

シールドトンネル用開口を有する大深度円形立坑の開口部周辺のモデル化に関する一考察

山口 哲司¹・板野 貴大²・岩波 基³

¹正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部土木設計部（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1）

E-mail: teyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

²学生会員 早稲田大学大学院 創造理工研究科建設工学専攻（〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1）

E-mail: taakaa_nichiham@akane.waseda.jp

³正会員 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1）

E-mail: miwanami@waseda.jp

円形立坑の開口部周辺の応力分布は複雑な為、2次元解析では適切にモデル化することが難しく、過去の実績や経験等から安全側の設計となる鉛直方向の2次元の梁モデルが用いられることが多いが、3次元モデルと比べると合理的な設計方法とは言い難い。また一方で、3次元モデルを用いてのFEM解析は非常に煩雑で、かつ設計の構造解析手法も体系化されておらず、その評価も設計者の判断によるところが大きい。そこで本報告では、規模の異なる3種類の円形立坑について3次元モデルや2次元モデルを用いて比較検討を行うことによって、現行の2次元モデルの適用範囲について整理し、また、筆者らがこれまでの研究¹⁾で提案した3次元効果を考慮した開口部側壁の合理的な2次元モデルの適用性について検討を行ったので、それら結果を報告する。

Key Words: circular deep shaft, opening for shield tunnel, 3D analysis, 2D analysis, 3D effect

1. はじめに

近年、リニア新幹線や東京外かく環状道路等の大深度トンネルプロジェクトが進行しており、シールド工事用の立坑として大深度の立坑が多く計画されている。比較的浅い深度の立坑は、平面的に無駄な空間が生じない矩形立坑が採用されることが多いが、大深度の立坑においては、構造的に有利である円形立坑が採用されることが多い。

一般的に円形立坑の側壁の設計は、その断面形状よりリング効果が期待できることから、水平方向のリングにモデル化されるが、シールドマシンが発進・到達する開口部は、トンネルの構築に伴い断面欠損が生じるため、鉛直方向の梁にモデル化される。また、近年においては、開口部周辺の複雑な応力分布を、正確に設計に反映することを目的に3次元モデルが採用されるケースが増えてきている。しかし、これら3次元モデルを用いてのFEM解析は煩雑で、設計の構造解析手法も体系化されておらず、また、断面力等の解析結果に対する評価も設計者の判断によるところが大きい。

そこで、筆者らはこれまでの研究¹⁾で、現行の2次元モデルによる設計手法の課題を抽出し、3次元効果を考慮した開口部側壁の合理的な2次元のモデル化手法を提案した。本報告では、規模の異なる3種類の円形立坑について3次元モデルや現行の2次元モデル、3次元効果を考慮した提案モデルを比較することによって、現行の2次元モデルの適用範囲について整理し、また、提案モデルの適用性についての検討を行ったので、それら結果を報告する。

2. 開口を有する側壁の構造解析モデル

(1) 現行の2次元モデル

一般的な設計においては、2次元モデルで解析を行うため、主応力が発生する方向をモデル化することが多い。円形立坑の側壁においては、円形形状によるリング効果から水平方向のリングモデルで解析を行う。一方、トンネルの構築に伴い断面欠損が生じる開口部周辺の立坑本体壁は、かまち梁や底版に支持される鉛直方向の梁にモ

