

# 材料非線形解析を用いた開口を有する円形立坑のせん断耐力の評価方法に関する一考察

久末 賢一<sup>1</sup>・西澤一志<sup>2</sup>・佐藤 清<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社大林組 生産技術本部 設計第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

E-mail:hisasue.kenichi@obayashi.co.jp

<sup>2</sup>非会員 株式会社大林組 生産技術本部 設計第二部 (同上)

E-mail:nishizawa.kazushi.au@obayashi.co.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社大林組 生産技術本部 設計第二部 (同上)

E-mail:sato.kiyo @obayashi.co.jp

トンネルと接続する場合など開口を有する立坑では、開口により断面が欠損するため開口部以外の残存断面によりせん断耐力を確保する必要がある。現状における開口部周辺の構造設計においては、3次元的な挙動を適切に考慮したものではなく、必ずしも合理的な構造となっていない可能性がある。そのため、本研究ではコンクリートおよび鉄筋をモデル化した3次元解析モデルにより、開口を有する立坑のせん断耐力の評価を行っている。また、立坑のせん断耐力に特に大きな影響を及ぼすと考えられる、部材厚、配力筋の鉄筋比、コンクリート強度および開口の配置などの条件を変更しそれぞれの影響を確認している。その結果、開口を有する立坑におけるせん断耐力を簡易的な式で評価できる可能性があることを確認した。

**Key Words:** *shear strength, shaft having opening, three-dimensional FEM analysis, material non-linearity*

## 1. はじめに

近年、耐震基準の強化に伴い、鉄筋コンクリート構造物では耐震性能を確保するために部材厚や必要鉄筋量が増大している。立坑における耐震設計は応答変位法や2次元 FEM 解析等で実施するが、立坑は1本の梁要素でモデル化するのが一般的であり、解析で求めた梁要素に発生する深さごとの断面力に対して、各深さの梁要素を構成する断面により耐震性能の確認を行っている。開口を有する立坑では、開口により断面が欠損することで地震時のせん断力に抵抗する部材が減少するため、開口部以外の残存断面により必要なせん断耐力を確保する必要がある。特に、地震時のせん断力の作用する方向に対して直交する壁が両側とも開口により欠損した場合には、せん断力に対して抵抗する部材がなくなり、従来の設計法では構造的に成立しなくなる。

立坑における開口部周辺の構造については、開口位置の主鉄筋および配力鉄筋に相当する補強筋を配置したり<sup>1)</sup>、欠損断面に作用する荷重に抵抗するために補強梁や補強柱を配置しているのが現状である<sup>3)</sup>。これらの方法

は、開口部周辺の3次元的な挙動を適切に考慮したものではなく、必ずしも合理的な構造になっていない可能性がある。

一方、建築構造物における耐震壁では、壁板に開口がある場合の許容水平せん断力を算出する方法が確立されており、開口の幅や高さにより無開口壁板における許容水平せん断力を低減する方法が示されている<sup>4)</sup>。

本研究では、開口を有する立坑のせん断耐力の評価を目的として、立坑を構成するコンクリートと主鉄筋および配力鉄筋をそれぞれ3次元でモデル化し解析を実施した。立坑断面および開口の形状は円形とし、開口がない立坑に対する開口を有する立坑の耐力の比を求めた。外径が異なる立坑でも適用可能なように、開口径を立坑外径で除して無次元化した値(開口率)を用いて、任意の開口率における耐力比を求めた。また、開口を有する立坑の耐力に及ぼす影響が大きいと考えられる、部材厚、配力筋の鉄筋比、コンクリート強度、開口の配置などの影響についても確認した。

それぞれの条件の任意の開口率における耐力比を算出した結果、部材厚、配力筋の鉄筋比、コンクリート強度、

開口の配置により同一開口率における耐力比は異なるが、耐力比と開口率の関係は概ね線形関係になることが確認できた。以上より、任意の外径や開口径の立坑の耐力を簡易に評価できる可能性を見出した。また、地震時のせん断力の作用する方向に対して直交する壁が両側とも開口により欠損した立坑は、従来の設計法では構造的に成立しなかったが、本研究で提案する方法によりせん断耐力の評価が可能になると考える。

## 2. 解析条件

### (1) 解析モデルの概要

本研究ではコンクリートをソリッド要素、鉛直鉄筋および水平鉄筋を分散鉄筋要素でモデル化し、材料非線形有限要素解析 (FINAL-GEO<sup>®</sup>) によりせん断破壊までの挙動を把握した。解析モデルの概要を図-1に示す。解析モデルの頂部および底部については、境界部における応力集中による過度な損傷を避けるために弾性要素を用いた。コンクリートの非線形要素の圧縮モデルには、修正 Ahmad モデル<sup>6)</sup>を適用し、引張モデルの軟化勾配は、鉄筋との付着が影響する領域と影響しない領域とに分割して設定した<sup>7)</sup>。前者の鉄筋との付着が影響する領域には、出雲モデル<sup>8)</sup>を適用し  $C=0.4$  とした。後者の鉄筋との付着が影響しない領域については、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に準じて破壊エネルギーに基づく引張軟化曲線を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性については、Al-Mahaidi モデル<sup>10)</sup>を適用した。

### (2) 境界条件および荷重条件

本研究では立坑のせん断耐力 (以下、耐力) の評価を目的としているため、曲げ破壊先行とならないように曲げ変形を拘束した。すなわち、解析モデルの頂部の鉛直方向の変位を拘束した。さらに解析モデル底面を固定した。

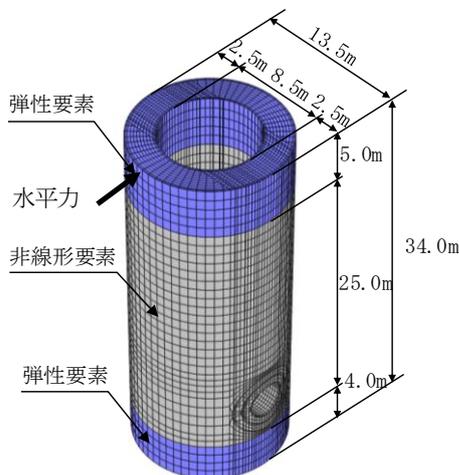


図-1 解析モデルの概要

図-1に示すように、モデル頂部の節点にせん断ひび割れが生じ剛性が変化する範囲まで集中荷重を作用させた後、破壊まで強制変位を与えた。

### (3) 検討ケース

本研究における検討ケースを表-1に示す。ここで、鉛直鉄筋比は1.35%、せん断スパン比は2.0、立坑外径は13.5mとし、全ケースで同様とした。また、開口を有

表-1 検討ケース

ケース	$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断 補強筋比 $P_w$ (%)	部材厚 $t$ (m)	開口の 配置
1	40	0.46	2.5	両側
2-1	40	0.46	1.75	両側
2-2	40	0.46	1.0	両側
3-1	40	0.15	2.5	両側
3-2	40	1.2	2.5	両側
4-1	18	0.46	2.5	両側
4-2	60	0.46	2.5	両側
5	40	0.46	2.5	片側

