

(72) 破碎帯の境界付近に建設された立坑の変形特性に関する研究

西松建設㈱ 正会員 ○荒井 紀之,
西松建設㈱ 正会員 熊谷 健洋, 平田 篤夫
西松建設㈱ 正会員 倉岡 豊, 西田 孝吉

A Study of the Deformation Behavior of Round Shaft dug near the Boundary of the Fracture Zone.

Noriyuki ARAI, Nishimatu Co., Ltd.
Takehiro KUMAGAI, Atuo HIRATA, Nishimatu Co., Ltd.
Yutaka KURAOKA, Koukich NISHIDA Nishimatu Co., Ltd.

Abstract

The paper studies the deformation of cylindrical shaft dug near the boundary of the fracture zone. The shaft size is 16m in diameter and 27m in depth. It was dug by NATM under the level of 8.6m and by SMW in the upper part. Geological feature is alternation of sandstone and shale formed in Palaeogene. The head difference of about 15m was observed on the boundary of the fracture zone. Measure items executed in construction are displacement in the shaft, displacement in the ground, axial force of the rock bolt and stress in the shotcrete. Non-symmetric distribution about the displacement and support stress was observed. Then, to examine the influence of the fracture zone and the difference of water level on the excavation, numerical analysis by three dimensions FEM was performed. As the result, deformation behavior of the shaft was chiefly influenced by the rigidity of the fracture zone, but smaller in the water level.

1. はじめに

破碎帯の境界付近に、シールド発進用立坑が掘削された。立坑の形状は、直径16m、深さ27mの円筒形状である。上位8.6mまでがSMW工法により、それより下位はNATMで掘削された。掘削工事期間は、約180日である。地質は、古第3紀層の砂岩・頁岩互層である。施工中に実施した計測項目は、坑内地質観察、内空変位、地中変位、ロックボルト軸力、吹付コンクリート圧、地下水位観測等である。計測の結果、変位計測、支保工応力等に非対称な分布が認められた。また、破碎帯を境として約15mの水頭差が観測された。そこで立坑掘削工事に対する破碎帯、水位差の影響を検討するために3次元FEM解析を行った。本論文は、破碎帯が近傍に存在する場合の円形立坑の変形挙動を、計測結果、解析結果から検討したものである。

地質は、上位の約8.6mまでが礫混じり粘性土からなる風化軟質土であり、その下位に古第3紀層の頁岩を主体とした砂岩、礫岩が分布している。全体として互層状を呈するが局部的に非常に不均質な地盤といえる。頁岩の1軸圧縮強度は40~80kgf/cm²、粗粒砂岩~礫岩で600~800kgf/cm²程度であり、軟岩から中硬岩の岩石といえる。亀裂の発達程度は、頁岩部で5~20cm間隔、砂岩・礫岩部で20~100cmである。破碎帯内では、健全部に比較しより亀裂が発達しており、頁岩は部分的に粘土化している。

湧水量は、工事の全期間を通して少なく、破碎帯側の地盤からの滴水程度であった。地下水位は、立坑周辺の観測孔の観測結果より、破碎帯を境界としてGL-2mとGL-17mの水位を示し、約15mの水頭差が確認された。

2. NATM計測

NATM計測項目および計測場所は、それぞれ表-1、図-1に示す通りである。内空変位は、GL-14mとGL-21mのレベルにおいて、図中に示す6測線について測定した。ロックボルト軸力、吹付コンクリート圧、吹付コンクリート背面土圧は、GL-14mレベルにおいて測定した。また、地中変位は図中のK1、K2の2箇所において孔内傾斜計により測定した。

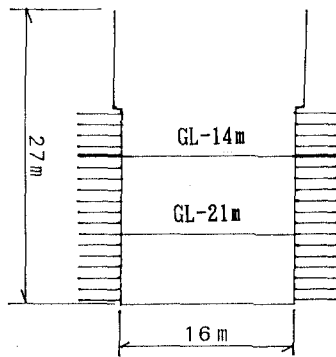


表-1 NATM計測項目

項目	測定数	記号
坑内観察		
内空相対変位	6測線×2	H1, H2, D1~D4
地中変位	2点	K1, K2
ロックボルト軸力	4点	M1~M4
吹付コンクリート応力	4点	T1~T4
1次覆工背面土圧	4点	R1~R4
地下水位、水質	2点	No. 1, No. 2