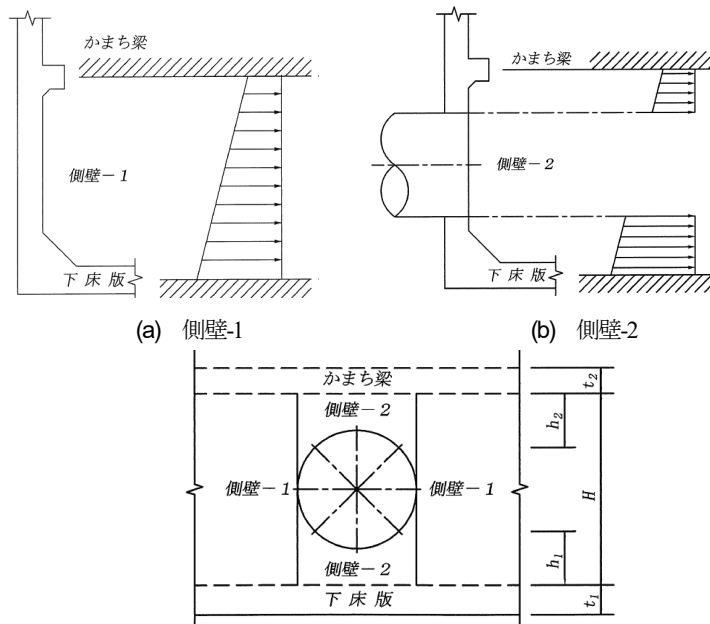


図-1 開口部周辺のモデル化方法²⁾

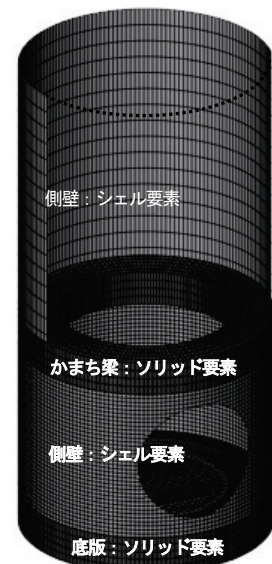


図-2 3次元モデル

デル化される。『トンネル標準示方書〔開削工法〕・同解説』²⁾等では示されている一般的な開口部周辺のモデル化方法を図-1に示す。

- (a)側壁-1 は、面外荷重に対して図-1(a)に示すように、かまち梁と底版を固定とした両端固定梁にモデル化して解析を行う。
- (b)側壁-2 は、面外荷重に対して図-1(b)に示すように、かまち梁または底版を支点とした片持ち梁にモデル化して解析を行う。

(2) 3次元モデル

3次元モデルによる円形立坑の構造解析は、開口部周辺の合理的な設計や円形立坑全体の経済的な設計を目的に行われることが多く、2次元モデルと同様に、算出された水平方向の断面力と鉛直方向の断面力に対して断面照査が行われ、また、開口部周辺の応力分布が複雑な箇所においては、必要に応じて適切な開口補強が行われる。

モデル化に関しては、円形立坑は面部材であることから実務上の取扱いが簡便で断面力が直接算出されるシェル要素が用いられることが多いが、かまち梁のように部材厚が大幅に変化する箇所においては軸線を正確にモデル化できないことや、底版接続部において剛域設定方法が明確でない等の課題がある。そこで、本研究では図-2に示すようにかまち梁と底版のモデル化をソリッド要素を用いて行った。

(3) 提案モデル

筆者らはこれまでの研究¹⁾で、現行の2次元モデルによる解析結果は、3次元モデルによる解析結果と比べて曲げモーメントが大きく算出され、また、その原因は欠

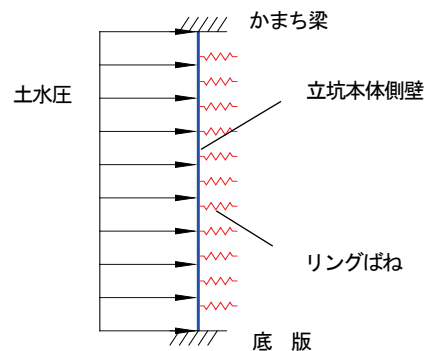


図-3 提案モデルのイメージ

円断面においてもリング効果が生じることに起因すると報告した。そこで本報告では、円形立坑における地下連続壁の鉛直方向の設計で一般的に用いられるリングばねを設けることによって、3次元効果を鉛直方向の梁モデルに取り入れた。図-3に提案モデルの解析モデルイメージを、以下にリングばねの算出式を示す。

$$k_r = EA/r^2 \quad (1)$$

- ここに、
- k_r : リングばねのばね定数 (kN/m²/m)
 - E : 立坑本体壁のヤング係数 (kN/m²)
 - A : 本体壁の断面積 (m²)
 - r : 立坑の半径 (m)