※ 表-1の全ケースについて、開口がない場合および開口がある場合の解析を実施。開口がある場合については、開口径 1.35m, 3.4m, 5.0m, 6.6m の4ケース (図-2) を実施した。

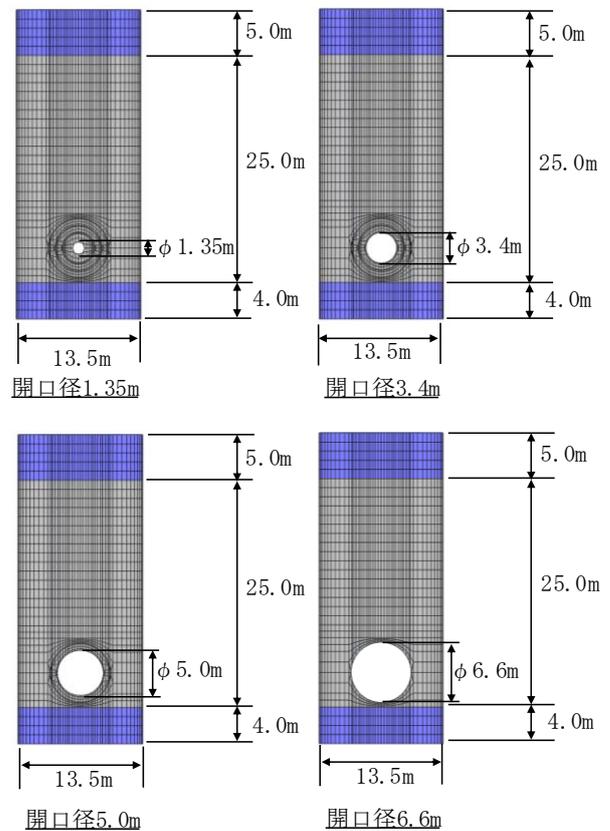


図-2 開口がある場合の解析モデル

する立坑の耐力に及ぼす影響が大きいと考えられる部材厚、水平鉄筋の鉄筋比、コンクリート強度をパラメータとして検討を実施し、各パラメータにおける耐力への影響を確認した。水平鉄筋については、水平断面内に発生する曲げモーメントに対して主筋として抵抗するだけでなく、鉛直断面でのせん断力に対してせん断補強鋼材として抵抗する役割があり、水平鉄筋の鉄筋比は鉛直断面の耐力に大きな影響を及ぼす。

ケース 1 は基準ケースであり、ケース 2 で部材厚の影響、ケース 3 で水平鉄筋の鉄筋比の影響、ケース 4 でコンクリート強度の影響について確認を行った。部材厚、水平鉄筋の鉄筋比、コンクリート強度は、実際の立坑構造物を想定し標準的と考えられる値を設定した。

部材厚については、既往の大深度立坑の実績では 1.0m~2.5m の立坑が多くなっている<sup>11)</sup>。そのため、部材厚を 1.0m, 1.75m, 2.5m と変えて検討を実施した。

水平鉄筋の鉄筋比については、コンクリート標準示方書で定められている最小鉄筋量<sup>12)</sup>と最大鉄筋量、その中間のケースについて検討を実施した。最大鉄筋量については、せん断補強鋼材が十分に降伏する前に圧縮側コンクリートのせん断圧縮破壊を生じないようにせん断補強鋼材の上限値が定められており、せん断補強鋼材比とせん断補強鋼材の降伏強度の積とコンクリートの設計圧縮強度の比が 0.1 程度を上回らないようにするのがよい、とされている<sup>13)</sup>。実際の構造物においては、最小鉄筋量と最大鉄筋量の間になるように設計されると考えられる。

コンクリートについては現場打ちコンクリートを想定しているが、最近では耐震に対する要求性能が高まっていたり、高流動コンクリートの使用などコンクリートの技術が向上していることより、高強度コンクリートの現場での適用も多くなっている。そのため、コンクリートの設計基準強度については、18N/mm<sup>2</sup>、40N/mm<sup>2</sup> および 60N/mm<sup>2</sup> として検討を実施した。

#### (4) 開口径について

本研究は開口を有する立坑の耐力の評価が目的であるため、すべてのケースで開口がない場合および開口がある場合の解析を実施した。開口がある場合については、開口径 1.35m, 3.4m, 5.0m, 6.6m の 4 ケースを実施した。せん断力に抵抗する残存断面がない場合の耐力の評価を目的としているため、ケース 1~4 については、立坑の対面する壁の両側に開口を設置した。ケース 5 については、片側のみに開口がある場合の影響を確認するために、開口の配置以外の条件はケース 1 と同様にし、片側のみに開口を配置している。立坑の深さはトンネルの位置により決定される。トンネルとの接続部となる開口は立坑下部に設置されることが多いため、本研究ではすべてのケースにおいて立坑下部に開口をモデル化した。

開口を有する構造物の耐力の評価については、耐震壁における許容水平せん断力があり、下記に示す式で求められる<sup>4)</sup>。

$$Q = r t l f_s \quad (1a)$$

$$r_1 = 1 - \frac{l_0}{l} \quad (1b)$$

$$r_2 = 1 - \sqrt{\frac{h_0 l_0}{h l}} \quad (1c)$$

ここで、 $Q$  : 耐震壁の許容水平せん断力  
 $r$  : 開口に対する低減率で  $r_1$  と  $r_2$  のうち、いずれか小さい方  
 $t$  : 壁板の厚さ  
 $l$  : 壁板周辺の柱中心間距離  
 $h$  : 壁板周辺の梁中心間距離  
 $l_0$  : 開口部の幅  
 $h_0$  : 開口部の高さ  
 $f_s$  : コンクリートの短期許容せん断応力度

