

孔内水平傾斜計を用いた都市トンネルの計測管理

Measurement control of behavior during excavation at the urban tunnel by the inclinometer

河内野俊治*・横尾利治*・福田耕二**・伊東博司**・鶴原敬久**・中西昭友**

Shunji KAWACHINO, Toshiharu YOKOO, Kouji FUKUDA, Hiroshi ITOU, Norihisa TSURUHARA
and Akitomo NAKANISHI

A great deal of effort has been made on monitoring for the tunnel excavation control in the site of unhardened sediments and shallow overburden. This method is considerable important to confirm the stability of the ground.

The purpose of this paper is to propound a new technique to measure the ground behavior in advance of the tunnel face for judging the necessary of additional support.

We applied a horizontal inclinometer in the front of tunnel face. As a result, we could found the measuring method to predict the ground deformation and to avoid failure due to the ground surface settlement.

Key Words: tunnel, inclinometer, measurement

1. はじめに

近年、都市部のトンネル掘削において NATM が採用されることが多くなっている。これは、未固結層や低土被り区間における NATM 施工時の補助工法の技術的進歩によるものである。長崎県出島バイパスオランダ坂トンネルも、この典型的な例であり、トンネル起点側坑口から約 500mm 区間は未固結層が分布し、その間の土被りは、7~20m の低土被りである。トンネルルート沿いの地表面には住宅が密集しており、井戸やガス管、上下水道管等も数多く敷設されている(写真-1)。そのため、トンネルの安定性だけでなく、トンネル掘削に伴う地表面沈下・陥没、それに伴うガス管の破損・破断などを危惧した。そこで、トンネル掘削に伴う影響を早期に捉え、できる限りこれらの危険を回避するために、トンネル周辺で長期にわたり数多くの計測を行った。本論文では、トンネル天端部から切羽前方に設置した孔内水平傾斜計の測定結果を用いた計測管理の一端を紹介する。

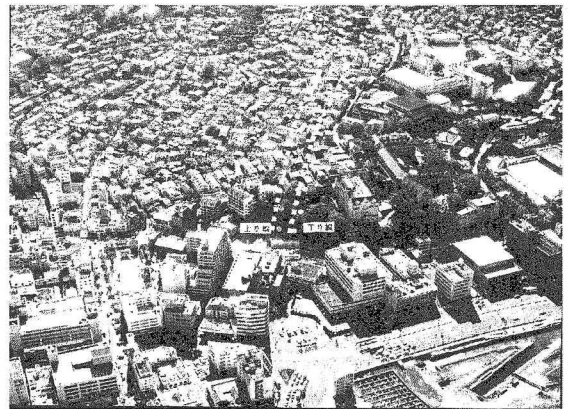


図-1 起点側坑口部全景

* 長崎県出島バイパス建設事務所建設課
**応用地質(株)

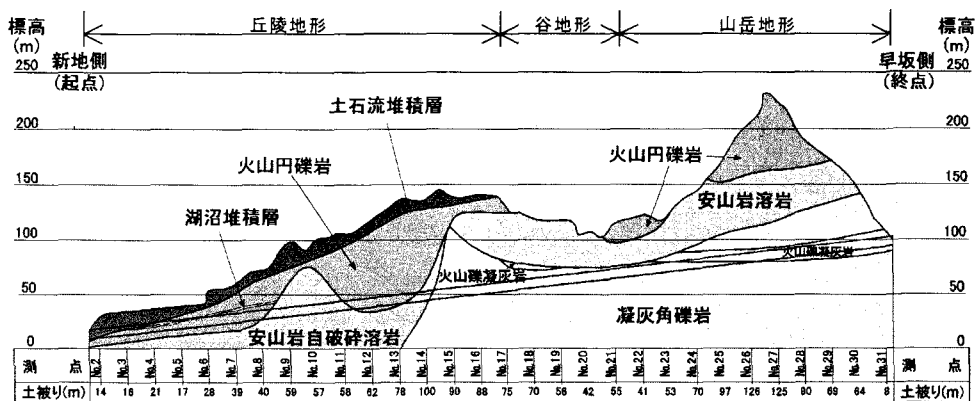


図-2 トンネル全線の地質縦断面図

2. トンネル概要

(1) 工事概要

オランダ坂トンネルは、一般国道 324 号道路改良工事(出島バイパス：全長約 4.8km)の大半を占める自動車専用の道路トンネルである。トンネルの全長は上り線 2923m、下り線 2967m の 2 車線併設トンネルであり、トンネル工事は終点側である早坂側から 2 本同時の片押し施工で進められた。

