

大型ニューマチックケーソンの吊桁構造の 合理化に関する検討

並木 智和¹・阿部 慎太郎²・矢野 勉³・小森谷 ふみ⁴・伊藤 浩平⁵・
岩波 基⁶

¹正会員 オリエンタル白石㈱東京支店技術部 (〒135-0061 東京都江東区豊洲五丁目 6-52)
E-mail: tomokazu.namiki@orsc.co.jp

²正会員 オリエンタル白石㈱東京支店技術部 (〒135-0061 東京都江東区豊洲五丁目 6-52)
E-mail: shintaro.abe@orsc.co.jp

³正会員 アイテックコンサルタント㈱技術営業部 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 1-7-18)
E-mail: komoriya@itc-consul.com

⁴アイテックコンサルタント㈱技術 1 部 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 1-7-18)
E-mail: komoriya@itc-consul.com

⁵学生会員 早稲田大学 理工学術院社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)
E-mail: E-mail: ito-kou@akane.waseda.jp

⁶正会員 早稲田大学 理工学術院社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)
E-mail: miwanami@waseda.jp

大型ニューマチックケーソンでは、吊桁の設計で仮壁が必要となることが多いが、この仮壁の設置撤去費の低減が課題となっている。従来の設計では、面外フレーム解析で吊桁断面を決めているが、合理的な構造とするには 3 次元 FEM 解析が有効と考えた¹⁾。本稿ではまず、梁・柱構造に仮壁を設置したモデルで、両解析結果に有意な差がないことを確認した。次に、3 次元 FEM 解析でケーソン中央の仮壁を削減したモデルにおいて、必要な耐荷力を有していることを確認するとともに、軽量化により吊桁の引張応力度が低減することが分かった。この結果、吊桁の設計において 3 次元 FEM 解析を活用することで、吊桁構造の合理化が期待できることが明らかになった。

Key Words: *pneumatic caisson, supporting beams, temporary wall, out-of-plane frame analysis, 3-D FEM analysis*

1. はじめに

欧米で開発されたニューマチックケーソン工法は、橋梁基礎の施工法として日本に導入され、比較的大型で深い基礎の施工法として発展した。その後、同工法は日本において、シールドトンネルの立坑やポンプ所等、内空を利用する地下構造物にも多く利用されてきた。特に、近年は、都市部における治水対策を目的とした、大規模で大深度のポンプ所や地下調節池の施工法として、周辺地盤や地下水への影響が小さい、工期が短いという特長を有するニューマチックケーソン工法の採用が増加している。

大型のニューマチックケーソンは、刃口と作業室天井スラブのみの構造では初期構築時に発生する応力を負担することができないことが多い。その場合は、次ロット

の側壁および隔壁の構築後にケーソンを沈下させるものとし、この時の荷重および支持条件に対して抵抗できる構造であるように設計する²⁾。この設計における格子構造モデルを吊桁と称している。

吊桁の設計方法は、施工中のレインボーブリッジのケーソンに作用する刃口反力の計測値³⁾をもとに、面外フレーム解析（以下、フレーム解析）による方法が提案され、平成 11 年 10 月発行の「大型地下構造物ケーソン設計マニュアル」に記載された。以来、ポンプ所、地下調節池、立坑、道路トンネル、建築施設等の 100 基以上の大型ケーソン（平面積 500m² 以上）が、同設計方法により設計されている。図-1 にフレーム解析の概要を示す。

吊桁の一部を構成する隔壁には完成後の構造では不要となる仮壁があり、この設置撤去費の低減が課題となっている。さらに、フレーム解析では作業室天井スラブは

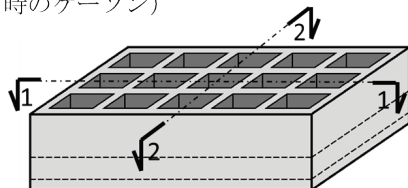
荷重として考慮するが、フレーム間の作業室天井スラブの耐荷力を考慮していない（図-2）。そこで、本報文では、大型ケーソンの仮壁を合理的な配置とするために、ソリッド要素を用いた3次元FEM解析（以下、FEM解析）を用いて検討した結果によって、仮壁の合理的な配置の考え方を示すものである。なお、板要素を用いたFEM解析とも比較し、その検討方法を言及する。

