

# 大深度円形立坑における ニューマチックケーソン工法の課題抽出と プレキャスト化についての検討

宮崎 雄介<sup>1</sup>・岩波 基<sup>2</sup>・山口 哲司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 早稲田大学 創造理工学研究科建設工学専攻  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 西早稲田キャンパス 51 号館 1608 室)  
E-mail: k0r4373kur3ma@ruri.waseda.jp

<sup>2</sup>正会員 早稲田大学教授 創造理工学研究科建設工学専攻  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 西早稲田キャンパス 51 号館 1608 室)  
E-mail: miwanami@waseda.jp

<sup>3</sup>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 2-1)  
E-mail:teyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp.

大深度シールド工事用立坑におけるニューマチックケーソン工法では温度応力を低減するために、低熱高炉セメントを用いることがあるが、設計段階の計画では、早強ポルトランドセメントを用いた一般的なニューマチックケーソン工法と同様に脱型を3日で行っている。このような若材齢では強度が十分に発現していない可能性があり、施工時荷重によって、コンクリートへの悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、本論文では若材齢における低熱高炉セメントの強度発現と施工時荷重による影響について検討した結果、品質を確認することが困難であることが判明した。さらに、ニューマチックケーソンのプレキャスト化の可能性について、試計算結果を示す。

**Key Words:** *pneumatic caisson method, MKC, deep shaft*

## 1. はじめに

近年、リニア新幹線や集中豪雨に備えた地下調節池など、大深度地下の需要に伴い、ニューマチックケーソン工法を採用する大深度立坑が増加している。大深度立坑におけるニューマチックケーソン工法では、温度応力による貫通ひび割れを避けるために低熱高炉セメントを用いていることあるが、早強ポルトランドセメントを用いた場合においても、一般的なニューマチックケーソン工法と同様に材齢3日で脱型を行うっている。このような若材齢ではMKCが十分に強度を発現していない可能性があり、その状態で地盤との摩擦、工事用機材の荷重、主働土圧の施工時荷重、工事用重機による衝突荷重によって、コンクリートに悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、本論文では大深度シールド工事用立坑におけるニューマチックケーソン工法の材齢3日での強度発現と、施工時荷重及び衝突荷重によるコンクリートの破壊の可能性について検討する。また、立坑用ニューマチックケーソンをプレキャストすることによって品質をより高くす

ることの適正について、本報告ではセグメントの継手部分における試計算の断面力結果についてを分析する。

## 2. 構造概要

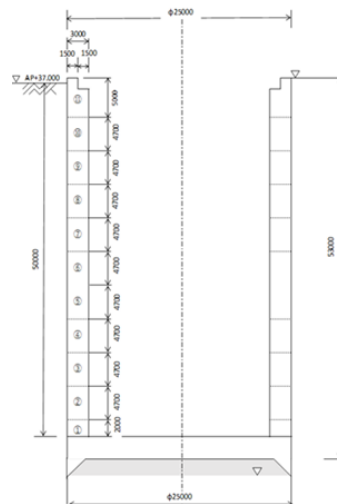


図-1 一般構造図

図-1に示すように、外径25m、掘削深さ50m、底版厚さ3mで側壁厚さが3m側壁のニューマチックケーソンについて試算を行う。なお、11リフトに分割して打設する。

ケーソンの脱型の目安である圧縮強度  $10\text{kN/mm}^2$  を下回るリフトがあることが分かる。

### 3. MKCの強度発現に関する検討

#### (1) 解析モデル<sup>1),2),3)</sup>

図-2の3次元FEMの1/4モデルについてコンクリートの温度解析を行い、積算温度から各箇所MKCの強度発現を推定する。

#### (2) 解析条件

外気温は東京観測所における日平均気温データ(1971~2000)を参考にして設定する。

MKCの強度変形特性を表-1、断熱温度上昇特性を表-2、地盤の物理特性を表-3、温度伝達条件を表-4に示す。

#### (3) 解析結果

MKCを用いたケーソンの材齢3日時における各リフトの積算材齢を算定したところ、表面では温度が低いために積算材齢が小さい値となった。リフトごとの最小積算材齢から推定した圧縮強度を図-3に示す。図-3より、