(2) 地形・地質概要

図-2 にトンネルの地質縦断面図を示す。トンネルルート上の地形は、終点側の約 1km 区間は、標高差約 230m の山岳地形であり、2km 地点にかけては比高差で約 50m の谷地形となる。起点側から約 1.5km は、標高 30m ～150m のなだらかな丘陵地形である。トンネルルートの地質は、基盤岩として長崎火山岩類の凝灰角礫岩が分布し、その上位に安山岩溶岩および安山岩自破砕溶岩などが分布する。

トンネル切羽位置の地質は、終点側から測点 No.14 までは火山礫凝灰岩および凝灰角礫岩であり、測点 No.14 から No.5 の間は、火山円礫岩層と安山岩自破砕溶岩である。測点 No.5 から起点側坑口は、火山円礫岩層、湖沼堆積層、土石流堆積層が分布し、これらの地質は固結度が低く、切羽の安定性の問題と地表面沈下による構造物等への影響が懸念された。

3. 孔内水平傾斜計による計測管理

(1) 本トンネルにおける問題点

本トンネルの起点側から約 500m の区間は、トンネル直上に住宅が密集しており、トンネル掘削に伴う地表面沈下・陥没が懸念された。そのため、早期にトンネル掘削による影響を把握するために、トンネル坑内から切羽前方に孔内水平傾斜計を設置し、計測管理を実施することとした。

(2) 水平傾斜計概要

今回使用した孔内水平傾斜計は SINCO 社製の IPI センサーである。孔内水平傾斜計の仕様を表-1 に、設置模式図を図-3 に示す。設置方法は、トレヴィマシンを用いてトンネル天端部から切羽前方に約 7° 上向きの角度で 40m 削孔し、QC ケーシングを挿入した。そして、地山と QC ケーシングの間をグラウトし、QC ケーシング内に IPI センサーを接続ロッドで繋ぎながら 2m 間隔で設置した。計測方法は、専用ロガーとソフトによる 1 時間毎の自動計測とした。

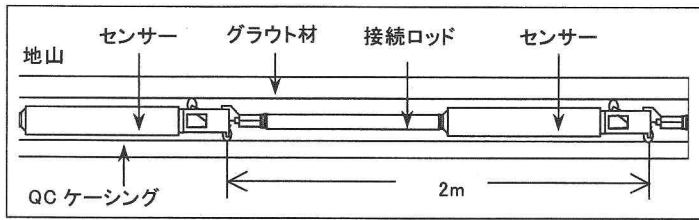


図-3 孔内水平傾斜計設置模式図

表-1 孔内水平傾斜計の仕様一覧

項目	仕様
分解能	0.024°
再現性	±0.006°
測定範囲	±10°
使用温度範囲	-15～40℃
材質	ステンレス
測定間隔	2m
センサー部	バブルセンサ

(3) 孔内水平傾斜計測定結果例

下り線測点 No.2+31 から設置した孔内水平傾斜計の測定結果を代表例として図-4 に示す。図中の変位量のポイントの形が、図中下に示した切羽位置のポイントの形と対応している。切羽の進行に伴い、変位の発生箇所が切羽前方方向に連続的に転位していくことが分かる。これは、切羽前方に生じるゆるみ範囲の進行状況を表しているものと考えられ、切羽前方の地山状況を推定する手がかりとなる。また、切羽前方を含む天端上部の沈下量を連続的に測定することを目的とした測定器であるので、切羽前方にせん断変位が発生すれば不連続な変位分布として把握することができる。

