

(51) 2 段 ベ ン チ N A T M に お け る 坑 外 計 測 と 坑 内 計 測 と の 対 比 例

日 本 国 有 鉄 道 ○ 小 林 進 高 田 允 温
(株) 応 用 地 質 調 査 事 務 所 近 藤 達 敏 土 屋 浩

1 ま え が き

N A T M 計 測 の 多 く は ト ン ネ ル 切 羽 近 く に 計 器 を 設 置 し て 測 定 を 開 始 す る 方 式 の 坑 内 計 測 で 占 め ら れ て い る。こ の 方 式 は 経 済 的 か つ 実 用 的 な 方 法 で あ る が、ト ン ネ ル 切 羽 が 到 達 す る 前 の 変 位 を 把 握 で き な い こ と は よ く 知 ら れ て い る¹⁾。そ の た め、切 羽 到 達 前 の 変 位 に つ い て は、坑 内 計 測 に よ る 変 位 測 定 結 果 に 一 定 の 比 を 乗 る 等 の 方 法 に よ っ て 推 定 す る こ と が 行 な わ れ て い る。

今 回、2 段 ベ ン チ N A T M で 掘 削 さ れ た 円 形 ト ン ネ ル に お い て、坑 外 計 測 と 坑 内 計 測 を 同 一 地 点 で 実 施 し、両 者 の 結 果 を 対 比 し た。そ れ に よ る と、坑 外 計 測 で 測 定 さ れ た 全 変 位 量 に 対 し、坑 内 計 測 で 測 定 さ れ た 変 位 量 の 比 率 は、水 平 方 向 変 位 と 鉛 直 方 向 変 位 と で 異 な る こ と が 判 明 し た。そ こ で、2 次 元 F E M 解 析 に よ っ て、2 段 ベ ン チ N A T M と 全 断 面 N A T M の 場 合 に つ い て、坑 内 計 測 で 測 定 可 能 な 変 位 量 を 検 討 し、計 測 結 果 の 特 徴 が 2 段 ベ ン チ N A T M に 共 通 す る 特 徴 で あ る こ と を 確 認 し た。ま た、軸 対 称 F E M 解 析 に よ っ て、坑 内 計 測 に お け る 初 期 値 測 定 時 の 切 羽 距 離 が 変 位 測 定 結 果 に 与 え る 影 響 を 検 討 し た。

小 論 の 検 討 結 果 は、坑 内 計 測 に よ っ て ト ン ネ ル 周 辺 地 盤 の 安 定 性 を 判 断 す る 場 合 に 役 立 つ ば か り で な く、ロ ッ ク ボ ル ト の 打 設 時 期 と そ の 効 果 を 検 討 す る 場 合 に も 参 考 に な る も の と 考 え ら れ る。

2 計 測 方 法

計 測 の 対 象 と し た ト ン ネ ル は 半 径 3 . 7 m の 円 形 で あ り、ベ ン チ 長 を 4 m と し て、上 部 半 断 面 お よ び 下 部 半 断 面 と も ロ ッ ド ヘ ッ ダ ー に よ っ て 掘 削 さ れ た。

坑 外 計 測 と し て は 図 - 1 の よ う に、傾 斜 計 2 孔 に よ っ て 水 平 方 向 変 位 を 測 定 し た。ま た、沈 下 計 お よ び 水 準 測 量 に よ っ て 鉛 直 方 向 変 位 を 測 定 し た。

