優位に表れてくるため、図中の逆転現象が生じたと考えられる。なお、応答変位法における外力評価のうち立坑の慣性力は発生断面力に与える影響は小さい。実際の立坑においてはみかけのせん断剛性は地盤のせん断剛性の 1~10 倍程度の範囲内にあるため、その範囲にある 3 種類の N 値 (5, 10, 20) の地盤を用いて以降の検討を行う。

4. 連続立坑と輪切立坑との比較検討

4.1 概要

図 1 に示す連続立坑と輪切立坑との応答特性を調べる。輪切立坑はリング継手の物性により挙動が変化するため、リング間を接続するリング継手の剛性、すなわち、リング間の軸方向ばね定数を変化させた場合の断面力および変位を求め、連続立坑の結果と比較する。

4.2 解析条件

検討する対象構造物の連続立坑及び輪切立坑の形状寸法を表 4 に示す。構造物は地下に構築されるものとし、「道路橋示方書 IV 下部構造編²⁾」の記述に従い、計算を簡略化するために鋼材を無視し、コンクリートの全断面を有効として解析を実施した。解析に用いた構造物の物理定数を表 5 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。その算出方法は前節と同様である。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、対象とする地震波形は前節と同様で、一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って表現させるため、その場合の輪切立坑におけるリング継手のばね定数を表 6 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。さらに、連続立坑と各種の輪切立坑の曲げ剛性および 1 次固有周期を表 7 に示す。なお、連続立坑を 100 とした時の輪切立坑の曲げ剛性の低減度合を表すために曲げ剛性の有効率³⁾で表示する。さらに、地盤の固有周期を表 8 に示す。この地盤の固有周期 (T) は、 $T=4H/V_s$ (H : 表層厚, V_s : 初期のせん断波速度で N 値から算定) から求めた。

表4 立坑の形状寸法

ケース	外径 D (m)	側厚 t (m)	底版厚 H (m)	高さ L (m)	分割高 B (m)
連続立坑	6.55	0.275	2.0	40.0	—
輪切立坑	6.55	0.275	2.0	40.0	2.0

表5 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	γc	kN/m ³	25
設計基準強度	σck	N/mm ²	45
ヤング係数	E	kN/m ²	3.6×10^7
せん断弾性係数	G	kN/m ²	1.5×10^6
ポアソン比	ν	—	0.2

表6 輪切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)
Case1	1×10^4	1.0 × 10 ⁹	0.0
Case2	1×10^5		
Case3	1×10^6		
Case4	1×10^7		
Case5	1×10^8		
Case6	1×10^9		

リング継手数：16個

表7 連続立坑および輪切立坑の固有周期と曲げ剛性

	軸方向 ばね定数 (kN/m)	曲げ剛性 (kNm ²)	曲げ剛性の 有効率 (%)	1次固有 周期 (sec)
輪切立坑	1×10^4	1.57×10^7	0.2	8.094
	1×10^5	1.55×10^8	1.6	2.580
	1×10^6	1.35×10^8	14.1	0.876
	1×10^7	5.97×10^8	62.1	0.423
	1×10^8	9.07×10^8	94.2	0.347
	1×10^9	9.57×10^8	99.4	0.338
連続立坑	9.62×10^8		100.0	0.338

表8 地盤の固有周期

N値	—	5	10	20
固有周期	sec	1.462	1.160	0.921

4.3 解析結果

上記条件の下で解析した結果、ケース毎にリング継手の軸方向ばね定数を横軸にとり、輪切立坑の最大曲げモーメント、最大せん断力および最大水平変位の値を連続立坑の値で除した比率を図