### 4. 施工時荷重に関する検討

本検討では、温度解析により得た積算材齢の結果を用いて、材齢3日における強度が最も低かったリフト5と十分に強度を発現している既設リフトをモデル化し、リフト5も比較的強度の高いケーソンの内部と強度の低いケーソンの表面である外部の物性値をそれぞれ設定し、各施工時荷重を載荷する。

衝突荷重としてはバックホウやダンプカー等の工事用重機が衝突した場合の荷重について、材齢3日、4日、

表-2 断熱温度上昇特性

記号	セメントの種類	打ち込みの温度	T=K(1-exp(-at))			
			K=aC+b		a=gC+h	
			a	b	g	h
MKC	低熱高炉セメント	10	0.071	16.2	0.0021	-0.359
		20	0.07	16.7	0.0026	-0.259
		30	0.069	17.1	0.003	-0.148

表-3 地盤の物理特性

項目	条件	備考
密度 $\rho$	1850kg/m <sup>3</sup>	設計用土質定数全地層の 平均値
弾性係数 E	120N/mm <sup>2</sup>	
ポアソン比 $\nu$	0.4	「ひび割れ制御指針 2008」に準拠
比熱	1.40kJ/kg°C	
熱伝導率	1.7W/m°C	

表-4 温度熱伝達条件

境界条件	熱伝達率(W/m <sup>2</sup> °C)	
外気	14	
コンクリート上面	14 (散水養生)	
コンクリート側面	養生中	8 (合板型枠 (期間: 3日間))
	養生後	14

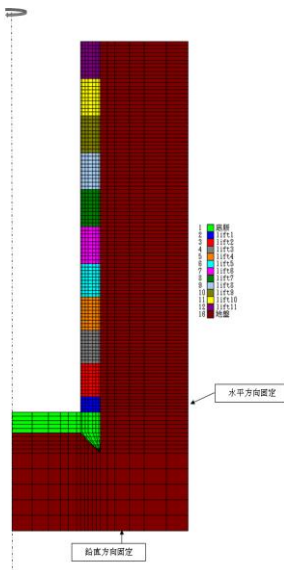


図-2 温度解析モデル

表-1 強度変形特性

項目	条件				備考
	a	b	sf	d	
圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	10.1	0.781	0.500	1.51	ひび割れ制御指針 2008より
$f'_c(te) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - sf)} \cdot d \cdot f'_{ck}$					
引張強度 N/mm <sup>2</sup>	$f_t(te) = 0.265 \cdot f'_c(te)^{0.715}$				MKC技術資料より 近似式を設定
有効ヤング係数 Ee N/mm <sup>2</sup>	$E_c(te) = 5300 \cdot f'_c(te)^{0.525}$				MKC技術資料より 近似式を設定
ポアソン比	0.2				コンクリート標準示 方書
線膨張係数	$10 \times 10^{-6}/\text{°C}$				2007年制定より

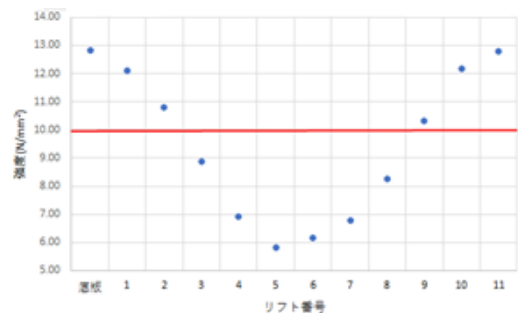


図-3 材齢3日における各リフトの圧縮強度

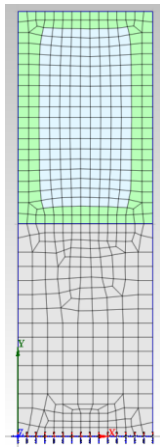


図-4 施工時荷重応力解析モデル

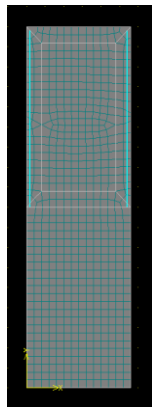


図-5 施工時荷重応力解析モデル(衝突荷重)

6日の3ケースについて衝突荷重を載荷する。なお、平成24年度道路橋示方書<sup>7)</sup>より衝突荷重を静的な集中荷重として設計構造解析に用いられる1000kNとした。