上記に示す通り、開口を有する耐震壁の許容水平せん断力は、開口の幅と面積のうち影響の大きい方により低減率が設定される。本研究における検討対象の立坑は、一般に縦長の構造物となっており、開口の面積よりも開口の幅の影響の方が大きいと考えられる。開口の周辺に曲げモーメントの極値が発生するような場合には、せん断スパンが短くなり開口の面積の影響が大きくなる可能性があるが、本研究では標準的な条件における立坑の耐力の評価を目的としているため、今回の研究の対象からは除くものとする。本研究では開口の幅が立坑の投影幅に対する割合を算出するために、開口径を立坑外径で除した値を開口率と定義した。開口のない立坑における開口率を 0.0 とし、開口を有する立坑については開口径 1.35m (開口率 0.10)、3.4m (開口率 0.25)、5.0m (開口率 0.37)、6.6m (開口率 0.49) の 4 ケースで実施した。また、表-1 に示したケースの末尾に開口率を付したものをそれぞれの開口径におけるケース名とした。

### 3. 開口率による耐力への影響

#### (1) 荷重変位関係

最初に基本ケースであるケース 1 の結果より、開口率による耐力への影響を確認した。解析より求めた荷重変位関係における最大荷重を各ケースにおける耐力とした。最大荷重を作用させた後の顕著な荷重の低下はないもの

の、その後の変位の増加に伴う荷重の回復もないことから、最大荷重を耐力としてよいものと判断した。荷重変位関係における荷重は、底版コンクリートに発生するせん断応力に各コンクリート要素の断面積を乗じたものを合計して求めた。図-3にケース1における荷重変位関係を示す。図より、ケース1-0.1ではケース1-0.0と同等の耐力になるが、その他のケースについては開口率の増加とともに耐力が低下している。

## (2) 最大荷重時の損傷状況

図-4、図-5にケース1-0.0および1-0.49における、最大荷重時のコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況を示す。図では立坑の変形量を50倍、ひび割れ幅を200倍にして示している。図-4に示す通り、コンクリートの損傷状況については、ケース1-0.0と1-0.49とで開口部周辺のコンクリートの圧縮軟化や変形の状況が異なっている。ケース1-0.0では立坑全体でせん断変形しており、立坑下部における局所的な変形は確認できない。それに対してケース1-0.49では、開口部付近に変形が集中し、開口部周辺でコンクリートが圧縮軟化している。

図-5に示す鉄筋の降伏状況については、ケース1-0.0では立坑全体のせん断変形に応じて斜めに降伏範囲が分布しているが、ケース1-0.49では開口部付近のせん断変形に応じた降伏範囲の分布が確認できる。

以上に示したように、開口が存在すると立坑のせん断変形は開口が配置されている立坑下部に集中する。立坑下部は開口によってコンクリートや鉄筋などが欠損しており、開口が無い場合よりもせん断耐力が低下することが明らかである。また、開口が大きければ欠損量が増え、せん断力の低下量も増えることとなる。ただし、図-3の荷重変位関係に示すように、開口率が0.1程度と小さい場合には、その影響は無視できる。

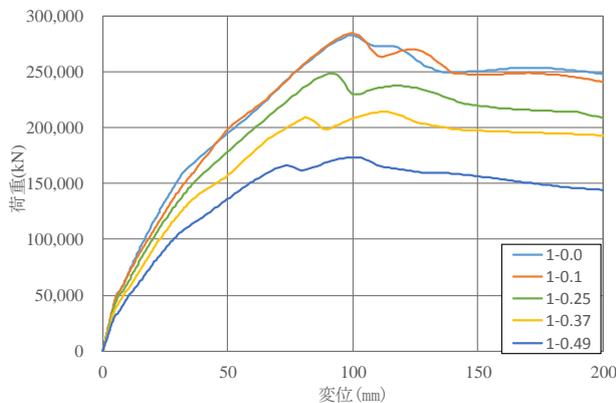
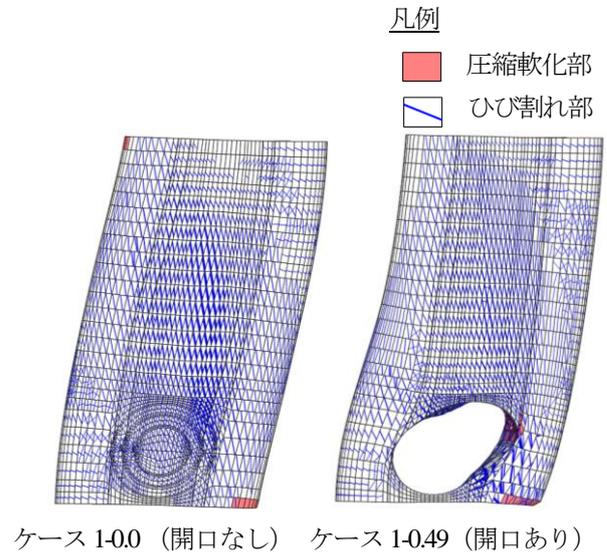


図-3 荷重変位関係 (ケース1)

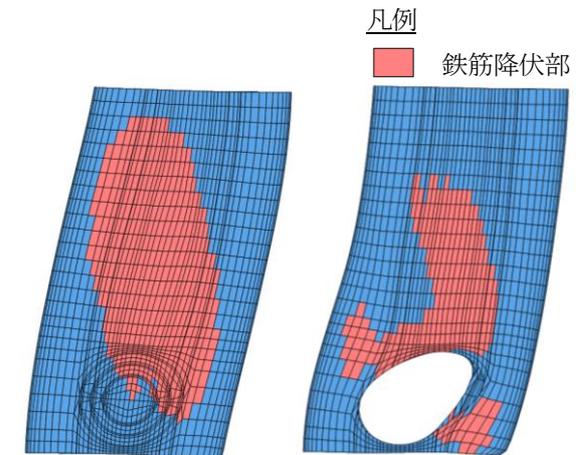
## (3) 耐力比と開口率の関係

ケース1-0.10, 1-0.25, 1-0.37, 1-0.49の各ケースで得られた耐力を開口が無いケース1-0.0で得られた耐力で除し、ケース1-0.0に対する耐力比を算出した。この耐力比と開口率の関係を図-6に示す。図-6に示す通り、開口率0.1~0.49において線形関係が見られ、開口率に応じて簡易に耐力を評価できる可能性を示している。