3. 立坑規模と各解析モデルとの関係

(1) 検討方針

本報告では、表-1に示す規模の異なる3種類の円形立

表-1 検討ケース

	Case1	Case2	Case3
概略図			
諸元	立坑内径：26.0m ，壁厚：3.0m 開口径：14.0m ，曲げスパン※：18.0m	立坑内径：11.0m ，壁厚：1.6m 開口径：7.0m ，曲げスパン※：9.0m	立坑内径：8.0m ，壁厚：1.2m 開口径：4.0m ，曲げスパン※：5.0m
適用構造物	道路・地下河川 等	鉄道 等	下水道 等

※ かまち梁下端から底版上端までを曲げスパンとする

表-2 解析条件

立坑形状	表-1 参照
トンネル用開口	表-1 参照
コンクリートの設計基準強度	$f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$
作用側圧	100kN/m ² (全深度一定・偏圧なし)

坑について3次元モデルと現行の2次元モデル，提案モデルとを比較することによって，現行の2次元モデルの適用範囲について検討を行うとともに，提案モデルの適用性について検討を行う．また，本検討は構造解析モデルの比較検討を目的としていることから，表-2に示すように解析条件は簡単にした．

(2) 現行の2次元モデルの適用範囲について

図-5，図-6に現行の2次元モデルと3次元モデルに関する曲げスパンと曲げモーメントの関係を，図-4に3次元モデルの断面力抽出位置を示す．また，本報告では，かまち梁下端から底版上端までを曲げスパンとした．

a) 側壁-1について

図-5に示すようにスパン中央の曲げモーメントは，比較的規模が小さい立坑においては，現行の2次元モデルと3次元モデルとに大きな差は無いが，立坑規模が大きくなるとその差は大きくなることが確認できる．ただし，開口部近傍においては立坑規模に関わらず，現行の2次元モデルと3次元モデルの解析結果の差は比較的小さいことが確認できる．