### (1) 解析モデル

図-4、図-5のモデルを用いて、施工時を想定した荷重に関する非線形応力解析を行った。施工時荷重としては、ケーソンと地盤間に発生する摩擦力、コンクリート構築に用いる鉄筋を一時的にケーソン上に置いたときの荷重、ケーソン沈設時に側面へ働く主働土圧、そして衝突荷重を想定して応力解析を実施した。

### (2) 解析条件

ケーソンと地盤間に発生する摩擦力は、圧気協会のニューマチックケーソン工法設計施工マニュアル<sup>4)</sup>より14kN/m<sup>3</sup>とする。また、鉛直主鉄筋は直径32mmとして集中荷重とした。衝突荷重は、平成24年度道路橋示方書より静的な集中荷重として設計構造解析に用いられる1000kN<sup>9)</sup>とした。衝突荷重の載荷位置は若材齢のリフトの高さ2mの位置に載荷する。

表-6 摩擦力の検討

材齢	最大 圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	圧縮 破壊応力 (kN/m <sup>2</sup> )	最大 引張応力 (kN/m <sup>2</sup> )	引張 破壊応力 (kN/m <sup>2</sup> )	最大 せん断応力 (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 破壊応力 (kN/m <sup>2</sup> )
3日	5.41	3635	23.2	667	7.88	333

表-7 鉄筋による荷重の検討

鉄筋	最大 圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	圧縮 強度 (kN/m <sup>2</sup> )	最大 引張応力 (kN/m <sup>2</sup> )	引張 強度 (kN/m <sup>2</sup> )	最大 せん断応力 (kN/m <sup>2</sup> )	せん断 強度 (kN/m <sup>2</sup> )
D29	147	3635	196	667	45.3	333
D29 (5本)	586		978		226	
D51	465		617		142	

引張破壊強度およびせん断破壊強度は以下の式より算出し、表-1にそれを代入することで圧縮破壊強度を求める。

$$\text{引張破壊強度 } f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3}$$

$$\text{せん断破壊強度 } f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3} \cdot 1/2$$

ここに、 $f_{tk}$ :破壊強度(N/mm<sup>2</sup>),

$f'_{ck}$ :各材齢時の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

### (3) 解析結果

#### a) ケーソンと地盤間に発生する摩擦力

ニューマチックケーソン工法ではフリクションカットに砂を充填する際にケーソンとの間に摩擦力が発生する。表-6に材齢3日における最大応力と破壊強度の結果を示す。この結果から、コンクリートは破壊に至らないとわかる。

#### b) 型枠に用いる鉄筋の荷重<sup>9)</sup>

鉄筋D29を1本、D29を5本、D51を1本、静的に載荷した場合について検討を行った。表-7に材齢3日における最大応力と破壊強度の結果を示す。この結果から、D29を5本載荷したとき最大引張応力978kN/mm<sup>2</sup>が生じ引張破壊応力667kN/mm<sup>2</sup>を上回るため、コンクリートにひび割れが生じて品質に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。

#### c) ケーソンに働く主働土圧

平成24年度道路橋示方書<sup>5)</sup>ではケーソンを沈設した際に発生する主働土圧について検討することとなっている。周辺地盤は砂質土と仮定し、土の単位体積重量を16kN/m<sup>3</sup>、主働土圧係数を1.0とした。表-8に各材齢における最大応力と破壊強度の結果を示す。この結果から、全ての最大応力が破壊強度よりも十分小さいためコンクリートの品質に悪影響がないと考えられる。

#### d) 衝突荷重

各材齢における結果を図-6, 図-7, 図-8に示す。これらの図からわかるように、材齢3日では衝突荷重の載荷位置を含めて幅広くひび割れが発生している。また材齢が大きくなるほどひび割れが少なくなっているが、圧縮強度が10kN/mm<sup>2</sup>を満たしているにも関わらず、ひび割れが発生していることが分かる。

また、表-9に各材齢における最大圧縮応力を示す。圧縮強度が大きいほどひび割れが生じにくいことから衝突荷重が分散せずに集中している箇所が存在することから、圧縮応力も大きくなると考える。