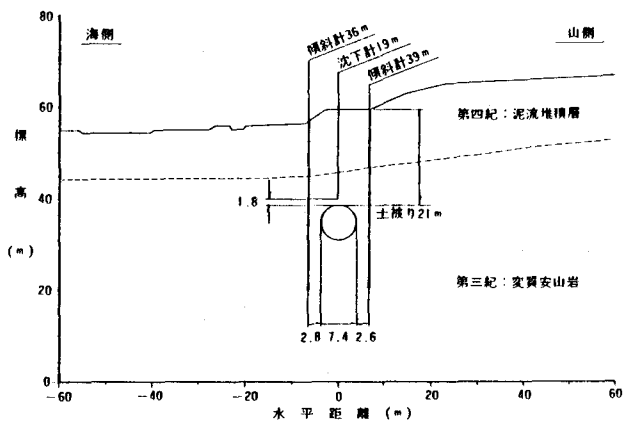


図 - 1 坑 外 計 測 の 計 器 配 置

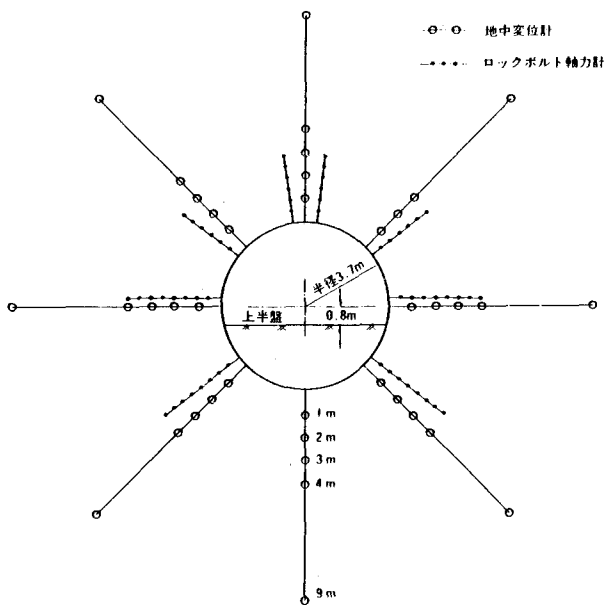


図 - 2 坑 内 計 測 の 計 器 配 置

一方、坑内計測としては図-2のように、上部半断面内に5方向、下部半断面内に3方向の地中変位測線を設定した。なお、ロックボルト軸力についても、地中変位とほぼ同一方向において測定した。

3 計測結果

坑外計測および坑内計測の結果を、水平方向変位と鉛直方向変位に分けて対比する。まず、トンネル側方3m付近にある測点の水平方向変位量を図-3に示した。坑内の地中変位計による変位量3.9mmは、傾斜計による変位量5.2mmの75%に相当するが、坑内計測開始時における傾斜計測定値1.2mmを考慮すると、両者はよく一致している。

次に、トンネル上方3m付近にある測点の鉛直方向変位量を図-4に示した。坑内の地中変位計による変位量0.5mmは、沈下計による変位量2.0mmの25%に相当し、坑内計測開始時における沈下計測定値1.2mmを考慮すると、両者はほぼ一致している。しかし、坑外計測値に対する坑内計測値の割合が水平方向(75%)と鉛直方向(25%)とで大巾に異なることは、トンネル周辺地盤の安定性を判断する際に、坑内計測値をそのまま使うと問題が生じる恐れがあることを示している。そこで、この問題を2次元FEM解析によつて確認することにした。

