

大深度円形立坑における開口部側壁と底版接合部のモデル化に関する一考察

小澤 柚月¹・山口 哲司²・岩波 基³

¹学生会員 早稲田大学 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: yudu2048tf@asagi.waseda.jp

²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

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、筆者らは3次元モデルの妥当性について検討を行うとともに、3次元モデルと現行の鉛直方向2次元梁モデルと比較することによって、現行の2次元モデルの課題を抽出し、3次元効果を考慮した開口部側壁の合理的な2次元モデルの提案を行った。しかし、提案したモデルは支持条件に課題を残していたため、本報告にてそれら課題の検討結果を報告する。

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、図-1に示すように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⁾²⁾で、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で用いられるような大規模な円形立坑においては、『トンネル標準示方書〔開削工法〕・同解説』³⁾等で示されている鉛直方向2次元梁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大きく異なること、対策として、円形立坑地下連続壁の鉛直方向の設計に用いられるリングばねを2次元梁モデルに設けることによって、リング効果を考慮した合理的な2次元モデルになることを報告した。

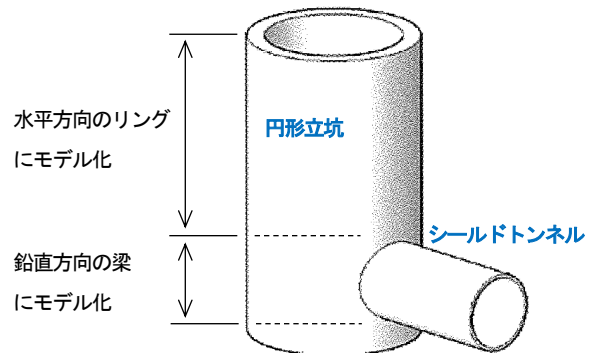


図-1 円形立坑イメージ図

しかし、上記の提案モデルでは、現行の2次元モデルと同様に底版やかまち梁との接合部を固定端としているため、端部の曲げモーメントが大きく算出される課題が残った。本報告では、それら課題に対して接合部の支持条件を回転ばねとする改良型の2次元梁モデルを考えたので、これらの検討結果について報告する。

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

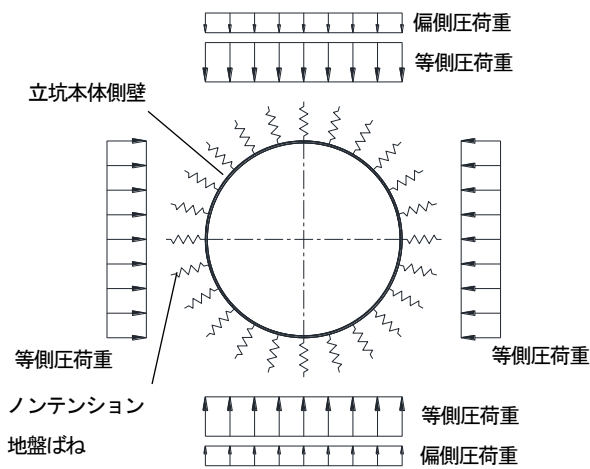
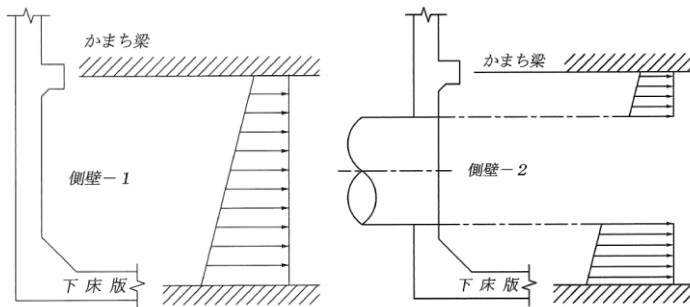


図-2 水平方向の2次元モデル



(a) 側壁-1

(b) 側壁-2

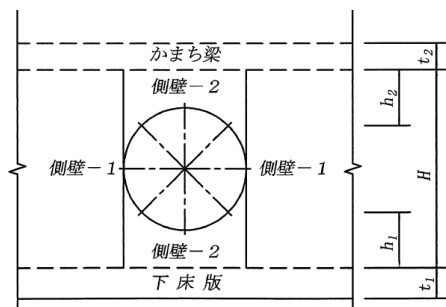


図-3 開口部周辺のモデル化方法³⁾

から水平方向のリングモデルで解析を行う。図-2に水平方向の2次元モデルを示す。

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デル化される。『トンネル標準施工方書 [開削工法]・同解説』³⁾等で示されている一般的な開口部周辺のモデル化方法を図-3に示す。

