

開口を有する大深度円形立坑の本体側壁に作用する側圧の分析

板野 貴大¹・山口 哲司²・岩波 基³

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学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

²正会員 株式会社熊谷組 土木事業部土木設計部（〒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

大深度の立坑の設計法は中浅深度における立坑と同様の設計法を用いており，そのため，現状では過度に安全側な設計になっている可能性がある．その一因として，立坑本体壁に作用する側圧の取り扱いが不透明な現状がある．特に，自立性の高い大深度の立坑に作用する側圧は，未解決な課題が多い．

そこで，本報告では，大深度円形立坑本体壁に設置された鉄筋計の計測結果から断面力を算出し，また，温度応力解析を行うことにより計測結果の断面力は温度変化の影響を受けていると考えられるとした．温度補正を行った計測結果と解析結果を比較することにより，立坑本体壁に作用している側圧および要因の推定を行う．

Key Words: circular deep shaft, opening for shield tunnel, lateral pressure, temperature stress

1. はじめに

近年，リニア新幹線や外環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事が多く，大深度の立坑においては，構造的に有利であることから円形立坑が採用される事が多い．

設計に用いる側圧に関して，比較的浅い深度の立坑に作用する土圧と水圧は，一般的な開削トンネルと同様に，砂質土に対しては土水分離，粘性土に対しては土水一体とし，土圧は静止土圧として算出することが多いが，自立性の高い大深度の立坑に作用する側圧は，未解決な課題が多く，『道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 ケーソン基礎の設計』では，静止土圧＋静水圧とし，砂質土，粘性土の区別なく静止土圧係数を 0.5，深さ 15m までを三角形分布，それより深い箇所では 15m の深さにおける静止土圧強度と同じとしている．

本研究では，大深度円形立坑の作用側圧に関する現行基準や実績を整理するとともに，立坑本体壁に設置された鉄筋計の計測結果から算出した断面力と 3 次元シェル

モデルによる解析結果との比較を行うことによって，立坑本体壁に作用していると考えられる実側圧について検討を行ったので結果を報告する．

2. 大深度における側圧

一般的な開削トンネルでは，水圧と同様に土圧は深さに応じて増加するものと考えるが，深部の自立性の高い地盤内に構築される大深度立坑においては，想定した土圧に比べてはるかに小さな土圧しか観測されなかったという報告もある．表-1 に現行基準の土圧の考え方及び実績を示す．

表-1 に示したように自立性の高い大深度の地盤においては，土圧に関しては深度に比例して増加しているという考えは疑問が生じている．自立性の高い大深度の地盤では土圧の増加はほとんどないと考えられる．

表-1 大深度における側圧

文献	側圧
トンネルライブラリー シールド工事用立坑の設計	概ね 20m以上を深部とみなし、土圧は自立性の高い土質では増加がないと想定する場合がある
岩波ら「大深度円形立坑の地中連続壁における設計用土圧に関する一考察」	砂質土地盤においては、実際にN値50以上の場合に大深度円形立坑の連壁に有効土圧はほとんど作用していないと報告している。
古谷ら「明石海峡大橋 1 Aアンカレイジ基礎における大深度掘削の計測結果とその評価」	明石海峡大橋 1 A アンカレイジ基礎で求めた有効土圧は、側圧係数にする上部では 0.27 程度で、GL-30m 付近から減少し始め、GL-60m より深い位置ではほぼ 0 と見なせる報告している。
安部ら「白鳥大橋主塔基礎における大深度地中連続壁の動態計測と設計値との対比」	白鳥大橋 P3 橋脚基礎の円形立坑は土留め連壁の掘削側と背面側の土圧計の値は両側とも設計値よりも小さく、深い位置の土圧計の値と水圧計の値から算出した有効土圧の値は、負となる箇所があったとも述べている。