2. 検討条件

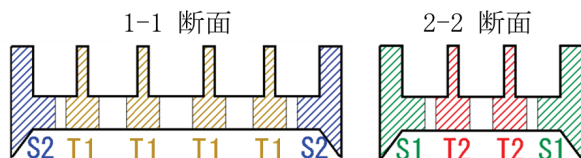
(1) 解析方針

従来の吊桁の設計では、各吊桁の断面が一定となるように仮壁の断面を設定し、フレーム解析により必要な補強鋼材を配置しているが、一部の吊桁部材に発生応力に余裕がある部材が生じる。合理的な断面とするためには、発生断面力に応じて仮壁の断面を変化させる必要がある。

（初期沈下時のケーソン）



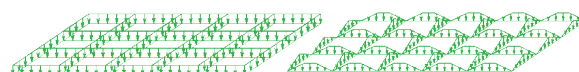
（格子構造モデルの吊桁断面）



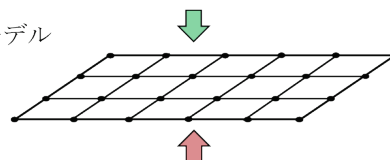
S1, S2：刃口，作業室天井スラブ，側壁で構成する吊桁構造
T1, T2：作業室天井スラブ，隔壁で構成する吊桁構造

（荷重条件）

下向きの荷重：自重（壁・スラブ・梁・柱）



フレームモデル



上向きの荷重：地盤反力

短辺：長辺の支持反力比を1：3および3：1

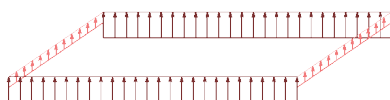


図-1 ニューマチックケーソン初期構築時のフレーム解析の概要

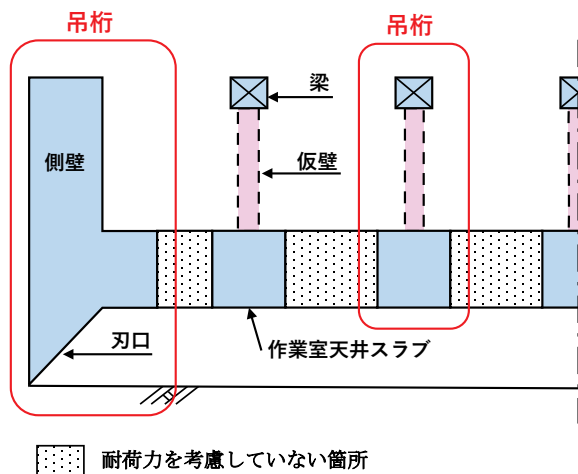


図-2 初期構築時の吊桁断面図

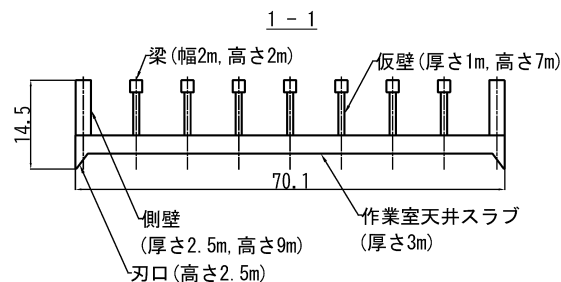
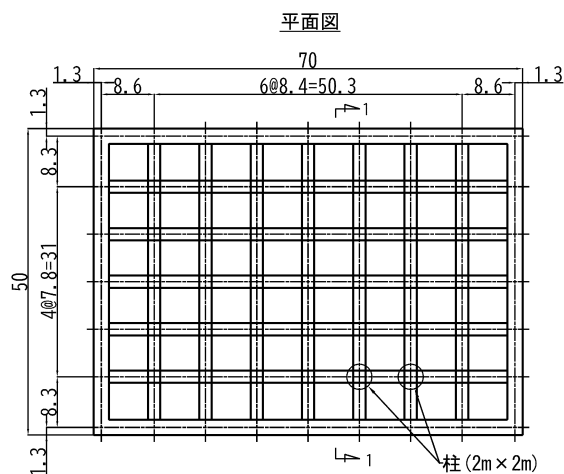