(a)側壁-1 は、面外荷重に対して図-3(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-3(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-4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。



図-4 3次元モデル

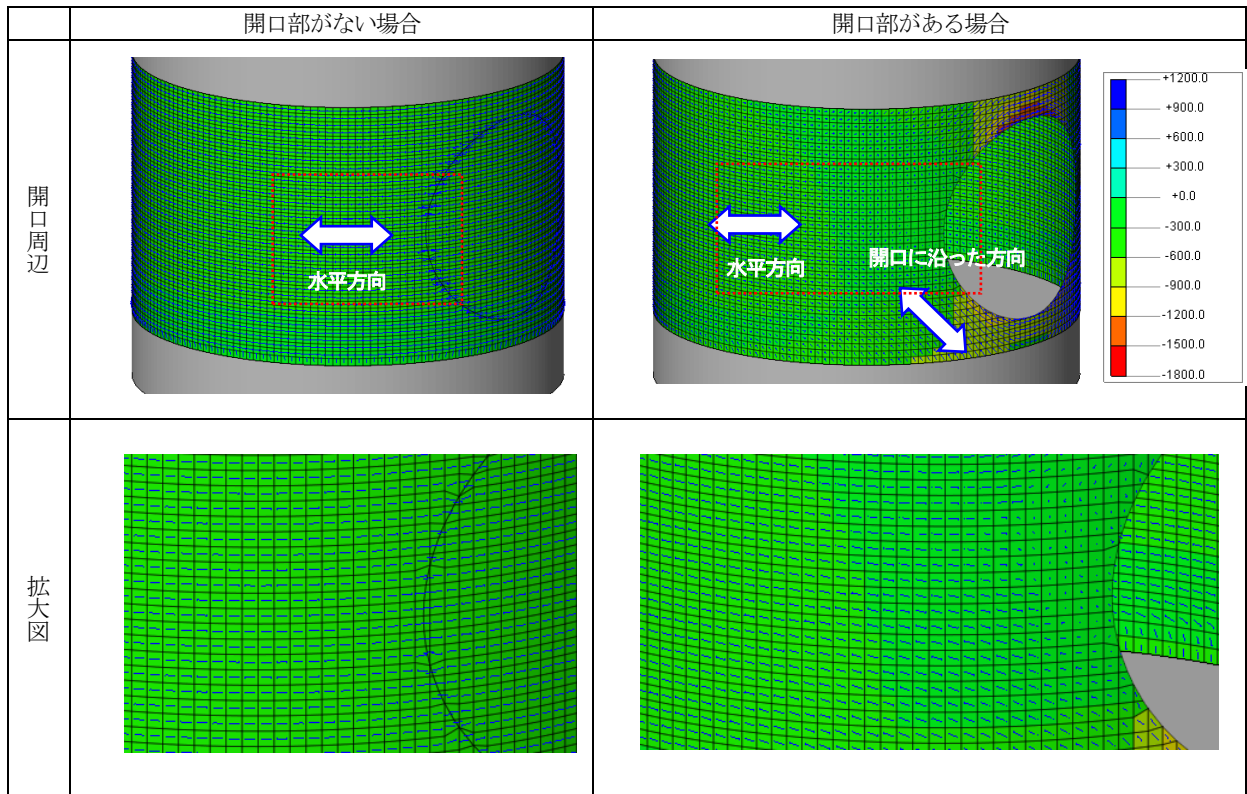


図-5 主応力コンター図およびベクトル図

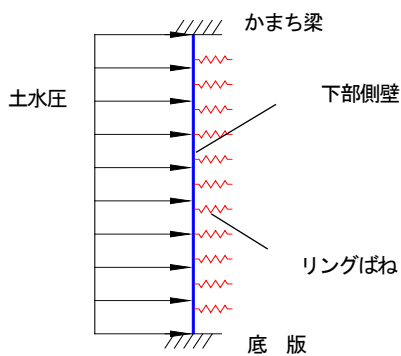


図-6 提案モデル1 解析モデル

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（以下、提案モデル1）。図-6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) 提案モデル

a) 提案モデル1について

筆者らはこれまでの研究¹⁾で、現行の2次元梁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。これは、図-5に示す3次元モデルのベクトル図より、開口部から離れた位置においては主応力ベクトルが水平方向であることから、開口部を有する欠円断面においてもリング効果が生じるものと考えた。