### 5. ニューマチックケーソンのプレキャスト化についての検討

MKCを採用したニューマチックケーソンのコンクリートは、4章の解析結果から、若材齢時に施工時荷重が作用することで局部的に強度不足が生じて、品質が低下する可能性がある。特に、MKCは地域や工場で品質にばらつきがある可能性がある。そのため、ニューマチックケーソンのコンクリート品質を保ちつつ、工期短縮と施工性を維持するためには、プレキャスト部材を側壁に採用することが考えられる。

そこで、本報告では、供用時に大深度立坑のニューマチックケーソンの本体と継手に生じる断面力を算出して、採用の可能性の有無について検討を行う。

#### (1) 解析モデル

図-9のリングモデルをノンテンション地盤ばねで支

表-8 主働土圧の検討

材齢	最大	圧縮	最大	引張	最大	せん断
	圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	破壊強度 (kN/m <sup>2</sup> )	引張応力 (kN/m <sup>2</sup> )	破壊強度 (kN/m <sup>2</sup> )	せん断応力 (kN/m <sup>2</sup> )	破壊強度 (kN/m <sup>2</sup> )
4日	20.2	4940	1.33	830	4.9	415
8日	41.3	8786	17	1251	20.1	626
12日	97	13371	50.8	1507	37.9	754
16日	202	13269	17.4	1683	68.6	841

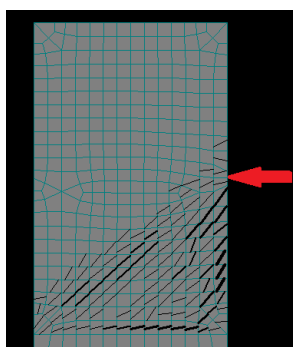


図-6 ひび割れ図材齢3日

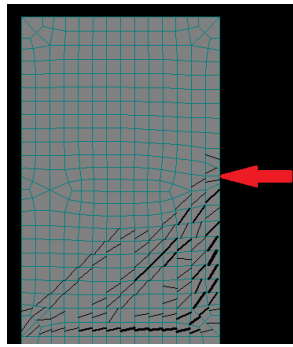


図-7 ひび割れ図材齢4日

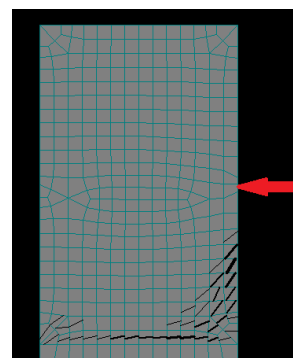


図-8 ひび割れ図材齢6日

持した場合のリングに設計土水圧を作用させて断面力を算出する。

#### (2) 解析条件

本検討において用いた立坑は外径36.8m、掘削深さ90m、側壁厚さ2.4mとする。

土質条件を表-10に示す。なお、静止土圧強度は、15m以深一定とし、偏圧は鉄道構造物等設計標準<sup>7)</sup>より、土圧+水圧の10%と設定する。

また、コンクリートの単位体積重量を24kN/m<sup>3</sup>とし、コンクリート同士の摩擦係数を0.3とする

セグメント諸元を表-11に示す。

リングのコンクリート同士の摩擦係数0.3とし、摩擦力は

$$6.99 \times 10^3 (\text{kN})$$

と設定した。

#### (3) 解析結果

セグメント継手における断面力とリング間せん断力の最大値は表-12の通りである。

##### (a) セグメント継手

解析結果より、偏心量は

$$e = 0.026 (\text{m})$$

であり、全断面圧縮となり、最大圧縮応力度も0.4N/mm<sup>2</sup>となった。したがって、セグメント継手について、供用時に大きな耐荷力は必要はないと考えられる。

表-9 各材齢における最大圧縮応力

材齢 (日)	3	4	6
最大圧縮応力 (N/mm <sup>2</sup> )	4.97	6.07	6.20

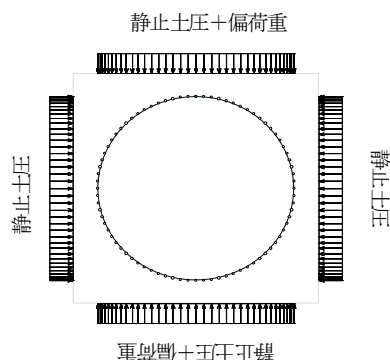


図-9 断面解析モデル

表-10 土質条件

	土質	水中単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	深度 (m)	静止土圧 (kN/m <sup>2</sup> )
第1層	砂質土	10.00	9.53	95.30
第2層	粘性土	10.00	12.43	124.30
第3層	砂質土	8.00	15.23	144.86

