

(56) 土砂トンネルにおける吹付コンクリート断面力測定とその解析例

千葉県真間川改修事務所

内山千代長

清水建設 ㈱

正会員 蔵田 忠廣

㈱ 応用地質調査事務所

正会員 近藤 達敏

同上

正会員 土屋 浩

ま え が き

砂質地山に NATM を適用するに当っては、吹付コンクリート施工時の吹付圧力によって砂が洗掘されるのを防止しつつ、吹付コンクリートと地山との一体化をはかる必要がある。

筆者らは江戸川水系国分川分水路トンネルの施工に当たり、掘削に先行して鉄矢木を打設することによって、この問題の解決を試みた。鉄矢木を使用することが、吹付コンクリートと地山の一体化を阻害することも懸念されたが、吹付コンクリートの断面力測定を実施した結果、両者の間で荷重が伝達されていることが確認された。

ここでは、国分川分水路トンネルにおける鉄矢木の使用例と、カーボメータ・デフォーメータによる吹付コンクリートの断面力測定結果を紹介する。

1 工 事 概 要

国分川分水路は真間川流域の洪水流出の一部を、江戸川に直接放流する目的で図-1のように計画されている。分水路の大部分が洪積台地を貫くトンネル河川となる予定であり、この度、上流側にトンネルとしては最初の工区(延長282m)が完成した。完成区間の模式断面図を図-2に示した。土被りはトン

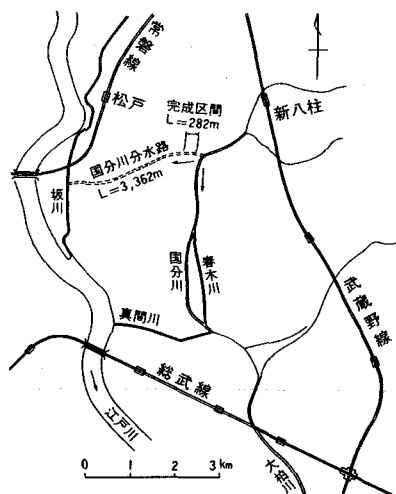


表-1 試験結果

試験項目		Ds ₁ 層	Dc ₂ 層	Ds ₂ 層
物理特性	礫 分 %	0	0	0
	粒 砂 分 %	94.3	94.1	93.5
	シルト 分 %	4.6	4.6	5.5
	粘土 分 %	1.1	1.3	1.0
	均等係数	1.6	1.6	3.1
土粒子の比重	土粒子の比重	2.76	2.72	2.75
	単位体積重量 t/m ³	1.96	1.92	1.97
	自然含水比 %	25.5	31.2	27.7
	間 隙 比	0.79	0.87	0.78
	飽 和 度 %	90.7	98.2	97.7
力学特性	N 値	25	30~50	50
	孔内載荷試験による 変形係数 Kgt/cm ²	325	2930	529
	粘 着 力 Kgt/cm ²	0	0	0
	内部摩擦角 度	36.9	41.2	42.7
	変形係数 Kgt/cm ²	300	700	772

図-1 国分川分水路の位置

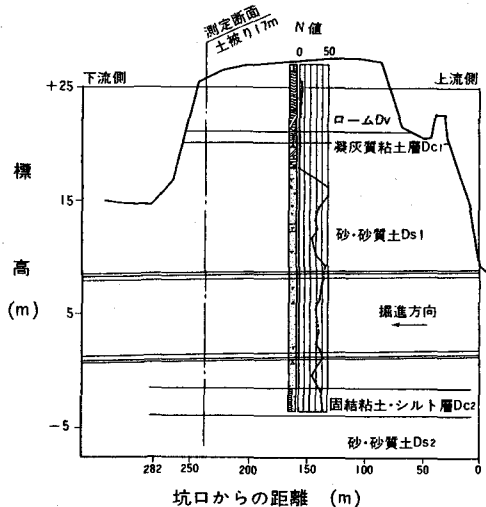


図-2 完成区間の模式断面図

ネル高さ(8.2m)のほぼ2倍(17.0m)となっており、成田層に相当する砂が分布している。土質試験および原位置試験の結果は表-1のようになっており、きわめて自立しにくい地山であることを裏づけている。

2 掘削方法

分水路トンネルの標準断面図を図-3に示した。2段ショートベンチ工法を採用して、上部半断面にカッターローダー、下部半断面にバックホーを使用した。上部半断面はリング掘りであり、また、ベンチ長は18mである。