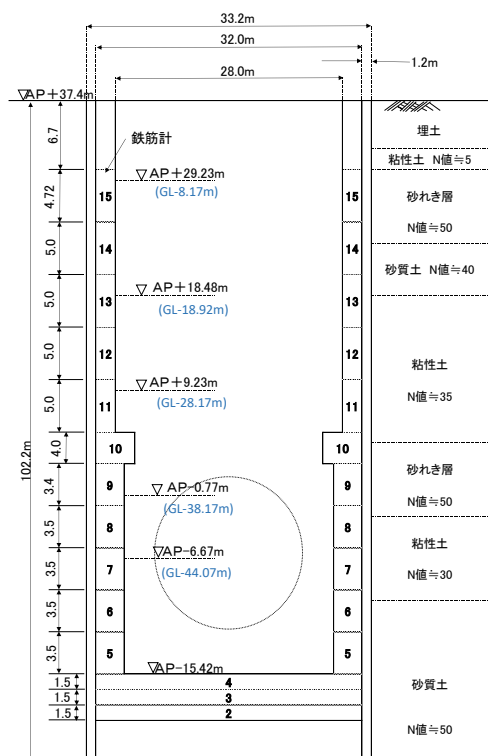


図-1 立坑本体概略図

3. 計測結果

(1) 研究対象

本研究に用いた大深度の円形立坑は、深さ 57.32m の雨水貯留管構築用の発進立坑本体壁で、外径 32.0m、内径 28.0m の上部側壁と、外径 32.0m、内径 26.0m の下部側壁、かまち梁、底版で構成され、φ14.0m の 2 つのシールドトンネル開口を有する。また、立坑は壁厚 1.2m の地下連続壁を仮設の土留めとした開削工法で、順巻きによって構築された。円形立坑の断面図、平面図を図-1、図-2 に示す。また、本円形立坑は、本体側壁に鉄筋計と熱電対、地下連続壁に土圧計と水圧計が設けられた。計測機器配置図を図-3 に示す。

(2) 断面力の算出

次に鉄筋計から算出した軸力と曲げモーメントを表-2、表-3 に、土圧計と水圧計の計測結果を表-4、表-5 に、水平方向軸力と土圧・水圧の経時変化図を図-4 に示す。

図-4 に示すように、本体壁に作用する土圧、水圧の経時的な変動は小さいが、鉄筋計から算出した軸力は大きく変動しており、側圧以外の作用に起因していることが確認できる。

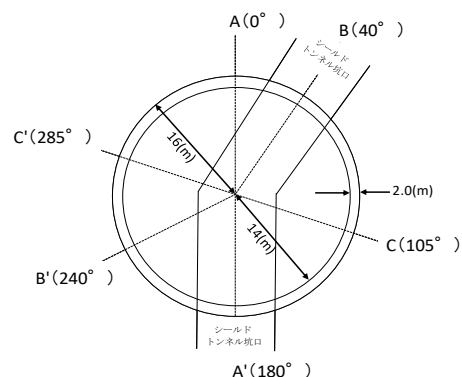


図-2 立坑本体平面図

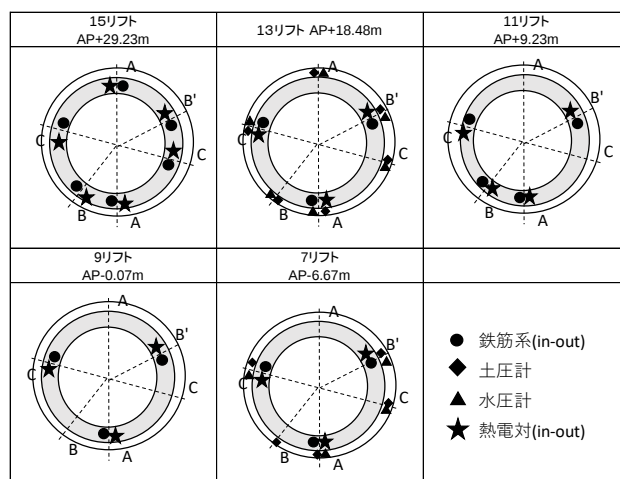


図-3 計測機器配置図

表-2 鉄筋計より算出した水平方向の軸力
(単位: kN)