4 2次元FEM解析結果

要素分割図を図-5、ロックボルトの配置を図-6に示した。解析条件は次の通りである。

地盤の弾性係数 $E = 3900 \text{ Kgf/cm}^2$
 地盤のポアソン比 $\nu = 0.30$

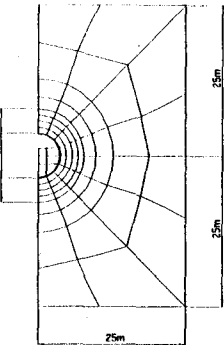


図-5 要素分割図

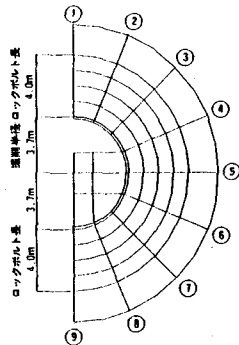


図-6 ロックボルト配置

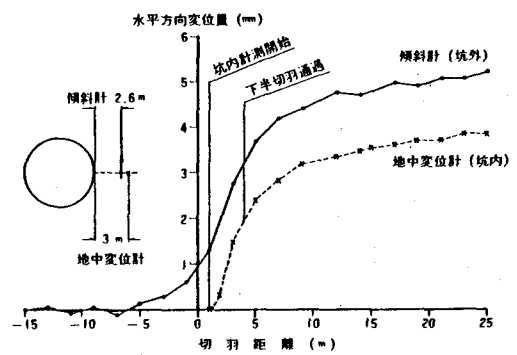


図-3 水平方向変位量と切羽距離

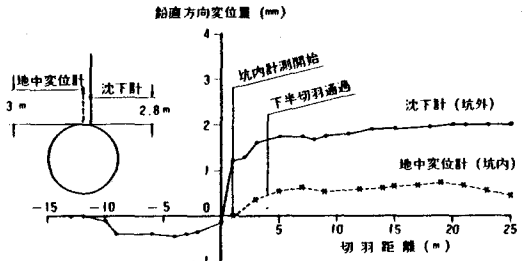


図-4 鉛直方向変位量と切羽距離

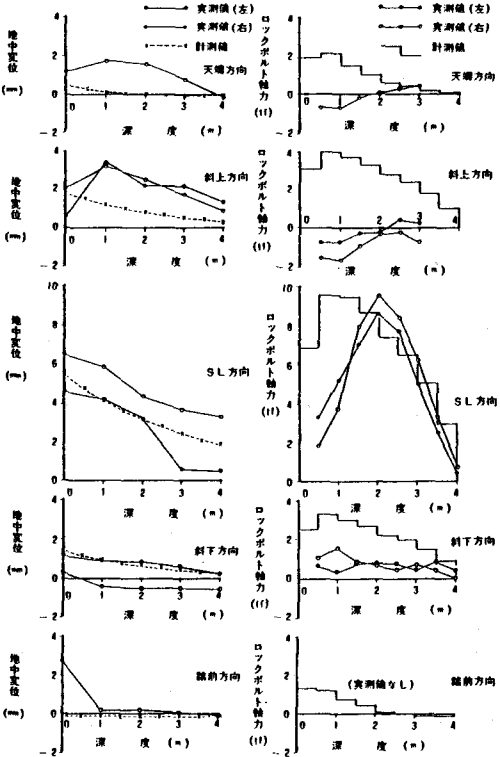


図-7 地中変位 図-8 ロックボルト軸力

吹付コンクリート（厚さ 15 cm）については平面要素、ロックボルトについてはビーム要素ロックボルトモデル（BERM-OYO）を使用した。その他の解析条件は文献 2）を参照されたい。

最初に、2 段ベンチ NATM の場合の解析結果を計測結果と対比して検討する。図-7 は、地中変位に関する実測値と計算値である。図中、上部半断面における計算値としては、上半切羽が到達して以降に生ずる変位量を示してある。また、下部半断面における計算値としては、下半切羽が到達して以降に生ずる変位量を示してある。これらはいずれも、深度 9 m の測点に対する相対変位量の形とした。こうした操作によって、計算値と実測値は、区間に関してもまた期間に関しても、同じ性格の変位量になっている。図-7 における計算値は、実測値の傾向をほぼ表現していると見てよいであろう。

図-8 は、ロックボルト軸力に関する実測値と計算値である。天端付近のロックボルト軸力については、実測値が圧縮傾向にあるが、計算値はこの傾向を表現できていない。側壁付近のロックボルト軸力については、計算値は実測値にかなり近いということができよう。以上の検討で、今回の 2 次元 FEM 解析がトンネル掘削時の実際の挙動をある程度は表現していることが確認された。

次に、坑内計測によつて測定し得る変位量を、2 次元 FEM 解析結果によつて検討する。図-9 は 2 段ベンチ NATM の場合の上記 FEM 解析の結果を別の形に整理したものである。図中の計算全変位量は坑外計測値に対応し、計測可能変位量は坑内計測値に対応する。両者の比率を計測結果に対応する位置（深度 3 m）で調べると、天端方向において 10 %、SL 方向において 90 %、踏前方向においては収縮傾向を示して -18 % になっている。