図-3 初期構築時の構造

しかし、フレーム解析では解析作業が極めて煩雑となるため、実務上は難しい。そこで、FEM 解析により吊桁断面の経済的な配置を検討することとした。また、フレーム解析では作業室天井スラブの耐荷力を無視している部分があるが、FEM 解析では全部を評価することができるのでその効果についても検討する。

(2) 解析対象寸法

検討対象として、図-3 に示すように、梁・柱構造に仮壁を配置した平面寸法 70m×50m、初期構築高 14.5m の地下構造物をニューマチックケーソン工法にて建設する場合の構造とした。なお、検討する施工状況は、刃口と作業室天井スラブ、側壁および梁、柱、仮壁を構築した初期構築時である。

(3) 解析条件

ケーソンの構造に用いるコンクリートは設計基準強度 30N/mm²、鉄筋に SD345、作業室天井スラブ下面に厚さ 16mm の鋼板 SM490YA をコンクリートと一体化させて用いた。表-1 に材料諸元を示す。

表-1 材料諸元

コンクリート	
設計基準強度	30 N/mm ²
ヤング係数	28,000 N/mm ²
ポアソン比	0.2
単位体積重量	24.5 kN/m ³
曲げ圧縮強度	15 N/mm ²
鉄筋 SD345	
ヤング係数	200,000 N/mm ²
引張応力度	300 N/mm ²
鋼板 SM490YA	
ヤング係数	200,000 N/mm ²
引張応力度	283.5 N/mm ²
地盤	
N値	20
弾性係数	14,000 kN/m ³

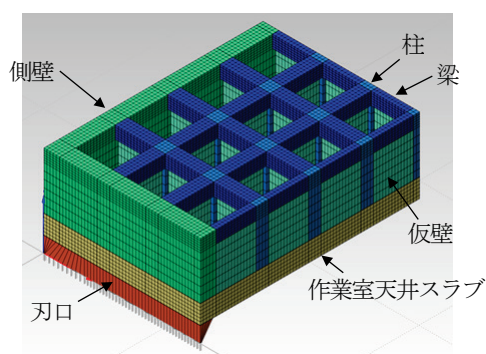


図-4 全補強ケース

(4) 荷重条件

荷重としては、自重と地盤反力のみを考慮する。フレーム解析では、地盤反力を刃先のみに作用させる。従来の大型ケーソンの設計法²⁾に従い、短辺と長辺の支持反力度の比が 1:3 および 3:1 となるように短辺と長辺の刃先に、それぞれの地盤反力度が等分布で上向きの荷重を作用させた。

FEM 解析では、刃口先端の辺全体に、鉛直ばね支承で支持させ、このばね値の短辺と長辺の比を 1:3 および 3:1 とすることで、地盤反力の分布を FEM 解析で表現した。

(5) 解析モデル

図-4 に示すように全ての作業室天井スラブおよび側壁、梁、柱の間に仮壁を設けて補強するケースを以後、全補強ケースとし、解析モデル図を図-5 に示す。FEM 解析では対称性から 1/4 モデルを採用した。