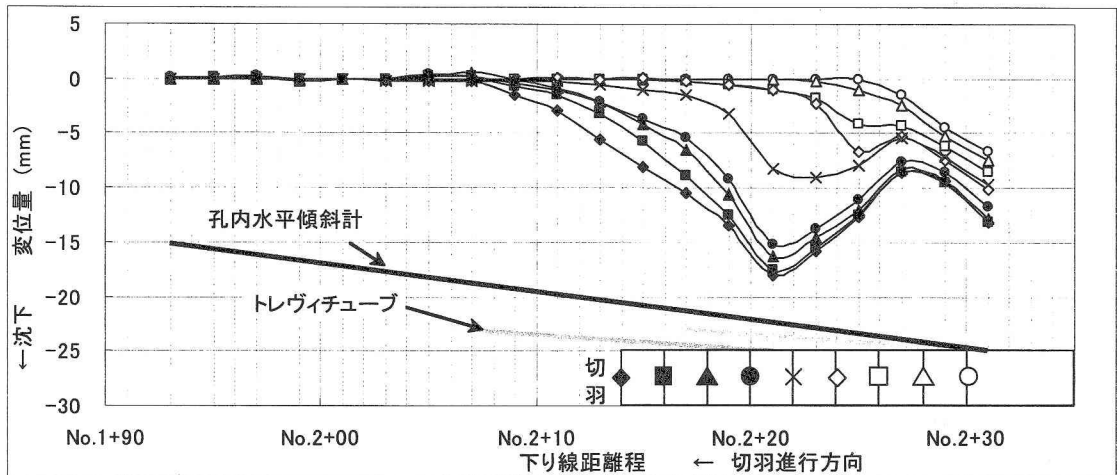


図-4 孔内水平傾斜計測定結果例(変位量のポイントの形が切羽位置の形と対応)

(4) 切羽前方におけるせん断変位の確認

孔内水平傾斜計の目的の1つとして、切羽前方におけるせん断変位の発生を早期に感知するという目的がある。図-5 に上り線切羽前方で発生したせん断変位を感知した事例を示す。切羽位置 No.3+03 の位置でトレヴィチューブ施工中に孔内水平傾斜計でせん断変位が観測され、同時刻に地表に設置した地盤傾斜計にも不連続な傾斜変化(0.7/1000rad/h)が観測された。この時、坑内ではトレヴィチューブ施工時の切羽補強対策としてファイバーメッシュ入りの鏡吹付

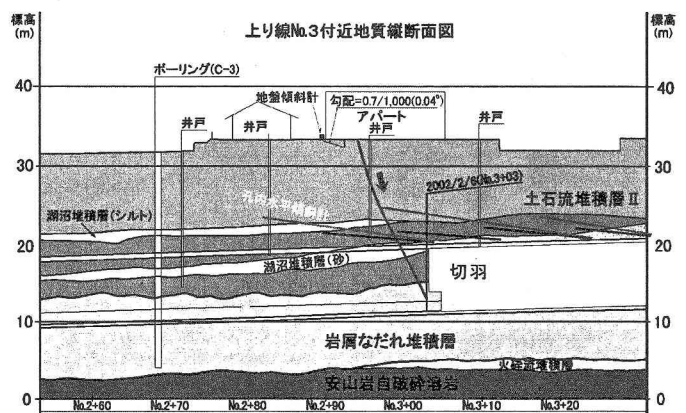


図-5 上り線 No.3 付近におけるせん断変位発生状況

けと 4m のファイバーボルトによる鏡ボルトを施工済みであったが、部分的に鏡の吹付けコンクリートの肌落ちが発生した。この時、トレヴィチューブの先端は切羽前方 4m までしか設置されていなかった。孔内水平傾斜計の測定結果からせん断変位は No.2+97 付近(切羽前方 5m 付近)で発生していることが判明したため、トレヴィチューブのラップ長を 4m から 6m に変更した。

(5) トレヴィチューブ施工法の評価検討

トレヴィチューブ施工中の孔内水平傾斜計の測定結果を図-6 に示す。左の図はトレヴィチューブを 2 分割(2 孔間隔で 2 回に分けて施工)で施工した時の沈下状況であり、右の図は 3 分割(3 孔間隔で 3 回に分けて施工)で施工した時の図である。両者を比較すると 2 分割で施工した時よりも 3 分割で施工した時の方が、沈下量が小さくなっていることが分かった。この結果から、トレヴィチューブの施工を 2 分割施工から 3 分割施工に変更した。