更に、全断面 NATM の場合について、2 次元 FEM 解析を実施し、2 段ベンチ NATM の場合と同様に整理して図-10 に示した。計算全変位量（坑外計測値）に対する計測可能変位量（坑内計測値）の比率は、深度 3 m 付近について、天端方向において 40 %、SL 方向において 61 %、踏前方向において 56 % を示している。

2 段ベンチ NATM（図-9）と全断面 NATM（図-10）とを合わせて考察すると、坑外計測値に対する坑内計測値の比率が水平方向と鉛直方向とで異なる原因は、トンネル断面を分割して掘削するところにあることがわかる。従つて、全断面 NATM の場合は、今回の計測結果の対比で明らかになつたような問題が発生する可能性は小さいと考えられる。

ところで、2 次元 FEM 解析を用いた上記の検討は、トンネル切羽に計器を設置してその後の変形を計測することを前提としている。しかし、実際の坑内計測においては、計測作業の必要上、切羽から多少離れた位置で計測を開始せざるを得ない。そこで、坑内計測の初期値測定時における切羽距離が、計測結果に与える影響を検討するため、軸対称 FEM 解析を実施した。

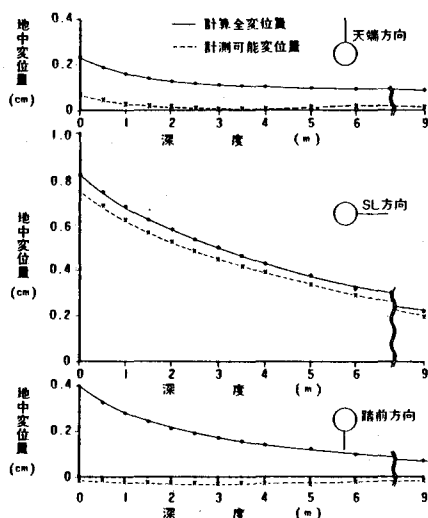


図-9 2 段ベンチ NATM の計算結果

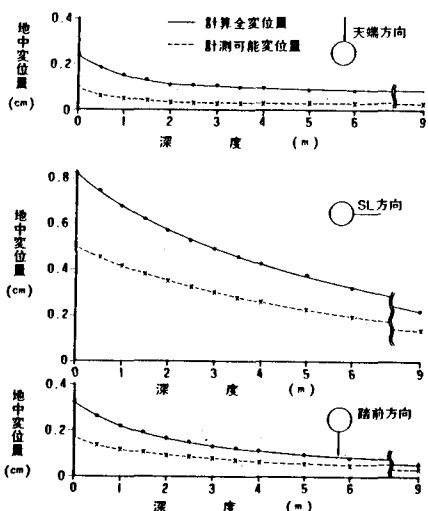


図-10 全断面 NATM の計算結果

5 軸対称 FEM 解析結果

軸対称 FEM 解析の要素分割図を図-11に示した。解析したトンネルの半径は 5 m、解析領域の半径は 41 m であるが、解析結果はトンネル半径 r を単位として表示した。また、半径方向変位については、切羽距離が $8r$ の点における変位量を単位として規格化した。

半径方向変位の分布を図-12に示した。この図はトンネル周辺地盤の変形後の形状を誇張したものになっている。その様子はトンネル切羽を境として急変し、切羽前方においては下に凸の曲線、切羽後方においては上に凸の曲線を描いている。特に、切羽付近のトンネル壁面においては、切羽距離のわずかの違いで半径方向変位が大きく変化することがわかる。

トンネル壁面からの深度が d/r である点の半径方向変位が、最終変位量 ($L/r = 8$ における変位量) に対して占める割合を変位出現率と定義し、それが切羽距離 L/r によって変化する様子を図-13に示した。壁面に近い点の変位出現率が切羽近くで急激に増加するのに対して、壁面から遠い点の変位出現率は切羽距離に従ってゆるやかに増加することがわかる。

最後に、特定の切羽距離 L/r における深度方向の変位出現率を見ると図-14のようになっている。切羽近くにおいては、浅い所程変位出現率が低いが、切羽から離れると、浅い所程変位出現率が高くなる傾向が見られる。