3. フレーム解析と FEM 解析における結果の比較

フレーム解析においても FEM 解析においても図-6 に a, b, c, d で示したケーソン中心の長辺部で最大の曲げモーメントとせん断力が生じた。

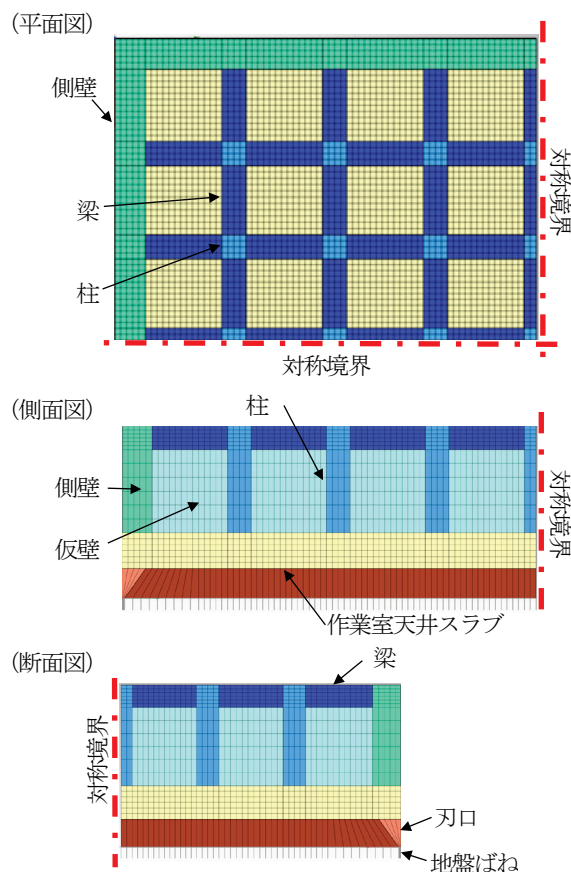


図-5 解析モデル図

図-7 と図-8 にフレーム解析と FEM 解析の結果を比較して示す。表-2 に図-7 の曲げモーメントに対する鋼材の最大引張応力度を、表-3 に図-8 のせん断力をそれぞれ許容値と比較して示す。

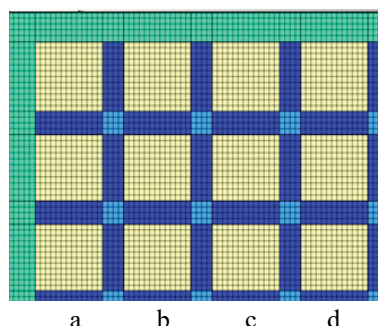


図-6 平面位置図

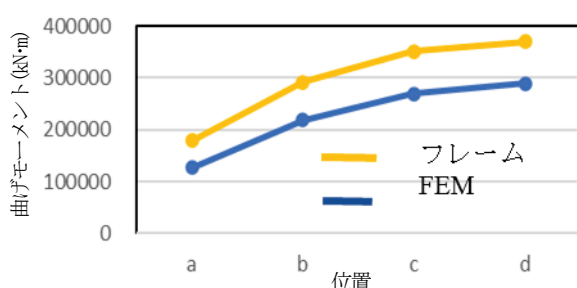


図-7 曲げモーメント解析結果

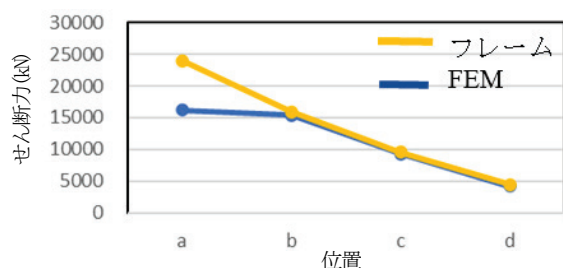


図-8 せん断力解析結果

表-2 曲げモーメントに対する鋼材最大引張応力度

	単位	a	b	c	d
フレーム	N/mm ²	133	215	259	273
FEM	N/mm ²	94	161	199	214
許容値	N/mm ²	300			

表-3 せん断力

	単位	a	b	c	d
フレーム	kN	16,193	15,401	9,283	4,235
FEM	kN	24,009	15,896	9,555	4,464
許容値	kN	12,169,500			