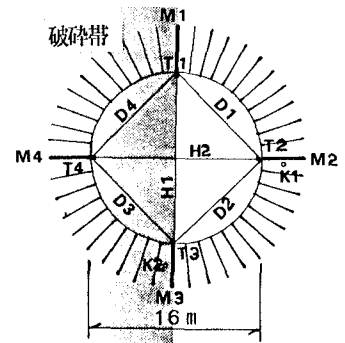


図-1 計測配置

図-2に内空変位量の経

時変化を示す。図中には、

掘削深度の変化もプロットされている。GL-14mレベルの最終変位量は、H2測線で7.2mm、H1測線で5.7mm短縮しており、掘削開始から約40日後、切羽位置から約8m(D/2)離れた地点で変位が収束している。変形モードに関しては、いずれのレベルにおいても、破碎帯側のD3、D4測線の方がD1、D2測線よりも短縮量が大きく、H2測線の方がH1測線よりも変位量は大きい。したがって、破碎帯側の地盤の変形量は、健全地盤側に比べ相対的に大きいことがわかる。

また、図-6にK2孔の掘削終了時点の地中変位の深度分布を示す。測定長は30mである。この図より、破碎帯の境界付近に位置するK2孔の半径方向内向きの変位量が大きく、その最大値は深度21m地点で約16mmである。別途、掘削深度と累積変位量との関係を検討した結果、深度21m地点の変位は、掘削底面が2.8mまで近づいた地点より累積する傾向にあることがわかった。これに対し健全地盤中に位置するK1孔では顕著な変位は認められない。

図-3に立坑掘削終了時点のロックボルト軸力を示す。その分布をみると、M2

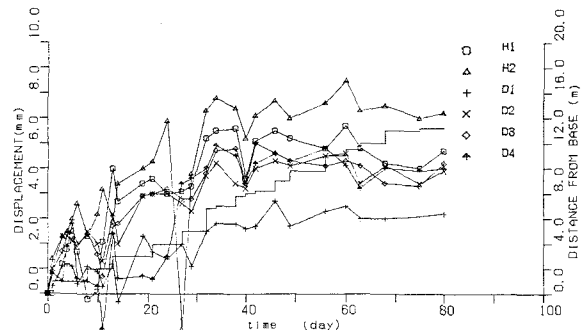


図-2 内空変位の経時変化 (GL-14mレベル)

地点を除き坑壁より0.5～2.0mの区間において圧縮力が作用している。また、吹付コンクリート圧力については、T1、T3の値がT2、T4にくらべ相対的に大きく、T1、T3の最終値は、約30kgf/cm²である。

以上、NATM計測結果の概要を列記したが、各計測値はいずれも管理値以内に収まり、安全な工事を行うことができた。しかし、立坑の変位や支保工の応力分布には、破砕帯に起因すると考えられる非対称分布が認められる。

3. 破砕帯を考慮したFEM3次元解析

前章で記したように、計測結果に特異性が生じた原因として、破砕帯の存在により、立坑に偏圧が作用したことが考えられる。また、地下水位の観測結果より、立坑周辺には約15mの水頭差が観測された。立坑の掘削変形性に対する破砕帯や水位差の影響を検討するために3次元FEM解析を行った。

地盤のモデル化にあたり、第1近似として線形弾性体を仮定した。実際の地盤は、風化岩、頁岩、礫岩等からなる層状地盤であるが、簡単のために、これらの地層の平均的な物性を有する均質地盤とした。

解析ケースとして、地下水面の位置を変えて2種類の解析を行った。ケース1は、破砕帯の剛性を健全地盤よりも低減し、地下水位は破砕帯を境界としてGL-2mとGL-17mの水位を与えた場合である。ケース2はケース1と地盤物性は等しく、地下水位をGL-75mに低下した場合である。地盤の単位体積重量として、地下水面より上位では湿潤重量、地下水面下では飽和重量を与えた。また、掘削過程のモデル化は、ケース1ではGL-14mを境として2段階掘削とし、ケース2では一括掘削とした。ただし、いずれのケースでも支保のモデル化は行っていない。