トンネル覆工は図-4の通りであり、1次金網・1次吹付・支保工・2次金網・2次吹付・ロックボルトの順に施工した。また、本トンネル工事の特徴は、上部半断面リング部の掘削に先行して図-5のような鉄矢木を図-6のように打設したことである。鉄矢木は吹付によって1次覆工部材との一体化がはかられている。なお、鉄矢木の打設範囲とロックボルトの打設範囲とは図-3のような関係にある。

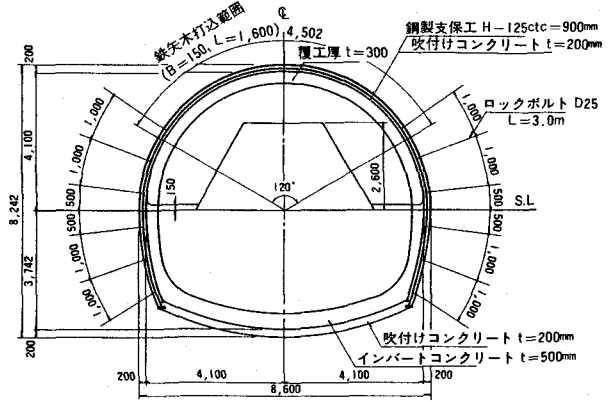


図-3 標準断面図

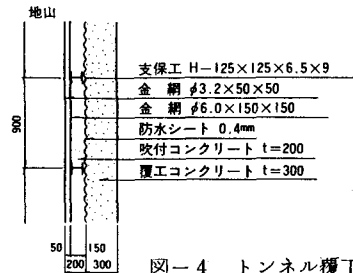


図-4 トンネル覆工の断面

3 吹付コンクリート断面力測定の方法

吹付コンクリートの作用状況を確認する目的で、吹付直後から図-7のように2種類の表面変位を測定した。2つの測点A、B間の距離Lの変化分 ℓ をデフォーメータによって測定する。また、測点A、Bを基準とする測点Cの相対的な高さFの変化分 f をカーボメータによって測定する。測定器は共に50cm当りの距離変化を、ダイヤルゲージによって0.001mm単位で測定するようになっている。

曲率 κ および軸ひずみ ϵ は次式によって算出する。

$$\kappa = \frac{8}{L^2} f \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\epsilon = \frac{\ell}{L} + \frac{8f}{L^2} e \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 e は図心軸から測点までの偏心距離であり、(2)式の第2項は、図心軸上で測定しなかったことを補正する項である。なお、 f と ℓ との符号は、距離の縮小に対して正となるように設定してある。

仮に、吹付コンクリートの剛性が一定であるものとすれば、上式の κ および ϵ に剛性を乗ずることによって、曲げモーメント M および軸力 N を得ることができる。しかし、吹付コンクリートの場合は若材令の内に受ける変形量が大きいために、弾性係数 E の変化を無視することは適切でない。

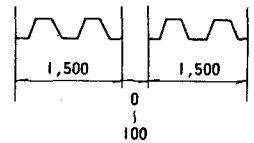


図-5 鉄矢木の形状

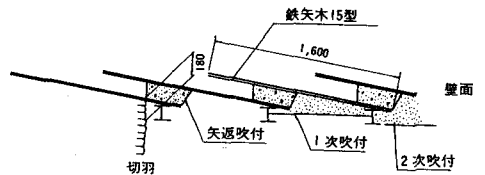


図-6 鉄矢木の打設

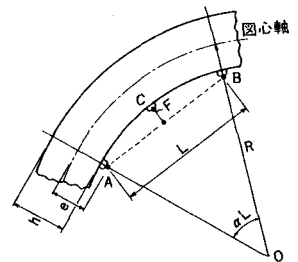


図-7 表面変位の測定

そこで、吹付コンクリートの材令毎に弾性係数 E_j を求め、その期間の曲率増分 $\Delta \kappa_j$ 、軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon_j$ に乗することによって曲げモーメント増分 ΔM_j 、軸力増分 ΔN_j を求めることにした。

$$\Delta M_j = E_j I \cdot \Delta \kappa_j \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\Delta N_j = E_j A \cdot \Delta \epsilon_j \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

なお、断面積 A 、断面 2 次モーメント I としては、各測点で実測した吹付厚の平均値 (24 cm) を用い、トンネル軸方向の単位厚さを 1 cm として算出した。曲げモーメント M 、軸力 N としては、上式の増分を積算して算定した。

$$M = \sum_j \Delta M_j \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$N = \sum_j \Delta N_j \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