水平方向	計測断面	2002/5/31	2002/7/31	2003/3/31	2003/4/30	2003/5/31	2003/6/30	2003/7/31
AP+29.23m	A'	-	-6860	13067	10301	8492	7354	7549
GL-8.17m	B'	-	-6385	5237	3663	2707	1578	1695
	C'	-	-6467	7416	5564	4614	3724	4034
AP+18.48m	A	-	-4777	-404	-2065	-3583	-4315	-3654
GL-28.17m	B'	-	-1633	7567	4685	3960	3527	4311
	C'	-	-3167	-2374	-3674	-3516	-3869	-3686
AP+9.23m	A	-	-1566	389	-1397	-2604	-3224	-2366
GL-28.17m	B'	-	-1680	35	-461	-740	-1056	-836
	C'	-	-1816	-2653	-3052	-3557	-3626	-3344
AP+0.77m	B'	-3708	-4418	-3621	-4564	-6246	-6957	-7297
GL-38.17m								
AP-0.77m	A	-11347	-13684	-12961	-12516	-11124	-11421	-12844
GL-44.07m	B'	-14793	-17261	-15995	-16754	-18586	-19200	-19489
	C'	-13720	-16804	-15373	-16368	-18483	-19145	-19574

表-3 鉄筋計より算出した鉛直方向の曲げモーメント
(単位: kN・m)

鉛直方向	計測断面	2002/5/31	2002/7/31	2003/3/31	2003/4/30	2003/5/31	2003/6/30	2003/7/31
AP+29.23m	A'	-	795	-1492	-1568	-1520	-1231	-1165
GL-8.17m	B'	-	278	-1027	-1422	-1559	-1497	-1507
	C'	-	380	-932	-1402	-1484	-1207	-1125
AP+18.48m	A'	-	-912	-986	-1261	-1336	-1218	-1145
GL-28.17m	B'	-	-1003	-1486	-1950	-2019	-1841	-1782
	C'	-	-653	-1068	-1424	-1521	-1261	-1179
AP+9.23m	A	-	-571	-364	-485	-181	33	-168
GL-28.17m	B'	-	-376	-1328	-1549	-1360	-1087	-991
	C	-	-996	-6836	-4496	-1781	-1072	-815
AP+0.77m	B'	579	-3333	-532	-1684	-2554	-2585	-1811
GL-38.17m								
AP-0.77m	A	-4088	-3485	-2770	-2907	-3135	-3338	-3349
GL-44.07m	B'	-2736	-2689	-746	-1676	-1958	-2032	-1512
	C'	-3566	-2989	-1850	-2504	-2948	-3113	-2845

表-4 土圧計

		2002年	2003年					
		7/31	3/31	4/30	5/31	6/30	7/31	
13リフト	A (0°)	0.294	0.287	0.303	0.335	0.346	0.322	
	B' (240°)	0.266	0.325	0.341	0.353	0.367	0.373	
	C (105°)	0.192	0.223	0.264	0.257	0.278	0.282	
7リフト	A (0°)	0.313	0.33	0.331	0.327	0.325	0.331	
	B' (240°)	0.196	0.841	0.609	0.531	0.548	0.569	
	C (105°)	0.174	0.458	0.394	0.363	0.367	0.378	

表-5 水圧計

		2002年	2003年					
		7/31	3/31	4/30	5/31	6/30	7/31	
13リフト	A (0°)	0.136	0.137	0.137	0.137	0.139	0.140	
	B' (240°)	0.147	0.138	0.139	0.143	0.149	0.154	
	C (105°)	0.138	0.141	0.140	0.141	0.143	0.144	
7リフト	A (0°)	0.302	0.318	0.321	0.315	0.311	0.319	
	B' (240°)	0.155	0.275	0.107	0.092	0.098	0.102	
	C (105°)	0.188	0.228	0.171	0.177	0.18	0.181	

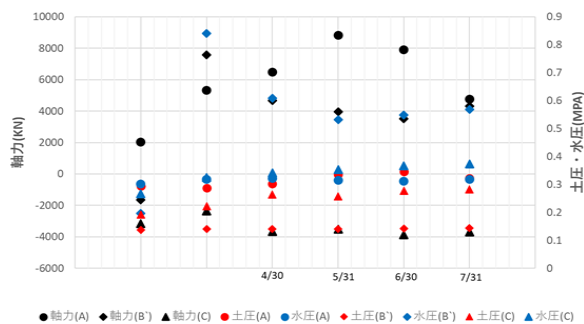


図-4 軸力と土圧・水圧の経時変化図(13リフト)