曲げモーメントについては、図-7 と表-2 に示すように、c、d 断面の中央部で、FEM 解析によって作業室天井スラブの耐力を考慮することで曲げモーメントに対する耐力に余裕がある可能性が考えられる。また、図-8 と表-3 に示すように a と b の端部付近では、せん断力が大きいため、壁高さが高い仮壁では十分なせん断耐力を有するが、作業室天井スラブだけではせん断力が不足する可能性がある。

4. 仮壁を減らした補強案

表-2 と表 3 から、図-9 に示す側壁のすぐ内側の仮壁を全て設置した補強案 1 と、図-10 に示す補強案 1 の側壁に平行な仮壁を省略する補強案 2、そして、図-11 に示す中央部に十文字で仮壁を設置する補強案 3 を考えた。

この 3 案について、ケーソン中心部の長辺での作業室天井スラブに生じる曲げモーメントを FEM 解析で算出し、鋼材に生じる最大応力度を表-4 に示す。

以上の結果から、3 種類の補強案とも仮壁で補強することによって初期構築時に必要な耐力を有するものと考えられる。全補強ケースの図-7 および表-2 と仮壁を減らした補強案の表-4 とを比較すると、補強案 1 および補強案 2 の応力度が低減していることが分かる。これは、仮壁を減らした分、躯体自重が軽量になり発生応力が低減したものと考えられる。

また、全補強ケースの仮壁の枚数 82 に対して、補強案 1 では 44 枚、補強案 2 では 24 枚、補強案 3 では 14 となる。補強案 3 では全補強ケースより 68 枚も仮壁を減らすことができる可能性がある。しかし、力学的にも詳細な検討が必要であり、さらに、この結果だけで仮壁による補強方法を定めることには問題があるものと考えられる。

5. 板要素の適用について

(1) 解析モデル

前述の通り吊桁の検討には、一般的にフレーム解析が用いられ、最近は大規模なケーソンで 3 次元ソリッド要素を用いた FEM 解析の採用が検討されている段階である。しかし、両解析ともデータの作成や結果の整理が煩雑であり、FEM 解析では解析時間も数時間に及ぶ。

そこで、ここでは、解析が比較的簡易で、結果の整理も簡単かつ計算時間も短い板要素による FEM 解析の適用性について検討する。板要素による FEM 解析は、仮壁を全て設置した全補強ケースについて計算を行い、ソリッド要素を用いた FEM 解析と比較する。なお、板要

素は壁の中心でモデル化し、剛域は設けなかった。板要素による解析モデルを図-12に示す。図-6の位置a, b, c, dにおいて、ソリッド要素と板要素それぞれのFEM解析結果による曲げモーメントの比較を図-13に示す。