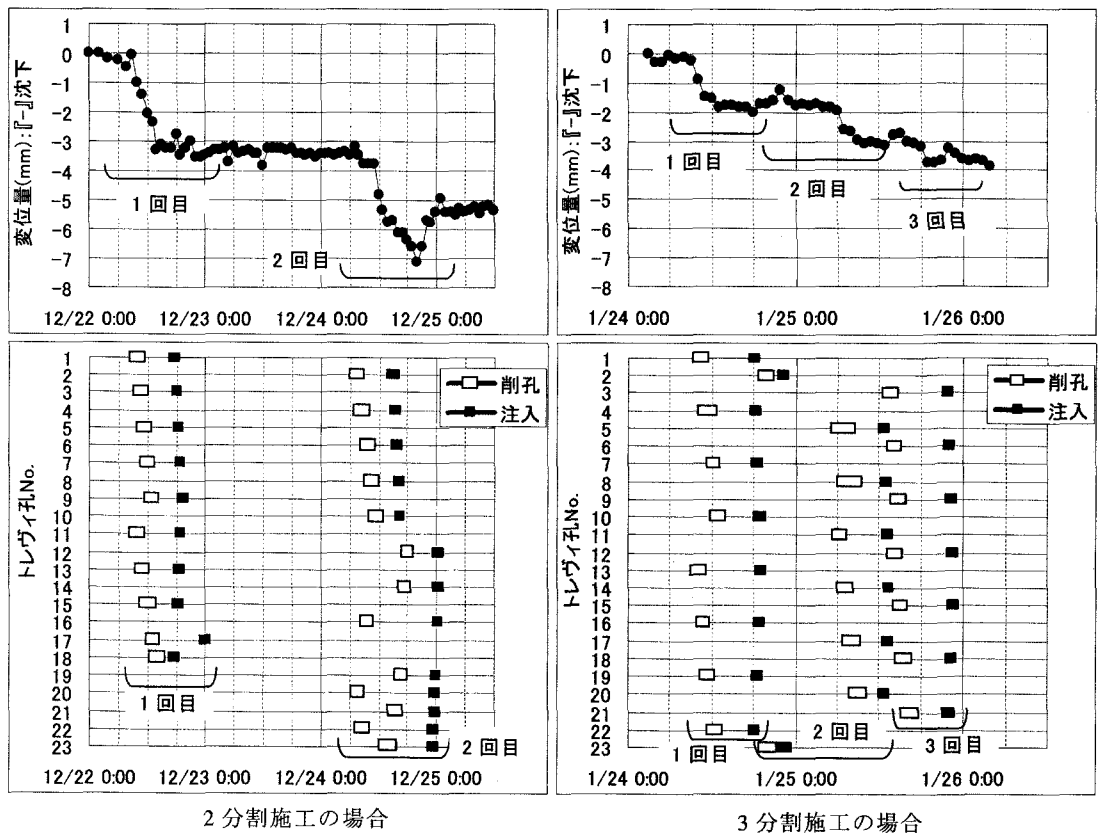


図-6 トレヴィチューブ施工サイクルの違いによる沈下量の比較

(6) 未固結地山での地山特性把握の試み

今田ら¹⁾はトンネル周辺変位に関して、以下のように述べている。図-7 は弾塑性境界までのトンネル中心からの距離 C を地山強度比(q_u/P) (q_u : 一軸圧縮強度、 P : 初期地山応力)の逆数を縦軸にとり、 ϕ (内部摩擦角)をパラメータとして示したものである。 P/q_u が 0.5 以下(地山強度比が 2 以上)の場合は塑性領域は生じないが、これを超えると塑性領域が生じるようになる。 P/q_u が大きくなると塑性領域が大きくなるが、増大の傾向は内部摩擦角 ϕ の値によって大幅に変わることを図は示している。 ϕ が小さい場合には P/q_u の増加に伴って急激に塑性領域が増大するのに対し、 ϕ が 30° 以上になると P/q_u が増加しても塑性領域がそれほ

ど広がらない。塑性領域が大きいことはトンネルの安定上問題であることを意味することから、 P/q_u が大きいほど、また ϕ が小さいほどトンネル施工が難しくなると考えることができる。このように、トンネルの安定性を検討する場合には、よく用いられる地山強度比ばかりではなく、 ϕ も考慮することが必要である。

そこで、今回は孔内水平傾斜計の測定結果から ϕ を求め、切羽前方の地山特性を把握することを試みた。

図-8 には孔内水平傾斜計により測定されるトンネル天端位置での沈下曲線の概念図を示す。トンネル掘削により、図に示すように切羽前方にゆるみ領域が広がり天端位置では沈下が生じる。さらに切羽が進行するとゆるみ領域はさらに前方に広がる。この切羽前方で沈下が発生し始める位置を計測結果から求め、切羽前方に発生するゆるみ領域を $45^\circ + \phi/2$ であると仮定して ϕ を求めた。ここで求めた ϕ は地山の ϕ ではなく、先受け工、支保工および地山を含んだものである。

下り線の測点 No.3+50 付近において、上記のようにして求めた ϕ をトンネル縦断方向にプロットしたものを図-9 に示す。図中には、孔内水平傾斜計により測定されたトンネル天端位置における最終変位量も合せて示した。

孔内水平傾斜計から求めた計測値 ϕ は、ばらつきはみられるが連続的に分布している。また、孔内水平傾斜計の最終変位量と比較すると、計測値 ϕ が小さい区間では孔内水平傾斜計の最終変位量が大き