ケース1-0.0 (開口なし) ケース1-0.49 (開口あり)

図-4 コンクリートの損傷状況



ケース1-0.0 (開口なし) ケース1-0.49 (開口あり)

図-5 水平鉄筋の降伏状況

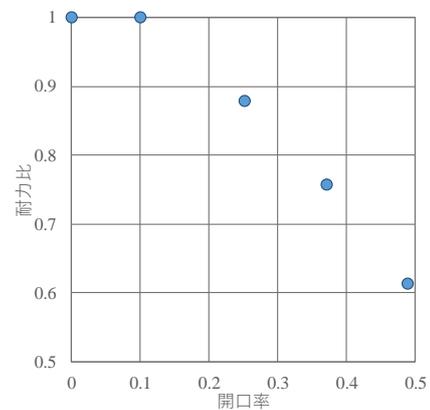


図-6 耐力比と開口率の関係 (ケース1)

なお、4～7章では部材厚、水平鉄筋の鉄筋比、コンクリート強度、開口の配置の条件を変更した場合の影響について記述しており、上記と同様に各ケースの開口率0.0における耐力との比を算出し考察した。

#### (4) せん断伝達のメカニズムの考察

1章で述べたように、現状の設計法では地震時にせん断力が作用する方向に対して、直交する壁が両側とも開口により欠損した場合には、せん断力に対して抵抗する部材がなくなり構造的に成立しなくなる。今回の検討結果から開口率が0.25の場合には90%程度、開口率が0.49の場合でも60%程度の耐力が残存することが確認でき、立坑の対面する壁の両側に開口がある場合にも耐力を確保できることが確認された。

図-7にケース1-0.0および1-0.49における、立坑側面および開口中央位置の水平断面の最大荷重時のせん断応力分布を示す。図に示すように、せん断応力が卓越する箇所について立坑側面ではケース1-0.0はせん断変形に応じて斜めに分布しているのに対して、ケース1-0.49では開口より上側では斜めに分布しているが、開口より下側では開口の左右にせん断応力が流れている。また、水平断面ではケース1-0.0は主として荷重作用方向と平行する壁においてせん断応力が大きくなっているが、ケース1-0.49では荷重作用方向と直交する壁においてせん断応力が大きくなっている。このことより、開口を有する立坑では開口上部の壁を介して開口に隣接する左右の壁にせん断力が伝達されることが確認でき、その結果として対面する壁の両側に開口がある場合においても耐力が得られたと考える。

なお、せん断応力の分布は開口の位置により異なると考えられ、開口の位置を変えることでせん断耐力が低下する可能性もあると考える。本論文では立坑の下部に開口が位置する場合の挙動を把握することとし、開口が立坑の下部以外に位置する場合については今後の課題とする。

### 4. 部材厚の影響について

#### (1) 最大荷重時の損傷状況

部材厚はケース1では2.5m、ケース2-1では1.75m、ケース2-2では1.0mである。ケース1とケース2-1および2-2の応答を比較することにより、部材厚の相違による耐力への影響を確認した。図-8、図-9(次頁)にケース1-0.49、2-1-0.49および2-2-0.49の荷重変位関係の最大荷重時におけるコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況を示す。図-8に示す通り、ケース1-0.49とケース2-1-0.49および2-2-0.49とでコンクリートのひ

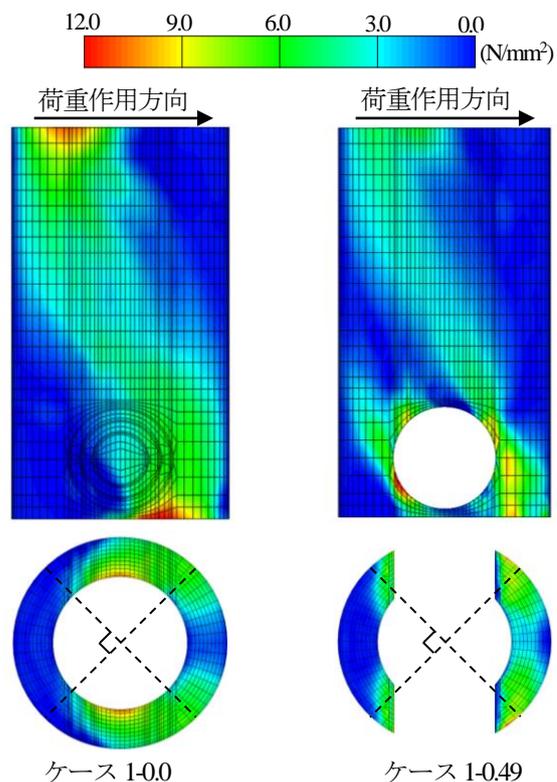


図-7 最大荷重時のせん断応力分布

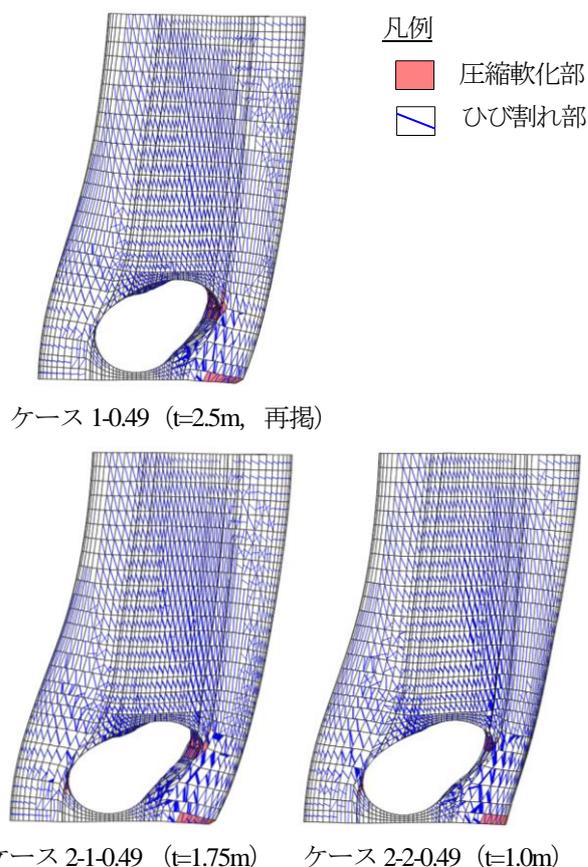


図-8 コンクリートの損傷状況

び割れ状況および変形状況には、大きな相違は確認できない。

図-9に示す鉄筋の降伏状況では、部材厚が薄くなるほど開口付近のせん断変形に応じた降伏範囲が広がっていることが確認できる。部材厚が薄い場合には剛性の小さい開口部周辺にせん断変形が集中し、その結果開口周囲の水平鉄筋の降伏範囲が広がったものと考えられる。