地盤のパラメータは、事前のボーリング

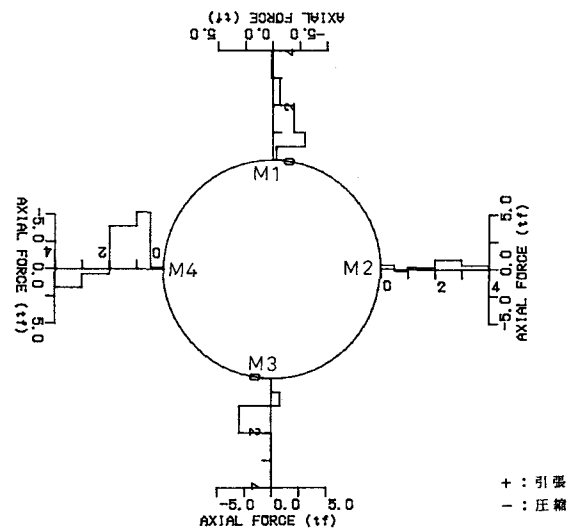


図-3 ロックボルト軸力（掘削終了時点）

表-2 入力パラメータ

パラメータ	単位	健全地盤	破砕帯
弾性係数	tf/m ²	28000	5000
ポアソン比		0.33	0.40
単位体積重量（湿潤）	tf/m ³	2.23	2.00
（飽和）		2.33	2.10
内部摩擦角	度	30.0	15.0
粘着力	tf/m ²	40.0	10.0

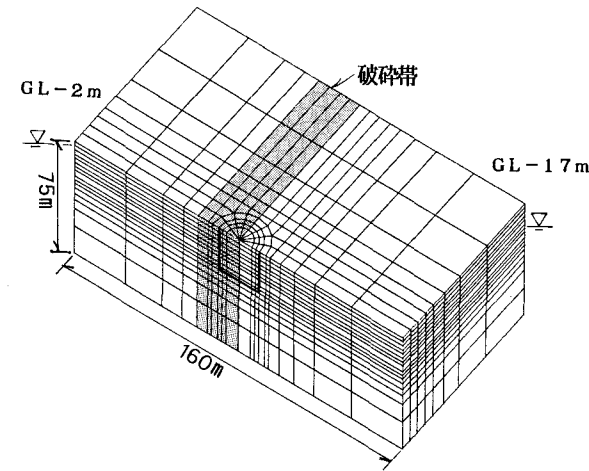


図-4 解析メッシュ

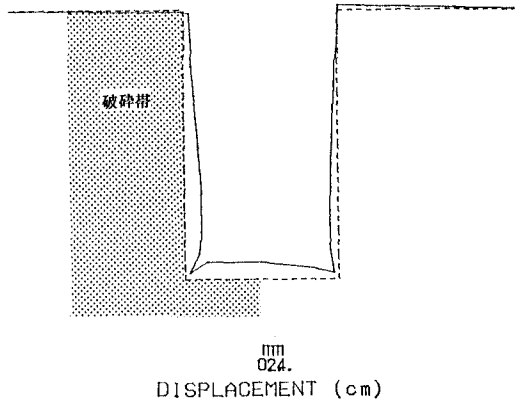
調査結果を参考として決定した。各地層の物性値より均質地盤の値を求めるにあたり、各地層の構成比率を重みとした平均化を行った。健全地盤の物性値は以下のように設定した。ヤング率は、現場近傍で実施された孔内載荷試験により得られた変形係数に基づいて各地層の値を設定し平均化を行った。単位体積重量、ポアソン比、内部摩擦角、粘着力は、路線調査の平均値を使用した。なお、内部摩擦角や粘着力は、1軸圧縮強度と引張強度より岩石の値を推定し、さらに地盤の値を得るために岩石値を亀裂係数により低減して得られた値である。また、破碎帯の物性値については試験値がないため、風化軟岩の値を参考として設定した。表－2に、健全地盤と破碎帯の入力パラメータを示す。

図－4に、解析に使用した3次元メッシュを示す。破碎帯は、図に示すように、幅が20mで立坑を半分含む形状とした。解析領域は、立坑を中心として水平方向に80m、深さ方向に75mとした。

初期応力値は、側圧係数を1.0と仮定して自重解析により求めた。

4. 解析結果

図－5に、立坑掘削終了後の破碎帯と直交する鉛直断面の変位図を示す。側壁の変形量を比較すると、破碎帯側の変位量が大きく、解析ケース1の最大値は深度23mにおいて約33mmである。また、地表面の鉛直方向の変位量については、破碎帯側の地盤は約5mm沈下し、健全地盤側では約10mm隆起している。変位量について解析ケース1と2を比較した場合、地下水面の高いケース1の方が最大で5%変位が大きくなっている程度であり、地下水位差の影響は小さいといえる。