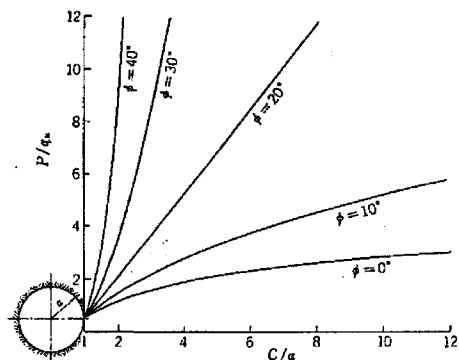


図-7 地山強度、内部摩擦角と弾塑性境界までの距離の関係

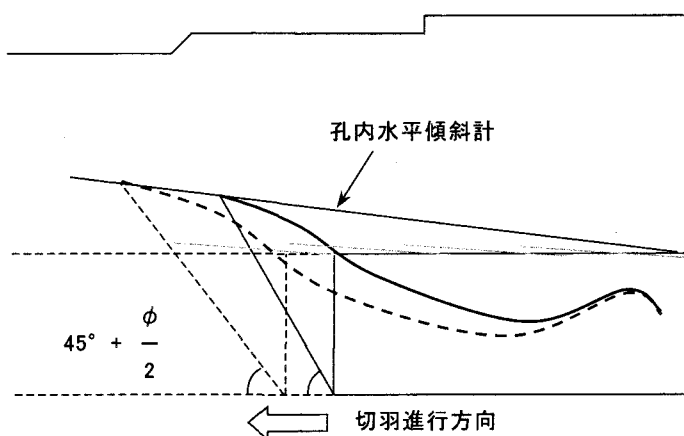


図-8 トンネル天端における沈下曲線概念図

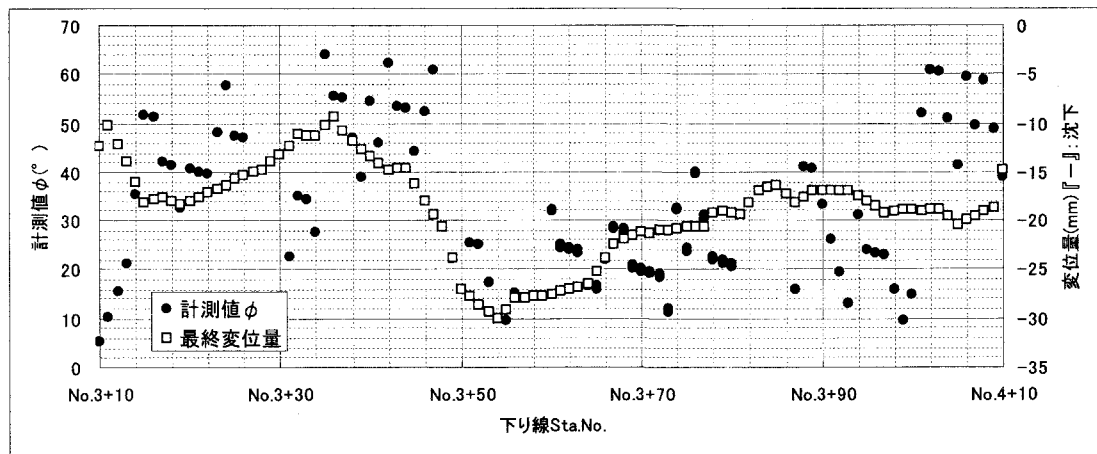


図-9 計測値 ϕ とトンネル天端位置における最終沈下量の関係

くなる傾向が見られた。このことから、孔内水平傾斜計により事前に ϕ を求めることにより、トンネル天端位置における最終変位量を推定することが可能であると考ええる。

4. おわりに

本トンネルでは、孔内水平傾斜計を用いた計測管理を行い、得られた測定結果から以下の検討を行った。

- ・ トンネル切羽前方に発生したせん断変位を観測し、トレヴィチューブの先受け長の検討を行った。
- ・ トレヴィチューブ施工中の変位量を観測し、トレヴィチューブ施工方法の検討を行った。
- ・ トンネル前方のゆるみ領域を $45^\circ + \phi/2$ であると仮定して、 ϕ を求めた。その結果、求めた ϕ の値と孔内水平傾斜計の最終変位量には良い相関があった。

以上のように、本トンネルにおいて孔内水平傾斜計の測定結果がトンネルの安全な施工に大いに役立った。今後、孔内水平傾斜計による計測管理が都市トンネルにおける標準的な計測管理手法となることを期待する。

参考文献

- 1) 高山昭・今田徹：NATM(2)NATM の支保理論、トンネルと地下、第 12 巻 2 号、p65～71、1981 年 2 月
- 2) 岡部幸彦・近藤達敏：トンネル掘削時におけるインクリノメータによる地山変位挙動計測と切羽近傍の地山物性の推定、応用地質年報、No.8 p25～41、1987 年