## (2) 耐力比と開口率の関係

図-10に荷重変位関係より求めた、耐力比と開口率の関係を示す。開口率 0.1 における耐力比がケース 2-1 や 2-2 では 1.0 未満であることより、耐力に影響を及ぼす開口の大きさは部材厚により異なることが確認できる。

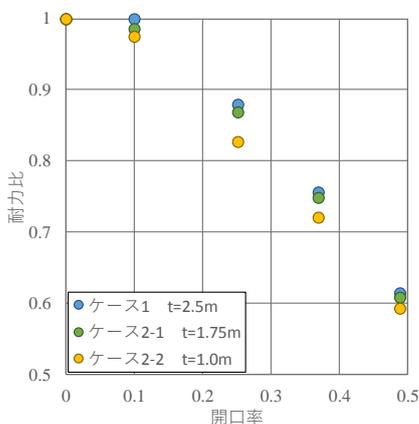
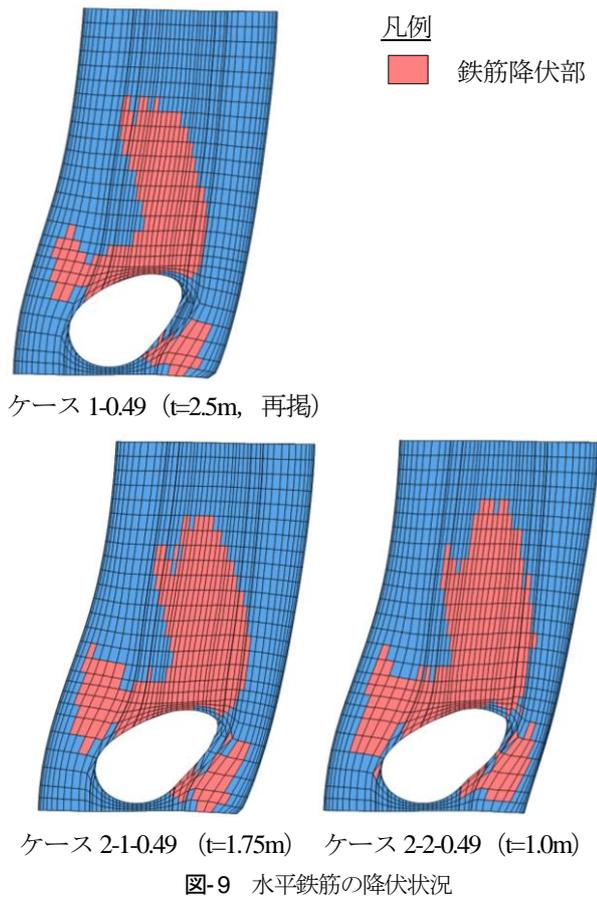


図-10 耐力比と開口率の関係 (ケース 1, 2-1 および 2-2)

また、ケース 1 と同様にケース 2-1 や 2-2 においても開口率が 0.1~0.49 では線形関係が確認できる。ケース 1 に比べてケース 2-1 や 2-2 では同一開口率における耐力比が小さくなっているが、ケース 1 に対する耐力比の低下はケース 2-1 ではわずかであることより、部材厚が 2.0m 前後であれば部材厚の相違による耐力比への影響は小さいことが確認できる。

## 5. 水平鉄筋の鉄筋比の影響について

### (1) 最大荷重時の損傷状況

水平鉄筋の鉄筋比は、ケース 1 では 0.46%、ケース 3-1 では 0.15%、ケース 3-2 では 1.2% としている。ケース 3-1 は最小鉄筋比、ケース 3-2 は最大鉄筋比である。ケース 1、ケース 3-1 および 3-2 の応答を比較することにより、水平鉄筋の鉄筋比による耐力への影響を確認した。図-11、図-12にケース 3-1-0.49 および 3-2-0.49 の荷重変

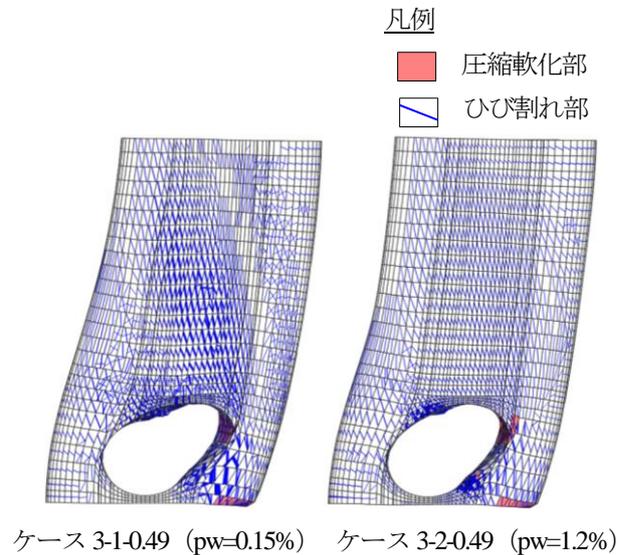


図-11 コンクリートの損傷状況

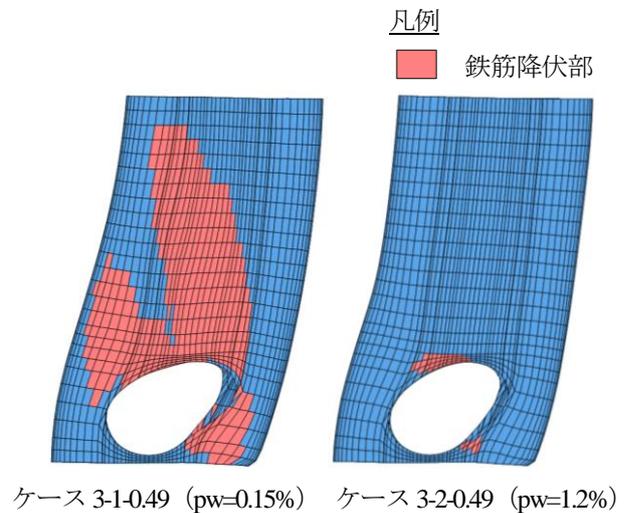


図-12 水平鉄筋の降伏状況

位関係における最大荷重時のコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況を示す。図-11に示す通り、ケース 3-2-0.49 では開口周囲で圧縮軟化しているコンクリートの範囲が広がっていることが確認できる。また、図-12に示す通り、ケース 3-2-0.49 では開口部付近の局所的な降伏範囲の分布となっている。ケース 3-2-0.49 では最大鉄筋量の水平鉄筋を設置しているため、水平鉄筋が降伏する前にコンクリートが圧縮軟化し破壊に到ったものと考えられる。