一方，端部の曲げモーメントは開口部近傍においても立坑規模が大きくなるにつれてその差は大きくなることが確認できる．

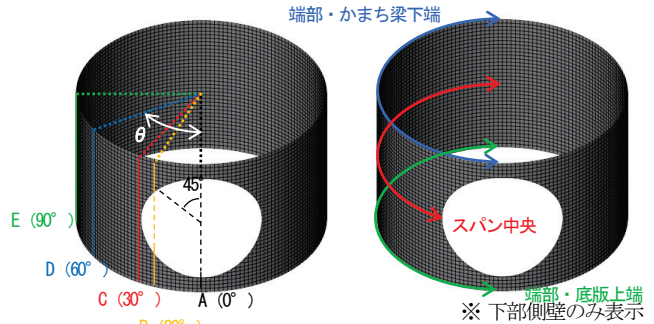


図-4 3次元モデルの断面力抽出位置

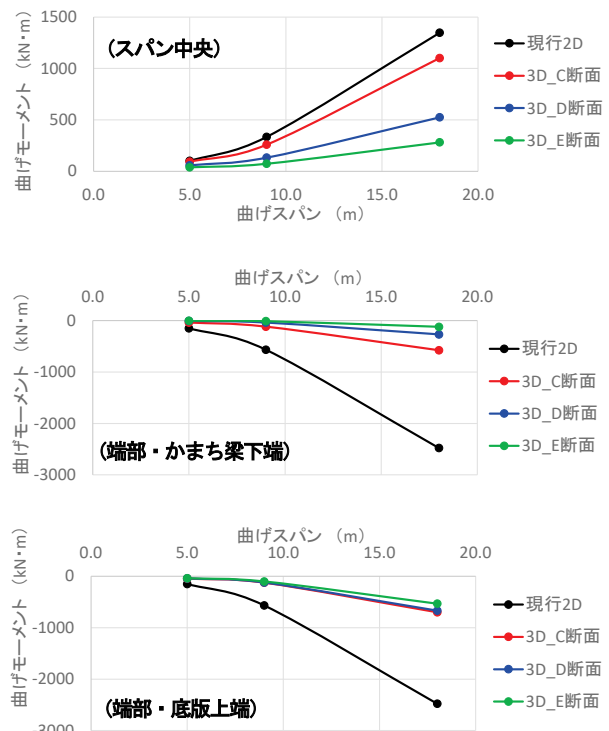


図-5 側壁-1における曲げスパンと曲げモーメントの関係

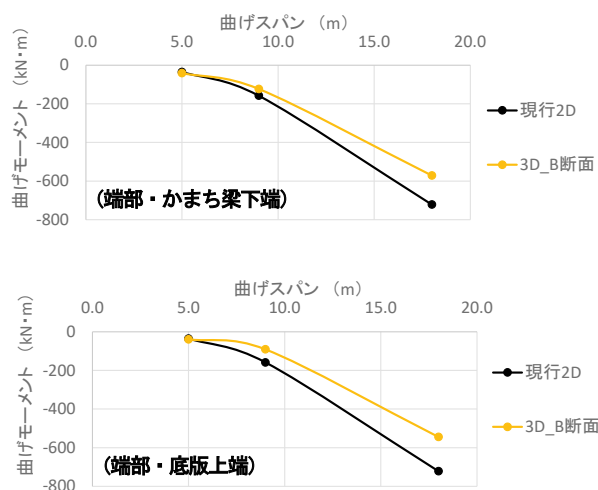


図-6 側壁-2における曲げスパンと曲げモーメントの関係

b) 側壁-2について

図-6に示すように、側壁-2においても側壁-1と同様に、立坑規模が大きくなるにつれて現行の2次元モデルと3次元モデルとの差は大きくなる傾向にあるが、側壁-1よりも両者の差は小さいことが確認できる。

c) 結果の考察

トンネル外径 4.0m の下水道クラスを想定した立坑内径 8.0m の円形立坑においては、開口部側壁の曲げスパンが 5.0m と比較的小さいことから、現行の2次元モデルと3次元モデルとでは、解析結果に大きな差は無いが、トンネル外径 14.0m の道路トンネルクラスを想定した円形立坑においては、曲げスパンが 18.0m 程度と非常に大きくなるため、両者に大きな差が生じる。特に、開口部から離れるにつれて両者の差が大きくなることから、開口部から離れた位置においては3次元効果が期待できると想定される。

(3) 提案モデルの適用について

提案モデルの適用に関する検討は、最も立坑規模が大きい Case1 を用いて行う。また、本報告では図-7に示すように、側壁-1 を開口部の影響を受ける側壁-1_a、開口部の影響を受けない側壁-1_b に分割し、図-4に示すC断面を側壁-1_a の代表断面に、E断面を側壁-1_b の代表断面とした。

a) 深度方向分布

図-8に側壁-1_a および側壁-1_b における鉛直方向曲げモーメントの深度方向分布図を示す。図-8に示すように開口部近傍の側壁-1_a は、スパン中央においては現行の2次元モデルと3次元モデルとは同程度の曲げモーメントとなるが、端部においては大きく異なり、提案モデルの方がより3次元モデルに近いことが確認できる。