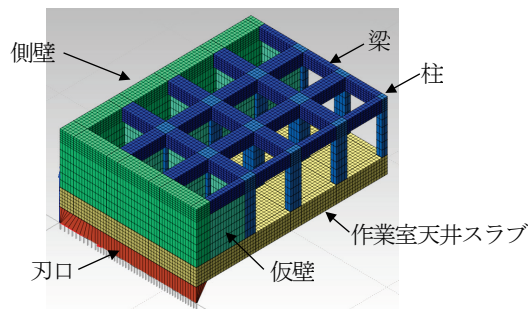


図-9 補強案1

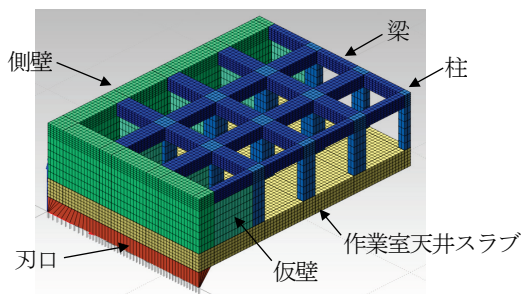


図-10 補強案2

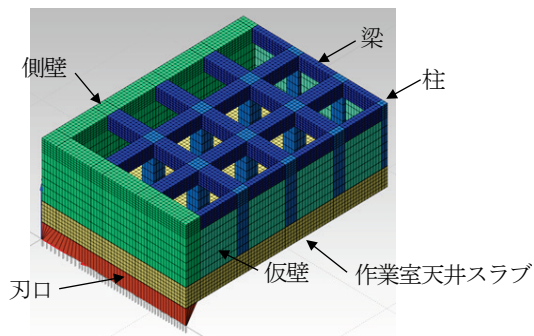


図-11 補強案3

表-4 作業室天井スラブの曲げモーメントと応力度

位置	b	c	d
ケース			
補強案1	13,070	17,735	15,616
	56.0	76.0	66.9
補強案2	12,409	15,657	13,377
	53.2	67.1	57.3
補強案3	258,867	315,448	310,928
	191.3	233.1	229.8

※1 上段は曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、下段は最大応力度 (N/mm^2)

※2 鉄筋の許容引張応力度 $300\text{N}/\text{mm}^2$

(2) ソリッド要素と板要素におけるFEM解析の比較

図-13 から分かるように、一般的なソリッド要素の結果が板要素の結果と比べてやや大きな値となっているものの、ほぼ一致する結果となっており設計上では評価できるものとする。