## (2) 耐力比と開口率の関係

図-13に荷重変位関係より求めた、耐力比と開口率の関係を示す。図に示す通り、開口率 0.1 における耐力比がケース 3-2 では 1.0 未満になっている。ケース 3-1 では開口率 0.1 における耐力比が 1.0 になっているが、開口率 0.25 を境に勾配が変化していることより、耐力比が 1.0 となる開口率は 0.1 以上であることが想定される。このことより、耐力に影響を及ぼす開口の大きさは水平鉄筋の鉄筋比により異なることが確認できる。

また、開口率 0.1~0.49 において概ね線形関係となることが確認できるが、同一開口率における耐力比はケース 3-1、ケース 1、ケース 3-2 の順に小さくなっており、鉄筋比の増加とともに同一開口率における耐力比は小さくなることが確認できる。水平鉄筋が多く配置されている場合には、せん断ひび割れに対して水平鉄筋が抵抗し全体的に変形量が小さくなるため、立坑全体の変形に対して開口部周辺の変形が相対的に大きくなる。そのため、水平鉄筋の鉄筋比を大きくした方が開口による影響が顕著になると考えられる。

## 6. コンクリート強度の影響について

### (1) 最大荷重時の損傷状況

コンクリート強度は、ケース 1 では  $40\text{N/mm}^2$ 、ケース

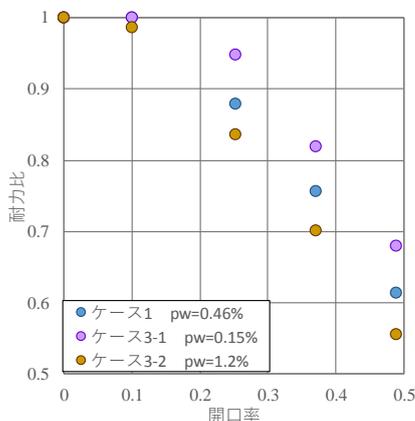


図-13 耐力比と開口率の関係 (ケース 1, 3-1 および 3-2)

4-1 では  $18\text{N/mm}^2$ 、ケース 4-2 では  $60\text{N/mm}^2$  である。ケース 1、ケース 4-1 および 4-2 の応答を比較することにより、コンクリート強度による耐力への影響を確認した。

図-14、図-15にケース 4-1-0.49 および 4-2-0.49 の荷重変位関係における最大荷重時のコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況を示す。コンクリートの設計基準強度を  $18\text{N/mm}^2$  としたケース 4-1-0.49 では開口部周囲のコンクリートにおいて広い範囲で圧縮軟化が生じているが、設計基準強度を  $60\text{N/mm}^2$  としたケース 4-2-0.49 では開口部周囲で圧縮軟化しているコンクリートは局所的である。また、鉄筋の降伏状況については、ケース 4-1-0.49 では開口部付近のせん断変形に応じた降伏範囲が広がっている。ケース 4-2-0.49 では立坑全体のせん断変形に応じて斜めに降伏範囲が分布している。

1章で先述した通り、せん断補強鋼材比とせん断補強鋼材の降伏強度の積とコンクリートの設計圧縮強度の比

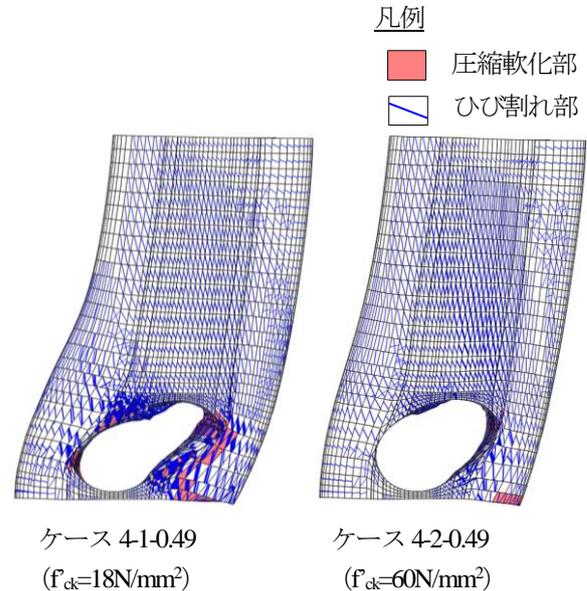


図-14 コンクリートの損傷状況

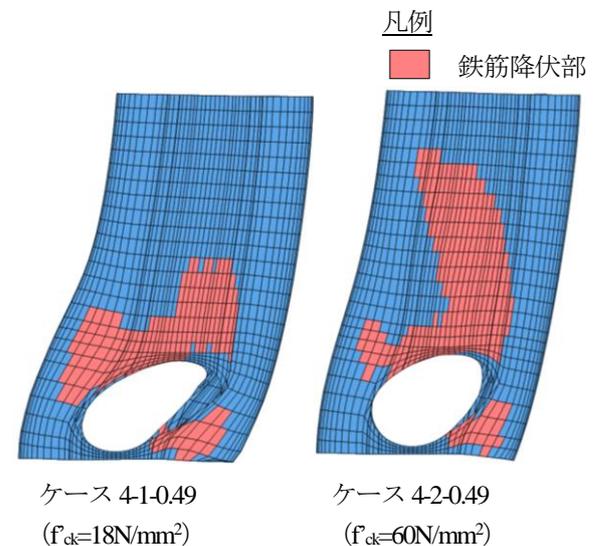


図-15 水平鉄筋の降伏状況

が0.1程度を上回らないように水平鉄筋の最大鉄筋量は定められており、コンクリート強度によって水平鉄筋の最大鉄筋量は決まる。そのため、ケース4-1ではモデル化している水平鉄筋の鉄筋量が概ね最大鉄筋量になっており、その結果として開口周辺の立坑下部に変形および損傷が集中したものと考えられる。