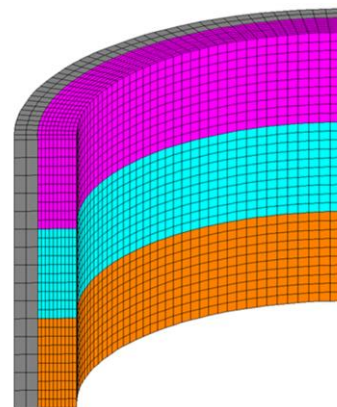


図-5 解析モデル図

4. 温度応力解析結果

(1) 解析の概要

本研究では図-4 に示す軸力の変動は温度応力に起因するものと考え、温度応力解析を実施した。解析モデル図および解析条件を図-5、表-6 に示す。

(2) 解析結果

図-6 に水平方向軸力に関する温度応力解析結果と計測結果の経時変化図を示す。軸圧縮力を負、軸引張力を正で示す。図-6 に示すように春から夏にかけて水平方向の軸力が増加しており、このことは鉄筋計から算出した軸力においても同様の傾向であることが確認できる。

表-6 解析条件

ポアソン比 (—)	0.2	
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /℃)	10	
圧縮強度 (N/mm ²)	24	
ヤング率 (N/mm ²)	31000	
引張強度 (N/mm ²)	2.16	
項目	コンクリート	地盤
密度 (kg/m ³)	2400	2000
比熱 (kJ/kg℃)	1.15	0.8
熱伝導率 (W/m℃)	2.7	3.0

(3) 結果の考察

本円形立坑においては、温度上昇による体積膨張が周辺地盤により拘束された為、軸力が増加したものと考えられる。このことから、鉄筋計から算出した断面力の経時変化は、土圧や水圧等の側圧の変化によるものではなく、水和反応や外気温の温度変化に伴う温度応力に起因したものであると考えられる。

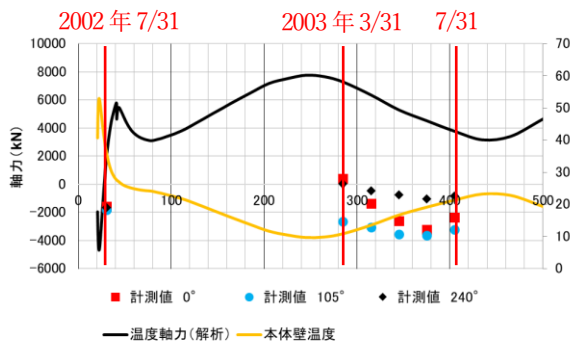


図-6 軸力の経時変化図（13 リフト）

表-7 解析条件

構造条件	立坑内径：28.0m(上部)、26.0m(下部)
	立坑深さ：57.32m
	側壁厚：2.0m(上部)、3.0m(下部)
	かまち梁：6.0m × 4.0m
	底板厚：4.5m
	シールドトンネル開口：Φ14.0m
荷重条件	土圧：静止土圧 ($K_0 = 0.5$)
	水圧：GL-5.0m
	偏圧：土圧 × 0.2

5. FEM 解析による作用側圧の推定

(1) 解析概要

本研究では、作用側圧をパラメーターとした 3 次元 FEM 解析を実施し、鉄筋計から算出した断面力と比較することによって側圧の推定を行った。断面番号の説明として平面図を図-7 に解析モデルを図-8 に、解析条件を表-7 に示す。立坑本体壁はシェル要素、かまち梁および底板をソリッド要素、周辺地盤を引張りに対して抵抗しないノンテンションの地盤ばねでモデル化し、側圧は土水圧を等圧で作用させた場合と水圧のみを等圧で作用させた場合の 2 ケースについて報告する。また、本研究ではの為、砂質土、粘性土ともに土水分離とし、土圧は立坑下端まで深度に比例して増加するものとした