そこで本研究では、現行の2次元梁モデルに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

b) 提案モデル2について

上述の提案モデル1では現行の2次元梁モデルと同様に支持条件を固定端としていることから、端部の曲げモーメントが大きく算出される課題があった²⁾。

そこで、図-7に示すように、かまち梁や上部側壁を含む立坑全体を鉛直方向の梁でモデル化し、底板接合部の支持条件を回転ばねとする2次元の梁モデル（以下、提案モデル2）を考える。また、提案モデル2では、リング効果が期待できない開口部周辺においては、リングばねを考慮しないものとした。

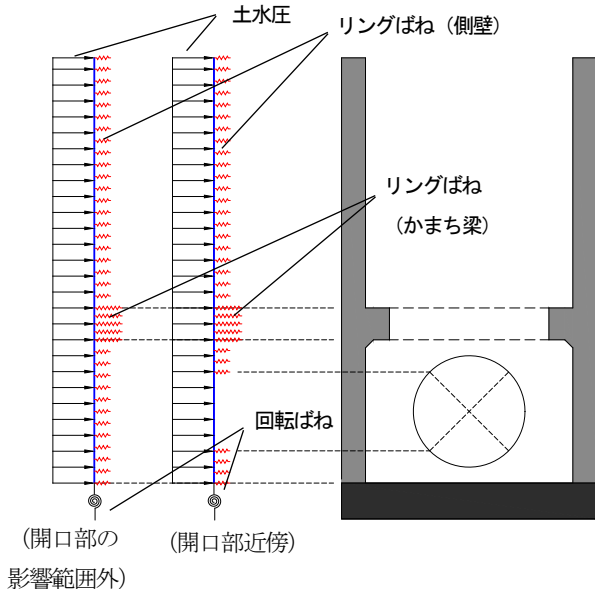


図-7 提案モデル2 解析モデル

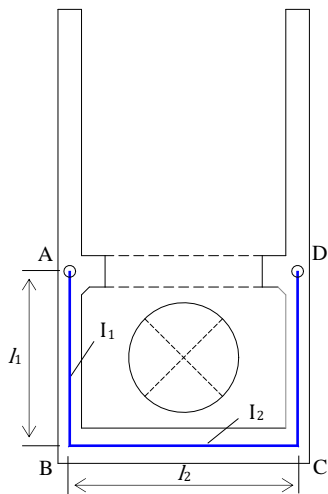


図-8 回転ばねの算出に用いたラーメンモデル

回転ばね定数は、円形立坑を図-8に示すような簡易なラーメン構造にモデル化し、たわみ角法を用いて算出した。算出式を以下に示す。

部材BAおよび部材BCに関するたわみ角式は下式で表され、

$$M_{BA} = 3EK_1 \cdot \theta_B + H_{BA}$$

$$M_{BC} = 2EK_2 \cdot (2\theta_B + \theta_C)$$

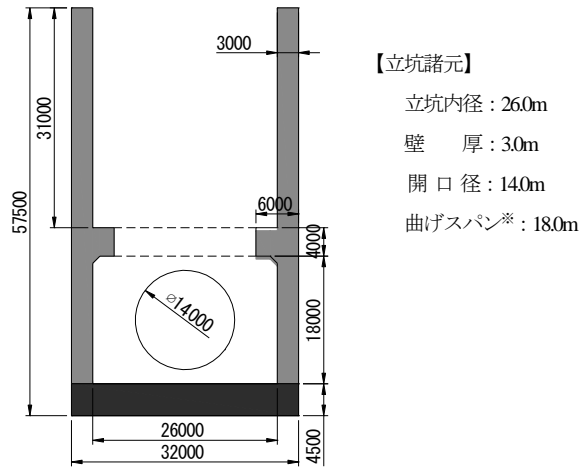
ここに、

- M_{BA}, M_{BC} : 材端モーメント
- θ_B, θ_C : たわみ角 ($\theta_C = -\theta_B$)
- E : 部材のヤング係数
- K_1, K_2 : 部材剛度 ($K = I/l$)
- H_{BA} : 一端固定他端単純支持の荷重項