## (2) 耐力比と開口率の関係

図-16に荷重変位関係より求めた、耐力比と開口率の関係を示す。図に示す通り、各開口率における耐力比の相違はわずかであり概ね一致している。

5章における水平鉄筋の鉄筋比の影響に関する検討では、水平鉄筋が多くなるほど立坑全体の变形に対して開口部周辺の变形が相対的に大きくなり、鉄筋比を大きくした方が開口による影響は顕著になると記述したが、立坑のひび割れやそれに伴う变形はコンクリート強度に依存する。そのため、水平鉄筋の鉄筋比だけではなくコンクリート強度も、開口を有する立坑の挙動に影響すると考えられる。先述した最大荷重時の損傷状況ではコンクリート強度により損傷状況が異なっており、コンクリート強度が小さい場合には開口部周辺の立坑下部における損傷が顕著である。開口率と耐力比の関係にはコンクリート強度の影響は確認できないことより、コンクリート強度が小さい場合には立坑全体の变形も大きくなるため、開口周辺でのせん断変形の影響が小さくなったものと考ええる。以上より、今回実施した18N/mm<sup>2</sup>~60N/mm<sup>2</sup>の範囲ではコンクリート強度の相違による耐力比への影響は小さいことを確認した。

## 7. 開口の配置の影響について

### (1) 最大荷重時の損傷状況

ケース1~4では立坑の対面する壁の両側に開口を設

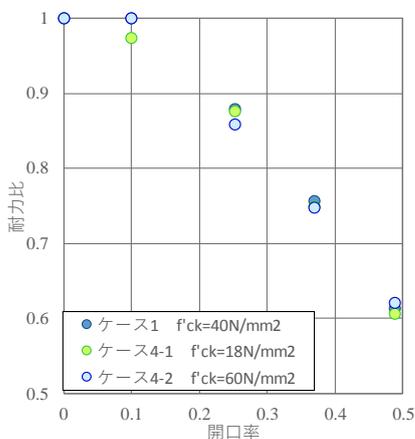


図-16 耐力比と開口率の関係 (ケース1, 4-1および4-2)

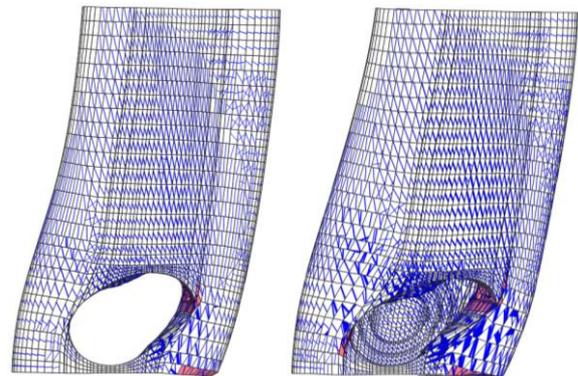
置しており、ケース5では片側のみに開口を配置している。ケース1とケース5における応答を比較することにより、開口の配置による耐力への影響を確認した。図-17、図-18に最大荷重時のコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況を示す。ケース5-0.49におけるコンクリートの損傷状況および水平鉄筋の降伏状況は、開口がある面から見た状況を示している。図-17に示すように、ケース5-0.49においてはケース1-0.49と比較して開口部周辺での变形が卓越している。ケース5-0.49では片側開口となっているため立坑の構造が非対称となっており、剛性が小さい開口のある面の壁に変形が集中したものとする。図-18に示す鉄筋の降伏状況についても、ケース1-0.49と比較してケース5-0.49における開口部付近において降伏範囲が広がっている。

### (2) 耐力比と開口率の関係

図-19(次頁)に荷重変位関係より求めた、耐力比と開口率の関係を示す。図中には、ケース1の結果より開口

凡例

- 圧縮軟化部
- ひび割れ部

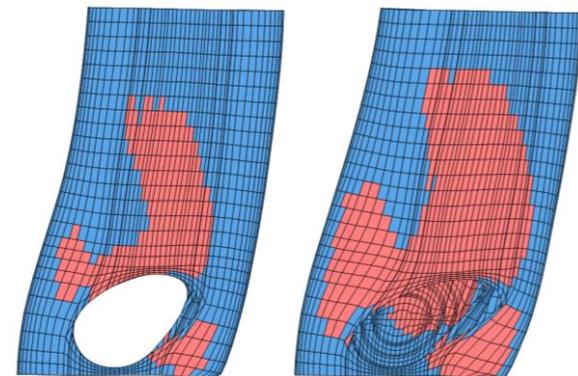


ケース1-0.49 (両側、再掲) ケース5-0.49 (片側)

図-17 コンクリートの損傷状況

凡例

- 鉄筋降伏部



ケース1-0.49 (両側、再掲) ケース5-0.49 (片側)

図-18 水平鉄筋の降伏状況

による耐力の低下の割合を半分にしたもの（以下、ケース1×1/2）を参考として示している。図に示すように、開口率が小さい場合にはケース5の結果とケース1×1/2の結果とが概ね一致しているが、開口率が大きくなるほどケース5とケース1×1/2との相違が広がることが確認できる。先述したように、片側のみに開口を設置した場合には両側に開口を設置した場合よりも、開口部周辺における損傷状況が卓越しており、その結果両側に開口を設置した場合の結果から想定される耐力よりも小さくなったものと考えられる。また、その低下の割合は開口率の増加とともに大きくなることを確認できる。開口率0.49におけるケース1×1/2に対するケース5の割合は0.94となっており、片側のみに開口を配置した立坑では5%～10%程度の安全率を考慮しておくことが望ましいと考える。