(2) 解析結果

前章までに示したように、立坑本体壁に設置された鉄筋計の計測結果から算出した断面力は、水和反応による影響や外気温の温度変化による影響を受けていることを確認した。よって本章では、本体コンクリートの打設日から水和反応による影響が定常状態となる 1 ヶ月後以降の計測結果を初期値とし、また、表-2、表-3 から外気温の低下による軸力の低下が小さい夏場の計測結果を用いて解析結果との比較を行った。表-8 に立坑構築の行程を、図-9、図-10 に解析結果と計測結果の比較を示す。

表-8 立坑構築の工程

リフト	打設高(m)	日
①連壁	102.2	2000/11～
②リフト	1.5	2001/11/20
③リフト	1.5	2001/12/22
④リフト	1.5	2001/12/22
⑤リフト	3.5	2002/1/15
⑥リフト	3.5	2002/2/15
⑦リフト	3.5	2002/3/1
⑧リフト	3.5	2002/4/15
⑨リフト	3.4	2002/5/8
⑩リフト	4.0	2002/5/25
⑪リフト	5.0	2002/6/1
⑫リフト	5.0	2002/6/21
⑬リフト	5.0	2002/7/12
⑭リフト	5.0	2002/7/27
⑮リフト	4.72	2002/8/3

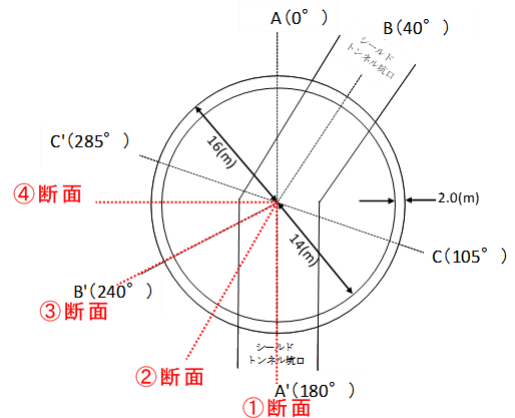


図-7 立坑本体平面図

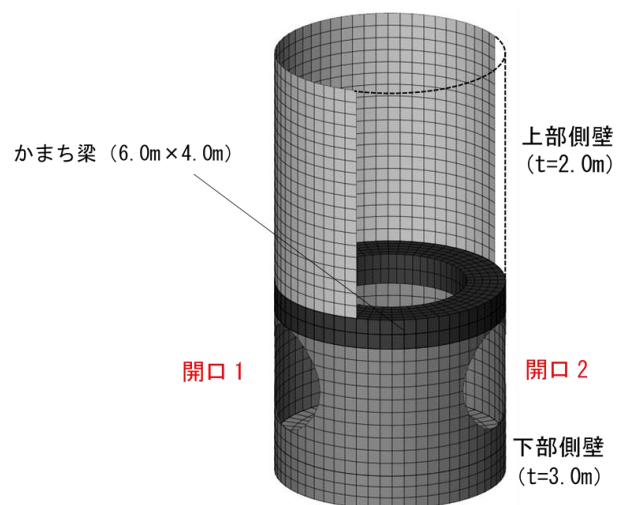


図-8 解析モデル図

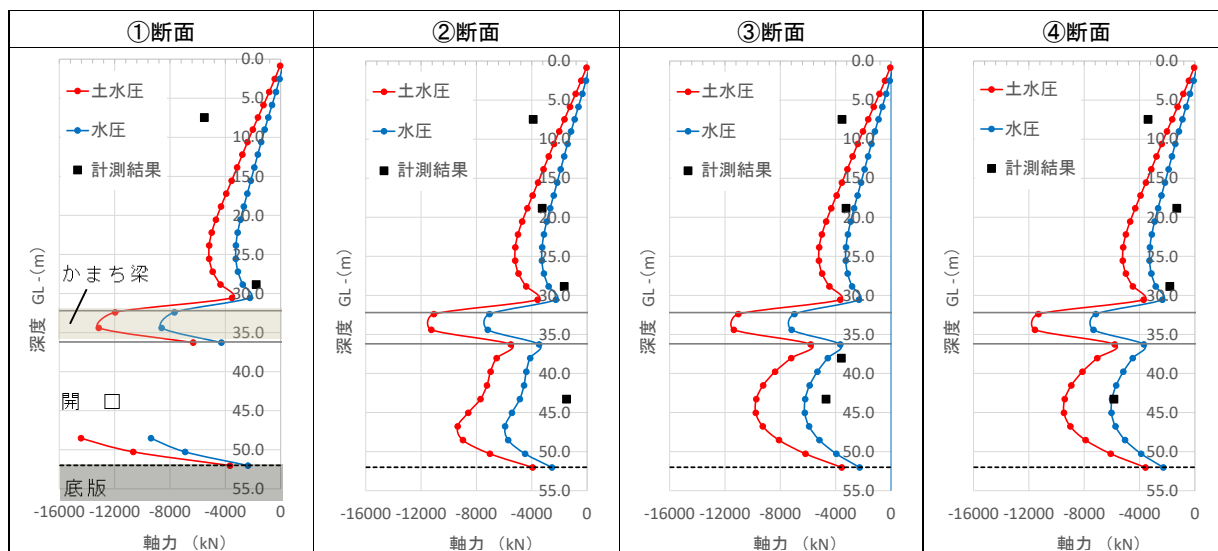


図-9 解析結果と計測結果の比較（水平方向軸力）

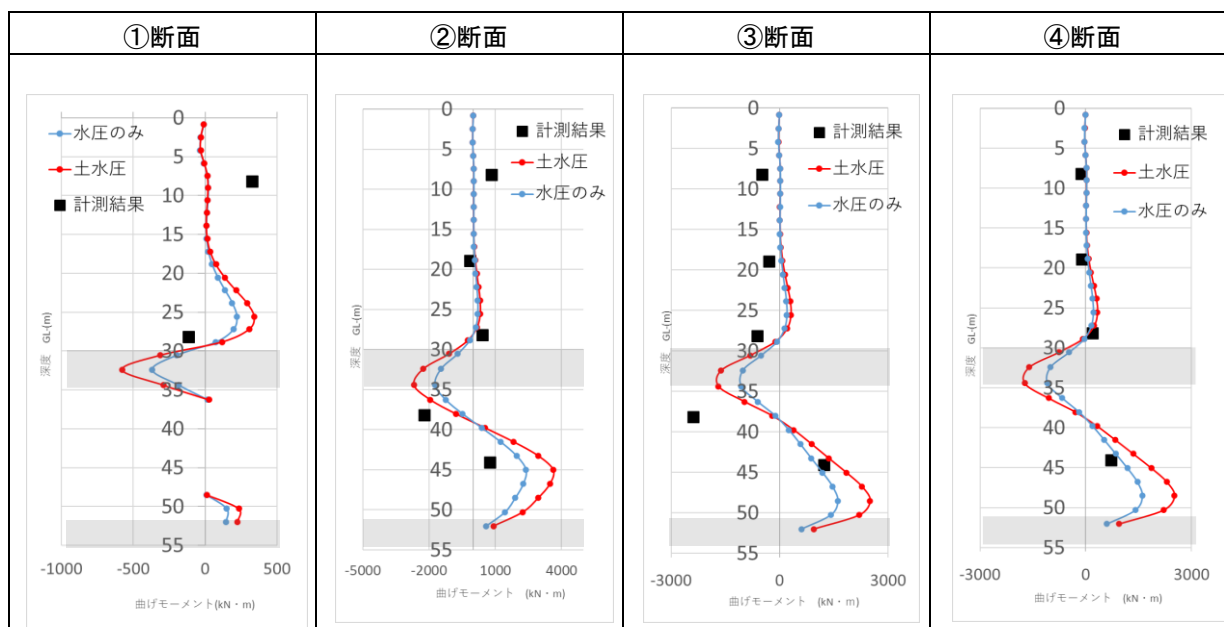


図-10 解析結果と計測結果の比較（鉛直方向曲げモーメント）

a) 水平方向の軸力分布

図-9 に示すように、3次元シェルモデルによる側壁の水平方向軸力は、深度に比例して増加するが、かまち梁に近づくにつれて減少し、かまち梁で増加する。その後開口部以外は深度に比例する軸力に戻り、底板で減少する挙動となる。この傾向は計測結果にもみられる。ただし、GL-8.17m の地表面に近い計測結果は解析結果より大きな軸力となっているが、この理由として外気温の変化の影響又は水和熱による影響を除去しきれてない為であると考えられる。また、計測結果は土水圧よりも水圧のみが作用した場合の結果に近く、開口部の深度（GL-44.07m）では開口部（①断面）に近づくにつれて軸力が低下していることが確認できる。