次に、節点Bに関する節点方程式から

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$(3EK_1 + 2EK_2) \cdot \theta_B = -H_{BA}$$



【立坑諸元】
 立坑内径：26.0m
 壁厚：3.0m
 開口径：14.0m
 曲げスパン※：18.0m

※ かまち梁下端から底版上端までを曲げスパンとする

図-9 立坑寸法

表-1 解析条件

立坑形状	図-9 参照
トンネル用開口	図-9 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	100 kN/m^2 (全深度一定・偏圧なし)

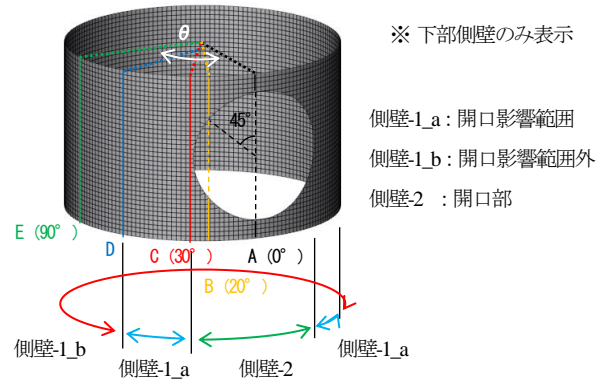


図-10 提案モデルの適用区分

と導かれる。

以上より、下部側壁の底版接合部における回転ばね定数は、下式により算出される。

$$K = \frac{3EI_1}{l_1} + \frac{2EI_2}{l_2}$$

3. 各種解析モデルの比較検討

(1) 解析条件

本稿では、図-9に示す道路トンネルや地下河川をクラスの規模を想定した円形立坑について提案モデルと3次元モデル、現行の2次元モデルとを比較することによって、提案モデルの適用性について検討を行う。また、本

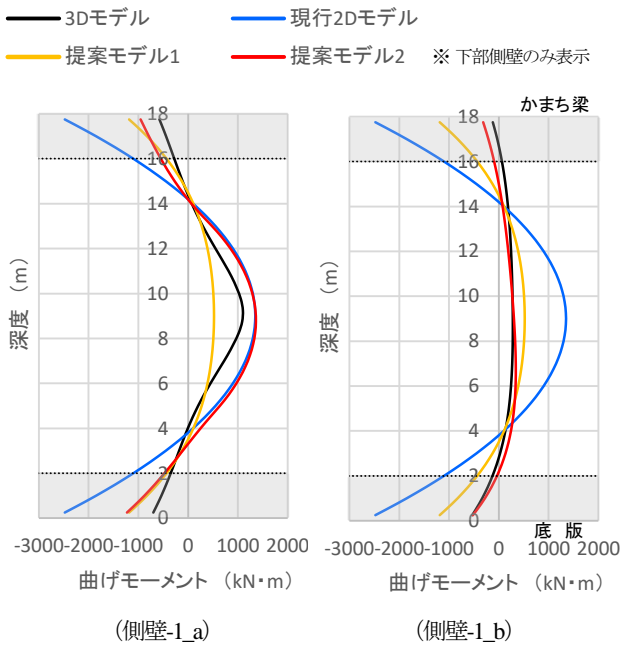


図-11 鉛直方向曲げモーメントの深度分布

表-2 スパン中央および端部の曲げモーメント

位置	解析モデル	曲げモーメント (kN・m)	
		側壁-1_a	側壁-1_b
かまち梁 下端	3Dモデル	-576	-120
	現行2Dモデル	-2478	-2478
	提案モデル1	-1186	-1186
	提案モデル2	-954	-313
スパン 中央	3Dモデル	1101	282
	現行2Dモデル	1347	1347
	提案モデル1	520	520
	提案モデル2	1363	342
底版 上端	3Dモデル	-699	-532
	現行2Dモデル	-2478	-2478
	提案モデル1	-1186	-1186
	提案モデル2	-1229	-519

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-1に示すように解析条件は簡単にした。

なお、本稿では図-10に示すように、側壁-1をリング効果が期待できない側壁-1_a、リング効果が期待できる側壁-1_bに区分し、C断面を側壁-1_aの代表断面に、E断面を側壁-1_bの代表断面とする。