## 8. 開口を有する立坑の耐力の評価方法

前述した通り、部材厚、水平鉄筋の鉄筋比、コンクリート強度、開口の配置により開口を有する立坑の耐力に影響を及ぼすが、全ケースにおいて耐力比と開口率は概ね線形関係となることを確認できた。以上より、今回実施した条件においては、開口を有する立坑のせん断耐力は開口率を用いて簡易的に評価できると考える。開口を有する立坑のせん断耐力の評価式を下記に示す。

$$V_d' = \alpha \left( 1 - \frac{r_1}{r_0} \right) V_d + \beta \quad (2a)$$

- ここで、 $V_d'$ ：開口を有する立坑のせん断耐力  
 $V_d$ ：開口のない立坑のせん断耐力  
 $\alpha, \beta$ ：異なる条件における耐力を評価するためのパラメーター  
 $r_1$ ：円形開口の開口径  
 $r_0$ ：立坑外径

図-20に今回実施した検討ケースにおける耐力比と開口率の関係を示す。図中に示す黒い点線は、式2aにおいて $\alpha=1.0$ 、 $\beta=0.0$ とした場合の開口率と耐力比の関係である。図-20に示すように、図中の黒い点線に示す耐力比よりもすべてのケースにおける耐力比は大きくなっている。このことより、式2aにおいて $\alpha=1.0$ 、 $\beta=0.0$ とした場合には開口を有する立坑の耐力の安全側の評価が可能であると考えられる。立坑の片側のみに開口を設置する場合には、7章で先述した通り、両側に開口がある場合における耐力比と開口率の関係より推定した耐力よりも小さくなることより、適宜安全率を考慮することにより両

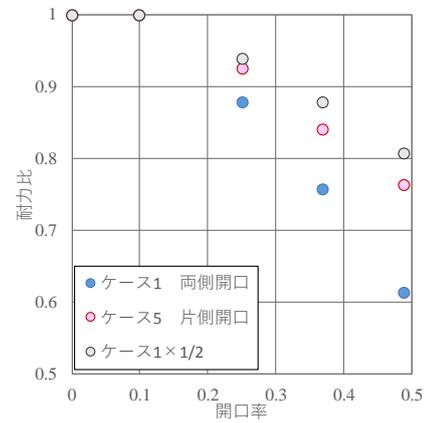


図-19 耐力比と開口率の関係（ケース1および5）

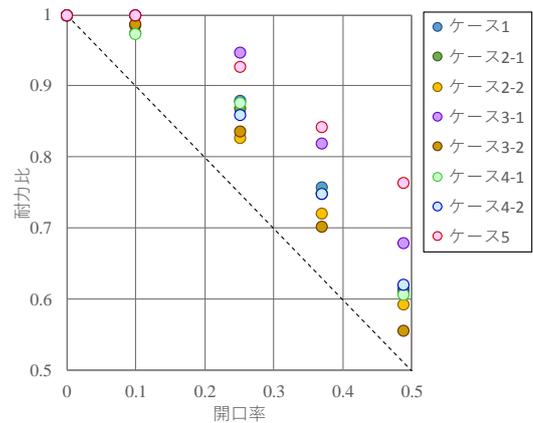


図-20 耐力比と開口率の関係

側に開口がある場合と同様にして耐力の評価が可能と考える。また、式2aに示す $\alpha$ および $\beta$ を適切に設定することで、より合理的なせん断耐力の評価が可能である。

## 9. 結論

本論では、開口を有する円形立坑における耐力の評価を目的として、コンクリートおよび鉄筋の非線形を考慮した3次元解析モデルにより、実際の構造物を想定し標準的と考えられる条件で複数ケースの解析を実施した。本論で得られた知見を以下に示す。

- (1) 立坑の対面する壁の両側に開口を有する立坑においても、せん断耐力を確保できることが明らかとなった。また、開口のない立坑に対する開口を有する立坑の耐力の比は、開口率に対して線形関係になることが確認できた。
- (2) 立坑の部材厚が2.0m前後であれば、部材厚による耐力比への影響は小さいことが確認できた。
- (3) 水平鉄筋の鉄筋比に関しては、鉄筋比が大きくな

るほど同一の開口率における耐力比が小さくなることが確認できた。

- (4) コンクリート強度については、 $18\text{N/mm}^2 \sim 60\text{N/mm}^2$ の範囲では耐力比への影響は小さいことが確認できた。
- (5) 立坑における開口が片側の場合には、同一径の開口が両側にある場合より推定される値に比べて耐力が小さくなり、その耐力の低下は開口径が大きくなるほど顕著になることが確認できた。
- (6) 開口を有する円形立坑の耐力の評価方法について、開口率を用いた簡易的な評価式を提案した。

本論で得られた知見により、開口を有する立坑におけるせん断耐力を簡易的に評価できると考えられる。今後は、せん断スパン比、開口の形状、開口位置などが異なる条件についても実施し、本研究で提案するせん断耐力の評価式の適用範囲を確認し、さらに合理的な評価方法の確立に向けて検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.373，2012.
- 2) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（開削工法編），pp.2-38-2-42，2008.
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書【開削工法編】・同解説，pp.326-330，2016.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造 計算規準・同解説—許容応力度法—，pp.218-241，1999.
- 5) 米澤健次，渡辺伸和：地盤・構造物系の大規模・高速化非線形 FEM 解析技術「FINAL-GEO」，電力土木，No.387，pp.156-158，2017
- 6) 長沼一洋：三軸圧縮化のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170，1995.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.472-474，2012.
- 8) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25，No.9，pp.107-120，1987.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.37-38，2012.
- 10) Al-Mahaidi, R.S.H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Cornell Univ Dept. Of Structural Engineering., 1979
- 11) 滝川真太郎，高澤裕二，恒川修，時田秀住，植村勇仁：シールドトンネル用大深度立坑の実績調査，土木学会第 56 回年次学術講演会，IV-042，pp.84-85，2001.
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.325-327，2012.
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.180-187，2012.

(2017.?? 受付)

## Consideration About The Evaluation Method Of The Shear Strength Of The Circular Shaft Having Opening Using The Material Non-linear Analysis

Kenichi HISASUE, Kazushi NISHIZAWA and Kiyoshi SATO

Because of a partial loss of area for opening, the shaft having opening secures a necessary shear strength by the residual section respect the opening. In general, the three-dimensional behavior is not considered with the structure around the opening, that may be not rational. Therefore, we checked the effect on the shear strength of the shaft by three-dimensional FEM analysis to simulate the concrete and the reinforcing bar. And also, we confirmed the influence of the thickness, the concrete strength, the quantity of the distributing bar and the layout of the opening, that have a large influence on the shear strength of the shaft. As a result, we confirmed that we might be able to evaluate the shear strength of the shaft having opening with a simple numerical expression.