一方、開口部の影響を受けない側壁-1_b はスパン中央、

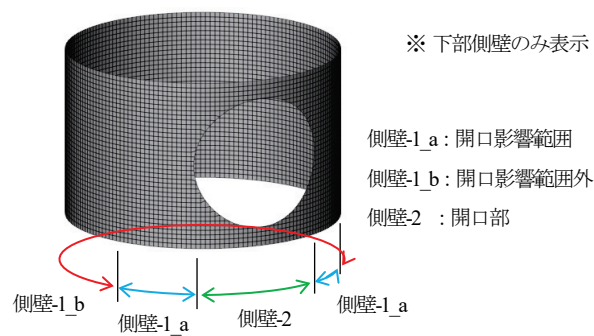


図-7 提案モデルの区分

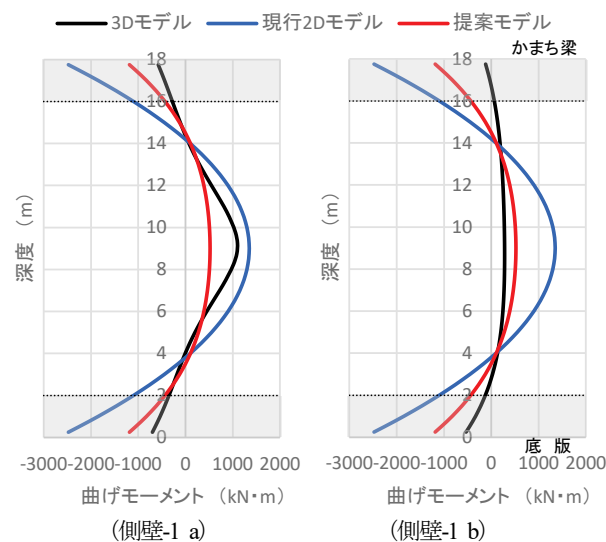


図-8 鉛直方向曲げモーメントの深度分布

端部ともに現行の2次元モデルより提案モデルの方が3次元モデルの曲げモーメントに近いことが確認できる。

b) 水平方向分布

図-9にスパン中央位置およびかまち梁下端、底版上端位置における鉛直方向曲げモーメントの水平方向分布図を示す。抽出位置は図-4に示す。図-9に示すように3次元モデルにおけるスパン中央の曲げモーメントは、開口部近傍においては現行の2次元モデルと同程度あるが、開口部から離れるにつれて減少し、90°付近以降で一定値に収束する。また、60°付近で提案モデルによる曲げモーメントより下回ることが確認できる。

一方、端部においては、0°～180°の全断面で3次元モデルによる曲げモーメントは現行の2次元モデルの曲げモーメントを大きく下回っていることと、リングばねを考慮した提案モデルを用いることで、より3次元モデルに近い結果が得られることが確認できる。

また、3次元モデルの解析結果より側壁-1_a と側壁-2 の曲げモーメントは両者の交点付近を最大値として連続していることから、提案モデルにおける側壁-2 の曲げモーメントは、側壁-1_a の曲げモーメントと 0° 位置で現行の解析モデルを用いて算出した曲げモーメントを線形補完した。