### (b) リング継手

リング間せん断力は摩擦力と同程度であったことからリング継手に何らかの耐荷力を有するものが必要であると考えられる。

## 6. 考察

以上の解析結果から、ニューマチックケーソンの脱型時期に必要なとされている圧縮強度 10N/mm<sup>2</sup> が、MKC を使用すると材齢 3 日で発現しない可能性があることが確認された。

また、ニューマチックケーソン工法において施工時に作用する鉄筋などの資材を側壁に置いた場合の荷重や、や工事用重機による衝突荷重によって、コンクリートにひび割れなどの悪影響が生じる可能性が高い。したがって、若材齢の発現強度を現場で確認する方法を開発する必要があるとともに、大深度シールド工事用立坑に MKC を採用する場合には養生期間を十分にとること、資材の荷重を側壁にかけないこととして当然ながら重機を衝突させないことが必要である。

コンクリートの品質管理が今後、技術者と職人の不足から困難になる可能性がある。そこで、ニューマチックケーソンのプレキャスト化についても検討した。その結果、セグメント継手には大きな荷重が作用しない可能性

表-11 セグメントの諸元

外径(m)	32
セグメント分割数n	20
幅b(m)	2.4
厚さh(m)	2
ヤング率E (kN/m <sup>2</sup> )	3.14×10 <sup>7</sup>
回転ばね定数 (kN・m/rad)	5.68×10 <sup>5</sup>

表-12 断面力照査結果

セグメント継手		リング間せん断力
軸力 (kN)	曲げモーメント (kN・m)	せん断力最大値 (kN)
1.38×10 <sup>3</sup>	2.02×10 <sup>2</sup>	6.94×10 <sup>3</sup>

が高いが、リング継手には十分な耐荷力が求められる可能性があることが分かった。

## 7. おわりに

本研究により得られた知見と課題について以下にまとめる。

- ・ニューマチックケーソン工法を採用し、さらに、低熱高炉セメントを使用した際、施工時荷重によってひび割れが生じ、立坑側壁の品質が低下する場合があります。そのため、ニューマチックケーソンの施工時に鉄筋の束を側壁に置く場合には十分配慮が必要であり、さらに、工事用重機の衝突などがあってはならない。
- ・今回の想定した供用時にはプレキャストのセグメント継手には大きな強度を必要としないが、リング継手に十分な耐荷力が期待できる構造にする必要がある。

## 参考文献

- 1) 中出剛, 岩波基: ニューマチックケーソン工法を用いた大深度立坑のコンクリート品質に関する研究, 2017.
- 2) 株式会社デイ・シー セメント事業部: 低発熱・収縮抑制型高炉セメント(MKC TYPE III)技術資料, 2016.
- 3) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針, 2008.
- 4) 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, 2016.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 I 共通編 III コンクリート橋編, 2012.版, 2018.

- 6) 新日鐵住金：建設用資材ハンドブック 2018 年 4 月改訂
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001.

(2019. 8. 9 受付)

## EXAMINATION OF PROBLEM EXTRACTION AND PRECASTING OF PNEUMATIC CAISSON METHOD IN DEEP CIRCULAR SHAFT

Yusuke MIYAZAKI, Motoi IWANAMI and Tetsuji YAMAGUCHI

In the pneumatic caisson method of deep shaft for shield, MKC is used to reduce temperature stress, but in the same way as in the general pneumatic caisson method using high-early-strength Portland cement, demolding is performed in 3 days. In such young ages, there is a possibility that the strength is not sufficiently developed, and there is a possibility that the concrete will be adversely affected by the load at the time of construction. In this paper, the effect of MKC strength and load during construction on young ages was examined, and it was found that there is a possibility of adversely affecting the quality. Furthermore, the result of trial calculation is shown about the possibility of precasting of pneumatic caisson.