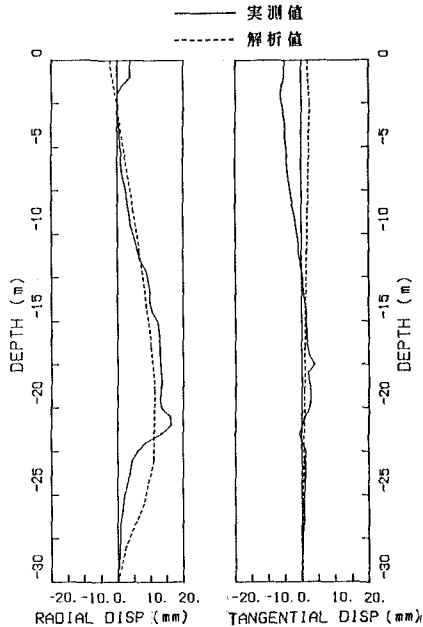


図－5 破碎帯と直交する鉛直断面内の変位分布

図－6に、K2地点における地中変位の立坑掘削終了時の計測値と、解析ケース1の値を比較して示す。この図より、解析結果と計測結果はよい一致をみることがわかる。半径方向の変位について、深度22m以下の分布が異なるのは、この深度に剛性のより大きな礫層が存在するためと考えられる。

表－3に内空変位の掘削終了時の計測値、解析結果の最終変位量およびGL－14mまで掘削した段階の変位量を示す。解析結果より、GL－14mまで掘削した地点の先行変位量は、最終変位量の約23%であることがわかる。解析値は、実測値にくらべ約3.5倍大きな値を示すが、H2測線がH1測線の短縮量も大きく、D3、4測線がD1、2測線よりも大きいといった傾向は一致する。

地中変位と内空変位の計測値と解析値の比較により、地中変位については解析結果とほぼ一致し、内空変位については解析値の方が大きくなった。この原因として、実際の工事では、剛性リングや吹付コンクリート等の支保工が導入される結果、壁面の変位が拘束されることや、内空変位測定ピンの設置時期のおくれ、地盤のモデル化における破碎帯の方向の



図－6 地中水平変位の計測値と解析値 (K2地点)

ずれ等が影響したこと等が考えられる。

図-7に、解析ケース1の掘削後のGL-14mレベルの主応力分布を示す。最小主応力の分布をみると、立坑の周辺部と破砕帯側に低応力域が存在することがわかる。また、最大主応力については、健全地山側の立坑周辺部と破砕帯との境界部に応力が集中している。

4. まとめ

NATM計測結果と3次元FEM解析により以下のことが明らかになった。

①地盤のモデル化にあたり、第1近似として線形弾性帯を仮定し、層状地盤を均質地盤とするなど単純な解析モデルではあるが、破砕帯の弾性定数を周辺地盤よりも低減することにより、立坑の変形特性は比較的よく解析することができた。

②水位差の影響を地盤重量の違いとして解析した結果、立坑の変形性に対するその影響は小さいことがわかった。

表-3 内空変位の実測値と解析結果 単位 (mm)

測線名	H1	H2	D1	D2	D3	D4
実測値	-5.7	-7.2	-3.2	-4.9	-5.2	-5.0
解析値1	-8.1	-9.0	-5.4	-5.4	-6.7	-6.7
解析値2	-35.8	-40.8	-22.0	-22.0	-32.0	-32.0
解析値2-解析値1	-27.7	-31.8	-16.6	-16.6	-25.3	-25.3
解析値1/解析値2	23%	22%	25%	25%	21%	21%

解析値1 GL-14mまで掘削、 解析値2 GL-28mまで掘削

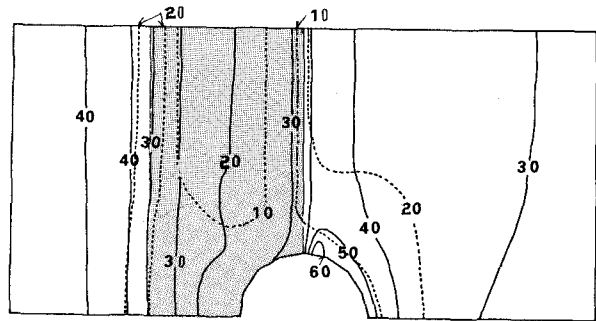


図-7 GL-14mレベルの主応力分布

—— 最大主応力 (単位 tf/m^2)
 - - - - 最小主応力