b) 鉛直方向の曲げモーメント分布

図-10 に示すように、3次元シェルモデルによる側壁の鉛直方向曲げモーメントは、かまち梁までは増加せず、かまち梁で負の曲げモーメントが増加する。その後は、開口部付近の深度では正曲げに転換し、底板で減少する挙動となる。①断面のみは GL-20mあたりから正の曲げモーメントが増加し始めている。ただし、GL-8.17m の地表面に近い計測結果は解析結果より大きな曲げモーメントとなっているが、この理由として外気温の変化の影響または水和熱による影響を除去しきれてないためであると考えられる。また、計測結果が正の曲げモーメントの時は水圧のみの解析結果に近く、負の曲げモーメントの時は土水圧、水圧のみの解析結果より大きい値となった。

(3) 結果の考察

本研究に用いた大深度の円形立坑において、上述したように鉄筋計の計測結果から算出した断面力は、水平方向の軸力に着目すると、水圧のみが作用した場合の断面力に近く、本立坑本体壁には水圧のみが作用している可能性が高いと考えられる。

6. まとめ

本研究では、鉄筋計の計測結果から算出した断面力と作用側圧をパラメーターとした 3 次元 FEM 解析結果とを比較することによって大深度円形立坑本体壁に作用している側圧の推定を行った。本研究で得られた知見を以下に述べる。

- ① 地中連続壁を仮設土留めとして構築された大深度円形立坑には、水平方向の軸力に着目すると水圧のみが側圧として作用している可能性がある。
- ② 自立性が高い大深度の地盤においては、土圧はほとんど作用していない可能性がある。

③ 仮設構造物として構築された円形の地中連続壁は、立坑本体壁構築後においても土圧に対して耐荷機構を保持しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 2012
- 2) 土木学会：シールド工事用立坑の設計，2015
- 3) 岩波基，板場健太：大深度円形立坑の地中連続壁における設計用土圧に関する-考察，土木学会論文集，2011
- 4) 竹田俊明，坂場武彦，安部善憲：白鳥大橋主塔基礎における大深度地中連続壁の動態計測と設計値との対比，構造工学論文集，pp.1343-1352,1992
- 5) 古屋信明，辰巳正明，斉藤哲男，山岡禮三，崎本純治，伊藤政人：明石海峡大橋 1 A アンカレイジ基礎における大深度掘削の計測結果とその評価，土木学会論文集，No.474,pp.47-56,1993.9

ANALYSIS OF LATERAL PRESSURE ACTING ON BODY SIDE WALL OF DEEP CIRCULAR SHAFT WITH OPENING

Takahiro ITANO, Tetsuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

The design method of the shaft with large depth uses the same design method as the shaft with medium and shallow depth. Therefore, it is possible that the design is excessively safe at present. One of the reasons for this is the current situation where the handling of lateral pressure acting on the shaft body wall is unclear. In particular, there are many unsolved problems regarding the lateral pressure acting on a deep shaft with high self-sustainability.

Therefore, in this report, the cross-section force is calculated from the measurement results of the rebar meter installed on the wall of the deep shaft of the vertical shaft. Moreover, it is considered that the cross-sectional force of the measurement result is affected by the temperature change by performing the temperature stress analysis. By comparing the temperature-corrected measurement results with the analysis results, the lateral pressure acting on the shaft main wall and factors are estimated