4 吹付コンクリート断面力測定の結果

吹付コンクリートの一軸圧縮試験結果を図-8 に示した。これから、弾性係数 E (Kg/cm^2) と材令 d (日) との関係を表次式で表わすことにした。

$$E = 50,000 \times (2 - e^{-0.5d}) \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

次に、測定した 2 2 測点の内、軸ひずみが比較的大きい左肩部における軸ひずみの経過は図-9 のようになっている。経過日数を吹付時から起算すると、初期値測定は 1.3 日、掘削の再開は 2.2 日であった。そして、経過日数 5.6 日における軸ひずみ ϵ は 1.43×10^{-6} となり、前述した方法で軸力 N を求め、吹付コンクリートに生じている圧縮応力 σ を算定したところ $1.03 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ となった。このようにして算定した応力が妥当であるか否かを確認するために、別に採取した吹付コンクリート試料に図-9 と同じ経過で軸ひずみを与え、その時の圧縮応力を読みとった。これを軸ひずみ再現試験と呼んでいる (桜井・進士、1982)。

図-10 に軸ひずみ再現試験の結果を示した。材令 6 日目のひずみ調整前における軸ひずみは 1.32×10^{-6} 、圧縮応力は $9.2 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ であった。これを軸ひずみ 1.43×10^{-6} に調整したところ、圧縮応力は $12.4 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ まで上昇した後、応力緩和によって徐々に低下し、 $11.4 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ で安定した。現場のこの測点における 5.6 日目の応力は $1.03 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ と算定されているので、両者は 10 % の精度で一致する。

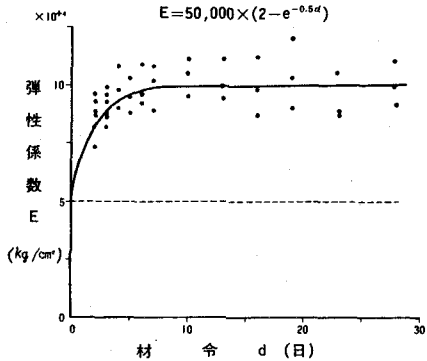


図-8 吹付コンクリートの弾性係数

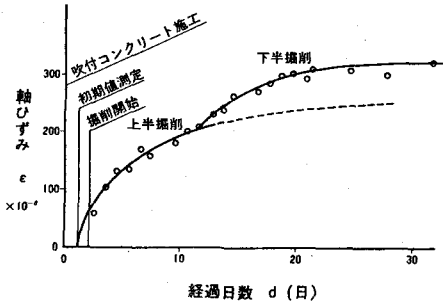


図-9 軸ひずみの経過

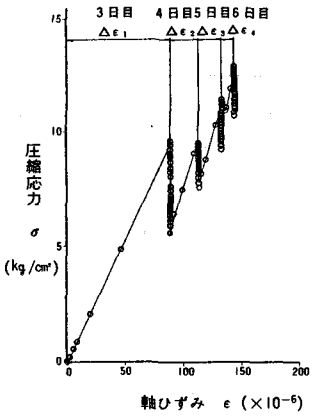


図-10 軸ひずみ再現試験の結果

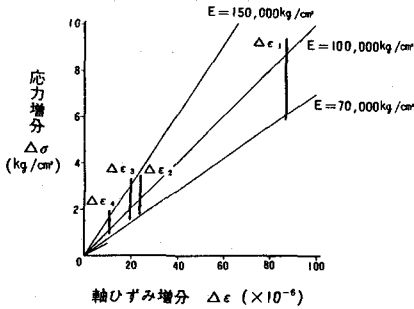


図-11 軸ひずみ再現試験の増分表示

なお、軸ひずみ再現試験の結果を増分形で整理し直すと図-11のようになり、これから弾性係数を評価すると70,000~100,000 Kg/cm²前後の値になる。

このようにして求めた曲げモーメントMの分布を図-12に示した。上半断面が掘削された段階では、天端付近に正のモーメント、左右の下端付近に負のモーメントが発生している。ところが、下半断面が掘削されると、天端付近にも負のモーメントが発生し、左右の下端付近における負のモーメントは増々大きくなっている。この断面における内空変位量は2.1mmの縮小を示しており、2つの測定結果を合わせると、上半断面の壁面の挙動が明確に把握できる。