6 あとがき

2 段ベンチ NATM の坑内で実施される地中変位測定においては、鉛直方向変位量が相対的に小さく測定される傾向があることが判明した。従って、トンネル周辺地盤の安定性を判断するに当たっては、こうした傾向を考慮に入れる必要がある。

参 考 文 献

- 1) 桜井春輔・蓮井昭則・近藤達敏 : 3 次元的な掘削手順を考慮したトンネルの有限要素解析、土木学会第 36 回年次学術講演会講演集、1981 年 10 月。
- 2) 土屋 浩・近藤達敏 : ビーム要素ロックボルトモデルにおける剪断バネ定数についての検討、日本応用地質学会、昭和 58 年度研究発表会 予稿集、1983 年 10 月。

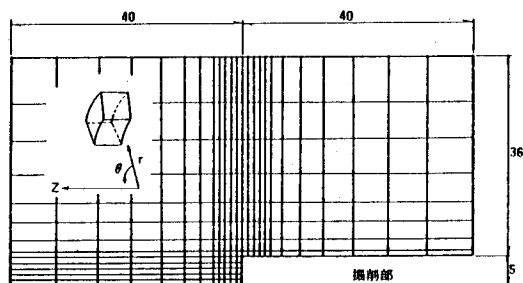


図-11 軸対称 FEM 解析の要素分割図

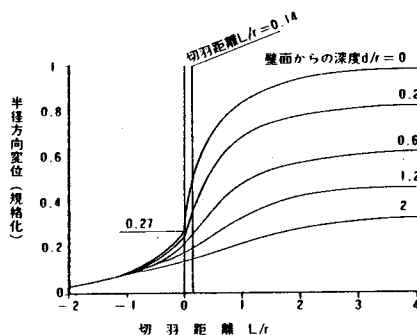


図-12 半径方向変位の分布

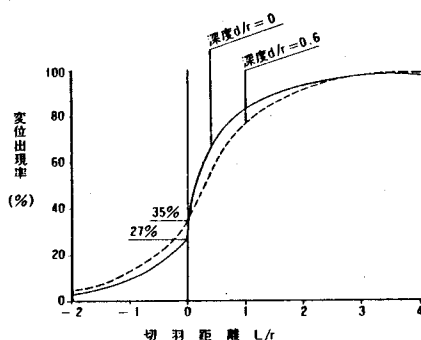


図-13 切羽距離と変位出現率

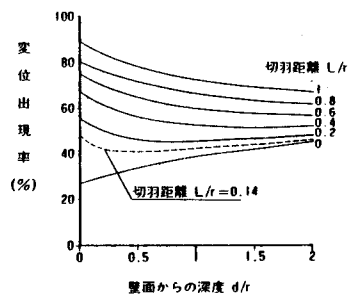


図-14 深度と変位出現率

(51) A CONSIDERATION ON THE DISPLACEMENT SURROUNDING
TUNNEL DURING THE EXCAVATION BY NATM

Susumu KOBAYASHI, Mitsuharu TAKADA (Japanese National Railways)
Tatsutoshi KONDOH, Hiroshi TSUCHIYA (OYO Corporation)

SUMMARY

The field measurements were executed to get deformations and stresses induced on the rockbolts surrounding rocks during the excavation of Shin-Usami tunnel of which rocks consists of the altered andesite of tertiary age, which was excavated by NATM with very short bench of 4m.

The measurements of deformations surrounding rocks were executed by extensometers from the tunnel wall in 8 directions and by inclinometers from the ground surface in vertical direction. From the actual results of displacement, the ratio of displacement obtained by extensometer from the tunnel wall against from the ground surface shows a remarkable difference according to the direction of displacement measurements.

In order to compare the deformation behaviors obtained from the actual results to the theoretical ones, a numerical analysis by FEM are put into practice considering the partition of tunnel face consisting the bench section and the full section. In this article, the authors show that the actual behaviors of surrounding tunnel will be similar to the theoretical one.

As a conclusion, the ratio of displacement appeared at the time that the tunnel face arrived at the measuring section against the total displacement during tunnel excavation obtained by the measuring apparatus from the ground surface will not show the same values according to the measuring directions.