(2) 比較結果

側壁-1における各種モデルの比較検討結果を以下に示す。図-11に側壁-1_aおよび側壁-1_bの鉛直方向曲げモーメントの深度方向分布図を、表-2にスパン中央および端部の曲げモーメントを示す。

3次元モデルと現行の2次元モデルおよび提案モデル

1を比べると、リング効果が期待できない開口部周辺の側壁-1_aにおいては、3次元モデルのスパン中央の曲げモーメントが1101kN・mで、現行の2次元モデルが1347kN・m、提案モデル1が520kN・mと、現行の2次元モデルの曲げモーメントが3次元モデルの曲げモーメントの122%程度であるのに対し、提案モデル1は3次元モデルの半分以下となっている。ただし、リング効果が期待できる側壁-1_bにおいては、3次元モデルの曲げモーメントが282kN・mと小さく算出されることから、現行の2次元モデルの曲げモーメントは3次元モデルの曲げモーメントの478%と両者の差は非常に大きくなるが、リングばねを設けることによって3次元モデルとの差を抑制することができる。

一方で、かまち梁下端および底版上部の梁端部においては、現行の2次元モデルおよび提案モデル1ともに、3次元モデルの曲げモーメントとの差が非常に大きいことが確認できる。

次に3次元モデルと提案モデル2を比べると、側壁-1_aの提案モデル2のスパン中央の曲げモーメントは1363kN・mと3次元モデルの124%となり、側壁-1_bにおいては、提案モデル2のスパン中央の曲げモーメントは342kN・mと3次元モデルの121%となる。また、梁端部においても、固定端としてモデル化する現行の2次元モデルや提案モデル1の曲げモーメントが3次元モデルと比べて非常に大きく算出されるのに対して、提案モデル2は、3次元モデルと同程度の値で算出されることが確認できる。

(3) 結果の考察

側壁-1_aのスパン中央の曲げモーメントは、提案モデル1を用いるより現行の2次元モデルを用いる方が、3次元モデルに近い結果となっている。これは開口部周辺においては、リング効果が期待できないためであると考えられる。よって、提案モデル1は開口部の影響を受けずリング効果が期待できる側壁-1_bにのみ適用できると考えられる。

また、現行の2次元モデルや提案モデル1は、支持条件を固定端としているため、3次元モデルと比べると端部の曲げモーメントが過大に算出される傾向にあるが、対策として回転ばねを用いることで、より経済的な設計になるものと考えられる。

9. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 開口部周辺の側壁-1_aは、リング効果が期待できないことから両端固定梁でモデル化する現行の2次元モ

デルに近い挙動となるが、開口部から離れた側壁-1_b はリング効果が期待できるため、提案モデル1や提案モデル2のようなリングばねを設けた梁に近い挙動となる。

- (2) リングばねのばね定数は、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の算出式を用いることができる。
- (3) 現行の2次元モデルや提案モデル1は、支持条件を固定端としているため、3次元モデルと比べると端部の曲げモーメントが過大に算出される傾向にあり、特に開口部から離れるにつれてその影響は大きくなる。
- (4) 上記の支持条件に関する課題に対しては、かまち梁や上部側壁を含む立坑全体を鉛直方向の梁でモデル化し、底版接合部の支持条件を回転ばねとする提案モデル2を用いることで、より経済的な設計を行うことが可能であると考えられる。
- (5) 回転ばね定数の算出においては、側壁と底版を簡易なラーメン構造にモデル化し、たわみ角法を用いて

算出することが可能と考えられる。

- (6) 円形立坑の開口部側壁は、かまち梁と底版に支持される側壁-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、より合理的な設計になるものと考えられる。

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, 2020年
- 2) 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開口部周辺のモデル化に関する一考察, トンネル工学報告集第31巻, 2021年
- 3) 土木学会: トンネル標準示方書 [開削工法]・同解説, 2015.

(2022. 8. 26 受付)

A STUDY ON MODELING OF JOINTS BETWEEN SIDE WALLS AND BOTTOM SLABS FOR CIRCULAR DEEP SHAFT

Yuduki OZAWA, Tetsuji YAMAGUCHI 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, the authors examined the validity of the 3D model and compared the 3D model with the current 2D vertical beam model to extract the problems of the current 2D model and to improve the 3D effect. A reasonable 2D model of the side wall of the opening was proposed. However, the proposed model has some problems in the support conditions, so this report reports the results of the examination of those problems.