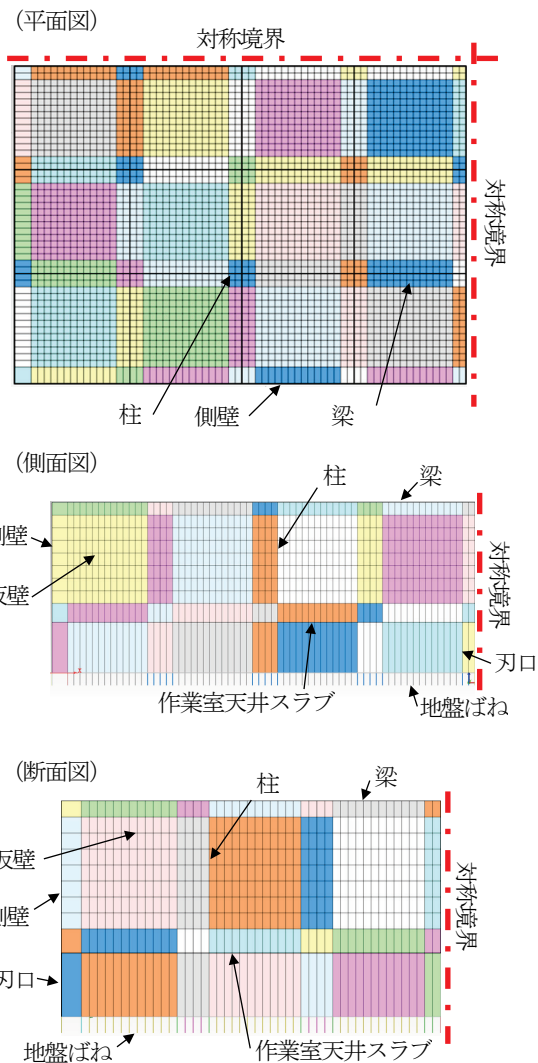


図-12 板要素の解析モデル図

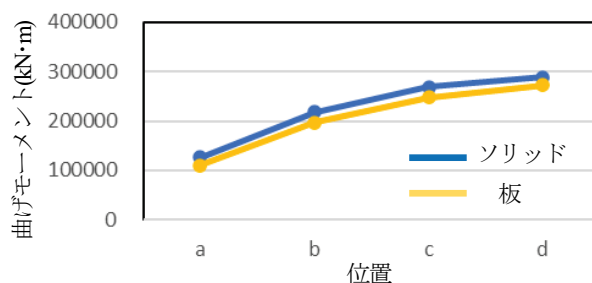


図-13 ソリッド要素と板要素による解析結果の比較

これらの差異については、ソリッド要素が実際の部材寸法でモデル化しているのに対し、板要素による解析が側壁を板としてモデル化する際に壁の中心としたため、作業室天井スラブの長辺も短辺も長さが壁厚分短くなったことや、柱を2方向の板で評価したため、実際よりも軸剛性も曲げ剛性も大きく評価していることなどが影響しているものと考えられる。

したがって、板要素による FEM 解析は、今後、複数のケーソンのプロジェクトについても同様の検討を加えて、モデル化の工夫を行うことで、ソリッド要素による FEM 解析と一致する結果が得られると考える。それにより、解析の実施と結果の整理が煩雑さなく算出することができるようになることや、多くの仮壁の配置パターンについて検討が可能になることから、より合理的な吊桁の設計を可能とするものである。

6. おわりに

本報告では、大規模なニューマチックの初期構築時に問題となっている吊桁の設計について、解析方法の面から検討を加えた。

まず、フレーム解析と FEM 解析との比較、次に、仮壁の合理的な配置、そして、板要素を用いた3次元FEM解析の適用性についてである。その結果、以下の知見が得られる。

曲げモーメントについては、フレーム解析の値の方が、FEM 解析より明らかに大きな結果となった。また、せん断力については、構造として耐荷力を十分に有しているため、どちらの解析でも問題にならない。そのため、仮壁の配置方法によっては、仮壁を省略しても作業室天

井スラブの曲げモーメントに対する耐荷力が十分となることが分かった。

合理的な仮壁の配置については、側壁に直交して接する仮壁のみを配置することで十分な耐荷力が得られる結果となった。この結果、全補強ケースで 82 枚の仮壁が必要となる従来の配置を 24 枚に合理化できる。なお、ケーソン中心部に 14 枚仮壁を配置することでも今回の検討では十分な耐荷力を有する結果となったが、より詳細な検討が必要である。

板要素による 3 次元 FEM 解析は、今後のさらなる検討が必要であるが、ソリッド要素による 3 次元 FEM 解析とほぼ一致する解析結果が得られることが判明した。さらに、解析の実施と結果の整理における煩雑さがなく算出することができるようになる。したがって、この解析をケーソンの吊桁の設計に適用することは有益である。

今後、実際のプロジェクトの吊桁の設計において、ソリッド要素による3次元FEM解析と板要素による3次元FEM解析を実施して両解析法の適正について検討を続けることを予定している。

参考文献

- 1) 並木智和, 阿部慎太郎, 矢野勉, 小森谷ふみ, 岩波基: 大型ニューマチックケーソンの吊桁の合理化に関する検討, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021.9.
- 2) 日本圧気技術協会: 大型・大深度地下構造物ケーソン設計マニュアル, 2020.3
- 3) 吉川信男, 天野弘明, 阿部慎太郎, 平野工治: 大型ニューマチックケーソンに作用する外力の施工時挙動解析, 榊白石, 第 8 回技術発表会報文集, 1991.

(2021. 8. 6 受付)

A STUDY OF REASONABLE INTENSIFICATION FOR LARGE PNEUMATIC CAISSONS

Tomokazu NAMIKI, Shintaro ABE, Tsutomu YANO, Fumi KOMORIYA, Kohei ITO
and Motoi IWANAMI

A temporary wall is required for construction of a large pneumatic caisson. And this design has been done by the result of out-of-plane frame analysis. However, we thought that a more rational design could be made based on the results of 3D FEM analysis. In this paper, we first confirmed that there was no significant difference between the two analysis results. Next, according to the 3D FEM analysis, the temporary wall could be significantly reduced. Then, we clarified that the analysis of board elements is an effective method.