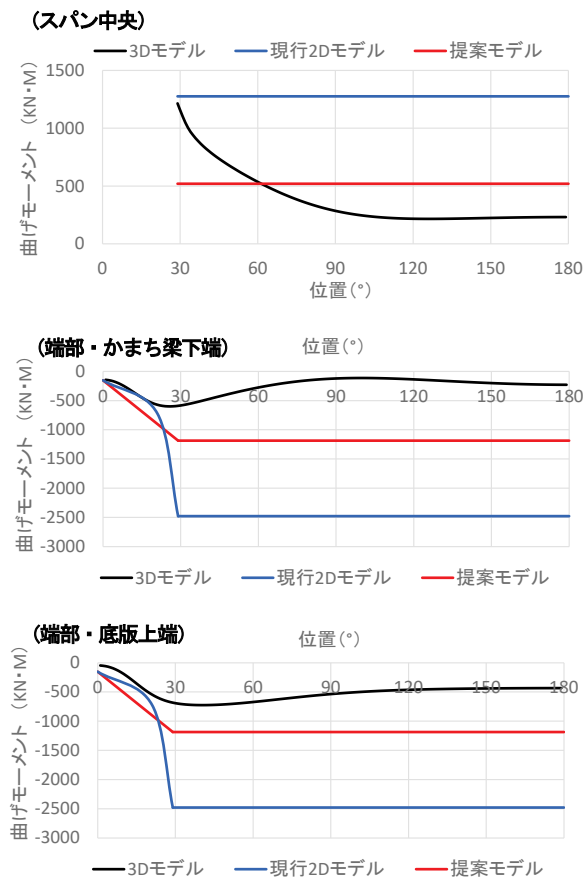


図-9 鉛直方向曲げモーメントの水平分布

c) 結果の考察

側壁-1_aは開口部近傍であることから3次元効果が期待できないため両端固定梁に近い挙動となり、開口部の影響を受けない側壁-1_bにおいては、3次元効果が期待できることからリングばねを考慮した提案モデルの挙動に近づくものと考えられる。また、梁端部においては、欠円断面とならずリングが形成されているため、リングばねを考慮した提案モデルの挙動に近いものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 現行の2次元モデルは、かまち梁と底版に固定支持される両端固定梁としてモデル化されるが、3次元モデルによるFEM解析の結果と比較すると過大な評価になっており、立坑規模が大きくなるにつれてその影響は大きくなる。
- (2) ただし、トンネル外径4.0mの下水道クラスを想定した立坑内径8.0m程度の規模であれば、現行の2次元モデルと3次元モデルによる差は小さい。
- (3) 開口部近傍は3次元効果が期待できないことから両端固定梁に近い挙動となるが、開口部の影響を受けない範囲においては3次元効果が期待できることから、リングばねを設けた梁に近い挙動となる。
- (4) ただし、かまち梁下端や底版上端付近においては、開口による断面欠損がなく、3次元効果が期待できることから、リングばねを設けた梁に近い挙動となる。
- (5) 以上のことから、円形立坑の開口部側壁は、両端固定梁区間の側壁-1を、開口部の影響を受ける側壁-1_a、開口部の影響を受けない側壁-1_bに分けることによって、より合理的な設計となる。また、片持ち梁区間となる側壁-2の曲げモーメントは、側壁-1_aと図-4に示すA断面の解析結果を線形補完することによって算出可能と考えられる。

参考文献

- (1) 山口哲司, 板野貴大, 岩波基: シールドトンネル用開口を有する大深度円形立坑の構造解析手法の提案, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 第76巻2号 p.I_21-I_33, 2020.
- (2) 土木学会: 2016年制定 トンネル標準施工方書〔共通編〕・同解説/〔開削工法編〕・同解説, 2016.
- (3) 土木学会: トンネル・ライブラリー第27号 シールド工事用立坑の設計, 2015.

(2021. 8. 6 受付)

A STUDY ON PROPOSAL OF STRUCTURAL ANALYSIS METHOD FOR CIRCULAR DEEP SHAFT WITH OPENING FOR SHIELD TUNNEL

Tetsuji YAMAGUCHI, Takahiro ITANO and Motoi IWANAMI

Since the stress around the opening of a circular shaft is complicated, it is difficult to properly model it in 2D analysis, and a vertical 2D beam model that is designed for safety is used based on past experience and experience. Often. However, it is not economical compared to the 3D model, and its effect is considered to be large especially when the opening is large. On the other hand, FEM analysis using a 3D model is very complicated, and the design method is not systematized, and the evaluation is based on the designer's judgment. Therefore, in this study, by using 3D FEM analysis, we investigated the effects of an opening and a rail beam on the circular deep shaft behavior around the opening. We propose a rational 2D modeling method for the sidewall of the opening considering the 3D effect.