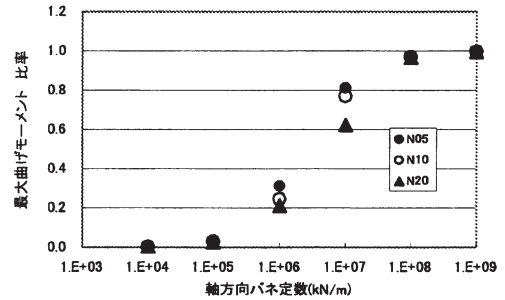


図16 軸方向ばね定数と鉛直方向最大曲げモーメント比率

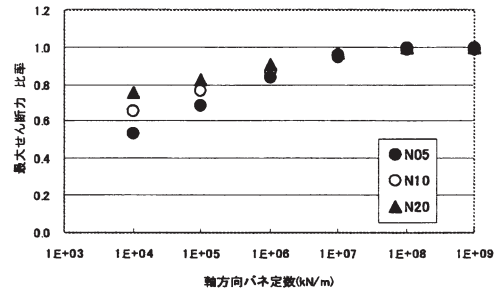


図17 軸方向ばね定数と最大せん断力の比率

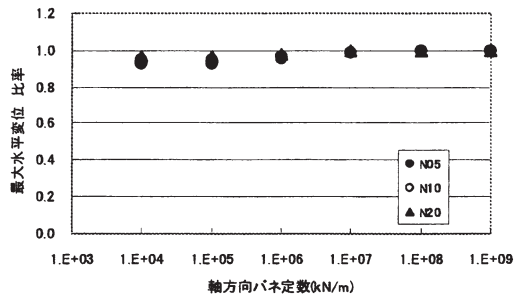


図18 軸方向ばね定数と最大水平変位の比率

16～図18に示す。この結果から、リング継手の軸方向ばね定数が小さいときは発生する曲げモーメントも小さくなり、リング継手の軸方向ばね定数が大きくなるにつれて曲げモーメントも増大する傾向にある。連結されたリング継手のばね定数がかなり大きくなると連続立坑と同様な発生断面力が得られる。これより、リング継手を有効に活用することによってリング継手の負担は増大するが、

曲げモーメントはかなり減少することができる。また、せん断力比に関しては、曲げモーメントの場合ほど顕著ではないが、同様な傾向を示す。一方、最大水平変位に関しては、応答変位法により地盤変位を、地盤ばねを介して荷重として与えていたため、軸方向ばねが小さいと若干低くなるが、あまり相違はみられない。また、この傾向は周辺地盤の硬軟の影響によらず同様な結果が得られる。以上より、連続立坑の場合よりも輪切立坑のほうが断面力の低減が図れると考えられる。

5. まとめ

本研究では、立坑と地盤との剛性比が立坑の応答に及ぼす影響を評価し、地震時に立坑に発生する部材力の低減を図るために、立坑を不連続体とした場合に詳細な検討を加えた。本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- a) 立坑と地盤の剛性の違いが立坑の地震応答特性の及ぼす影響を解析的に評価した。その結果、立坑の剛性が地盤と等しい場合には、立坑と地盤の変形はほぼ同じである。立坑の剛性が地盤のそれよりも大きい場合には、立坑の変形は地盤の変形より小さくなる。立坑が地盤に比べて変形しにくくなり、立坑の並進ならびに回転変形モードが卓越するようになる。立坑の剛性が地盤のそれよりも小さい場合には、立坑の変形は地盤の変形より大きくなる。
- b) 立坑に発生する地震荷重による断面力を応答変位法により評価した。曲げモーメントに関しては、地盤変位による荷重の影響が80%以上を占め、周面せん断力による影響が10~20%であり、慣性力による影響は非常に小さいことが判明した。立坑の応答では曲げ変形が支配的であるため、曲げモーメントは地盤変位による荷重の影響を強く受け、周面せん断による変形の影響は小さいためである。しかし、立坑と地盤との剛性がほぼ同じ場合には、地盤と立坑の変形モードの差がほとんどないため相対的に地盤変位による荷重よりも周面せん断力による影響が強い結果と

なった。

次に、せん断力に関しては、立坑のせん断剛性が地盤と同じ場合は、地盤変位による荷重および周面せん断力による影響が同程度で、慣性力による影響は小さいことが判明した。立坑のせん断剛性が地盤よりも小さい場合には、周面せん断力による影響が60%で、地盤変位による荷重効果に基づくに影響が40%で、慣性力による影響は無視できる。立坑のせん断剛性が地盤よりも大きい場合には、地盤変位による荷重と周面せん断力の影響が逆転する結果となった。この要因としては、地盤に対する立坑の剛性比が大きくなるほど地盤変位および周面せん断力による荷重により発生するせん断力も大きくなるが、曲げ変形の卓越する立坑においては、地盤に対する立坑の剛性比が大きくなるにつれて地盤変位による影響が周面せん断による影響よりも相対的に優位に表れてきたためと考えられる。

- c) 不連続体である輪切立坑は、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。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い。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。

今後、考慮すべき事項は、連続立坑と輪切立坑の外径の違いによる両者の応答特性の違いについて検討する必要がある。また、輪切立坑の場合、その外径が大きくなるとリング形状のセグメントの設置が困難となるので、エレメントに分割してリング状に組み立てる必要が生じる。エレメントの組み立て方法には千鳥組み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検討する必要がある。

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) 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.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書IV下部構造編, pp.131, 2002.
 - 3) 國近光生・佐藤忠信・伊東悟: 不連続円筒立坑における一次元モデルへの適用, 構造工学論文集 Vol.50A, 2004.
 - 4) 日本下水道協会: 下水道施設耐震計算例-管路施設編, 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)