一方、吹付コンクリートの軸力Nを応力 σ に換算すると図-13のようになる。左肩部(測点5)の極大値は18.8 Kg/cm²、天端部(測点12)の極大値は17.4 Kg/cm²に達している。また、右側下端の応力は、下半断面の掘削後に低下している。

5 吹付コンクリート・地山間の荷重伝達

測定区間(長さ50cm)相互の力の釣合いを図-14のように考え、吹付コンクリートが地山から受ける外力として、半径方向応力Pおよび接線方向応力Tを次式で算定した。

$$P_i = \frac{N_i}{R} - \frac{1}{L^2} (M_{i-1} - 2M_i + M_{i+1}) \dots \dots (8)$$

$$T_i = \frac{1}{2L} \{ N_{i+1} - N_{i-1} + \frac{1}{R} (M_{i+1} - M_{i-1}) \} \dots (9)$$

ここに、iは測点番号、Rは曲率半径(422cm)である。5月18日の測定値から2つの応力P、Tを求め、その作用方向を図-15に示した。吹付コンクリートが地山から受ける応力は、半径方向だけでなく接線方向にも大きくなっており、地山との付着が充分得られていることを示している。

本工事に当っては、(財)国土開発技術センターに委託した国分川分水路トンネル工法検討委員会(福岡正巳委員長)の御指導を得た。ここに記して謝意を表する。

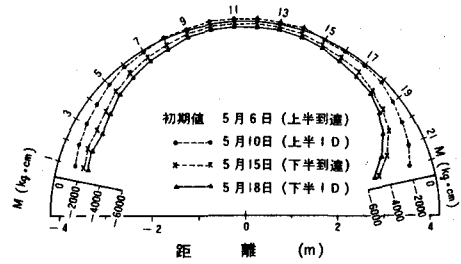


図-12 曲げモーメントMの分布

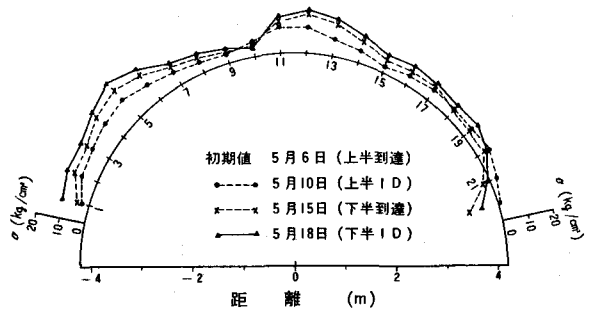


図-13 圧縮応力 σ (N/A)の分布

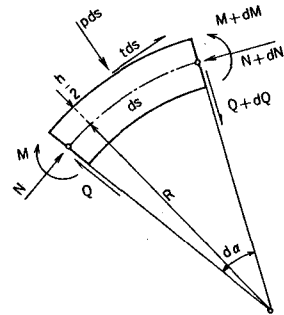


図-14 測定区間相互の力の釣合い

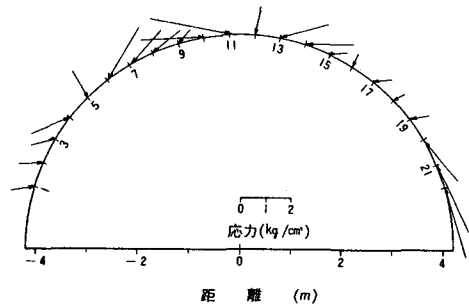


図-15 地山から作用する応力の方向

(56) Examples of Measurement and Analysis of Stress On Shotcrete

Tunnel Walls in Sandy Ground

Chiyohisa Uchiyama (Office of the Chiba
Prefectural Government, Civil Engineering Division)
Tadahiro Kurata (Shimizu Construction Co. Ltd.)
Tatsutoshi Kondoh (OYO Corporation)
Hiroshi Tsuchiya (OYO Corporation)

Abstract

When using NATM in sandy ground, it is necessary to continually prevent erosion of the ground when concrete is sprayed and insure the successful adherence of the concrete.

The authors attempted to deal with these problems in the construction of a large water conduit by driving steel sheet piles into the ground before excavation. It was feared that the use of the sheet piles would weaken adherence between the shotcrete and the natural ground. However, measurement of stress on the shotcrete established that the load was born by both the shotcrete and the ground.

This paper describes the use of the steel sheet piles and the measurement of stress on the shotcrete by a Curvometer and a Deformeter.