

圧力トンネルにおける吹付コンクリートライニングの耐圧特性に関する現場実験

電源開発(株) 箱 嶋 千 造, 窪 田 賢次郎, ○柏 柳 正 之

1. 概 要

吹付コンクリートはNATMの主要部材として多くのトンネルで実績があり、水路トンネルにおいてはNATMは在来工法と比較して次のような特長をもつ。

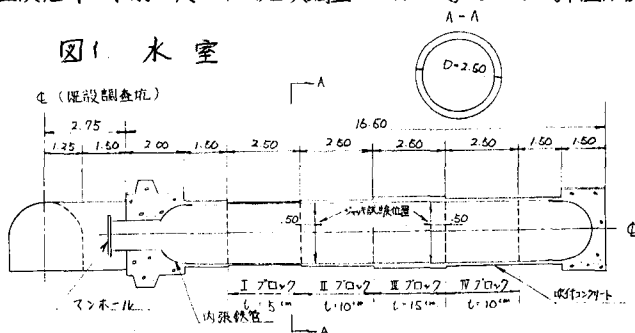
- 1) 支保部材と地山との密着が良く空隙がないことにより、モルタル注用量が少なくなる。
- 2) 地山のゆるみ領域が小さくなり、内圧に対する地山負担を大きくすることができる。

上記の特長は吹付コンクリートの特長に負うところが大きいと考えられ、地山状態によっては吹付コンクリートだけの覆工で圧力トンネルとしての機能を有するのではないかと考えられる。そこで吹付コンクリートで覆工したトンネルの耐圧特性に関する現場水室試験を実施した。

2. 試験水室および方法

2-1 水 室

試験水室は、電源開発(株)を電所予定地点調査横坑内に事前に実施した地質調査の結果を考慮して、弾性係数の異なる2地点に1室ずつ製作した。No.1水室およびNo.2水室は同形であり、図1に示すように外径2.50mの水平トンネルを吹付コンクリートの厚さおよび施工時期により4ブロックに分けた。水室地点の地質は輝緑凝灰岩より構成され、No.1では油目の発達した不良な部分が多く、No.2では不良な部分は少ない。各ブロックにはそれぞれ表1に示す測定計器を設置した。



水室の製作手順は次のようである。

- 1) 水室横坑掘削および掘削面の地質状況観察
- 2) Ⅱブロックに計器を設置し、吹付コンクリート($t=10\text{cm}$)を施工
- 3) 平板載荷試験の実施
- 4) 水室の奥に鉄管を設置し、コンクリートを打設
- 5) Ⅰ～Ⅲブロックに計器を埋設し、所定厚に吹付コンクリートを5cmずつに分けて施工
- 6) 水室の入口に鉄管を設置し、コンクリートを打設
- 7) 水室内に内空変位計および水圧計を設置

試験概要を図2に示す。

2-2 平板載荷試験

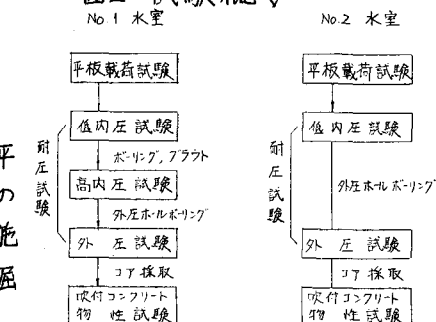
水室坑掘削後、岩盤の変形特性を把握するため各水室の2ヶ所で平板載荷試験を行った。平板載荷試験は通常掘削によって緩んだ岩盤の表層を除いて行うが、今回は掘削後すみやかに吹付コンクリートを施工したトンネルの挙動を明らかにすることを目的としているため、掘削後の状態のままで平板載荷試験を行った。

表1. 測定計器

名 称	型 式	測定範囲	測定精度	数 量
岩盤変位計	特 注	0～4mm	0.003mm	4
閉ゲキ水圧計	BP-20KC	20% $\pm$	0.05%	4
コンクリート変位計	BS-8B	$\pm 1000 \times 10^{-6}$	1.5×10^{-6}	8
内空変位計	BJ-5A	0～8mm	0.01mm	2
水 圧 計	BP-20KC	20% $\pm$	0.05%	1

注) 数量は、各ブロック当たりである。*は1室当たりである。

図2. 試験概要



2-3 耐圧試験

(1) 内圧試験

内圧試験はグラウト施工前に行う低内圧試験およびグラウト施工後に行う高内圧試験を行なった。加圧装置は2台のグラウト用ポンプ(最大圧力30MPa)を組み合わせたものであり、合わせて漏水測定用として自記流量圧力計(能力0~300 μ m/min)を設置した。加圧は図3に示すように行い、所定圧力载荷後1分目、10分目の2回、クリップ载荷時は8時間ピッチでそれぞれ吹付コンクリート歪、岩盤変形量、内空変形量、内外水圧および漏水量の測定を行った。

(2) 外圧試験

外圧試験はグラウトの施工時および放水時のトンネルの安全性の確認のために行った。加圧は次の3つの方法で行った。

- 1) 水室内各ブロックごとに8ヶ所のグラウトホールを前孔し、それぞれのホールから同時に加圧。
- 2) 1)と同様な方法で、各ホールごとに加圧。
- 3) 内水圧を急激に減圧することにより残留する外水圧により加圧。

図3 载荷圧力

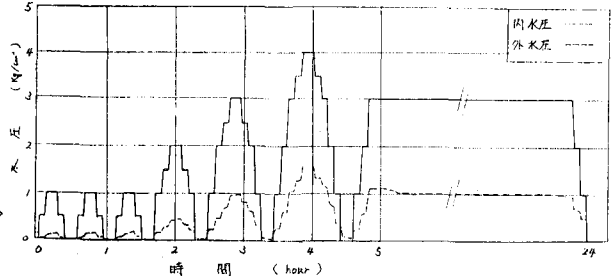


図4 吹付コンクリート応力

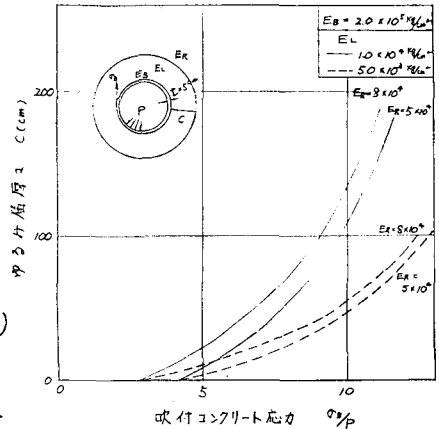
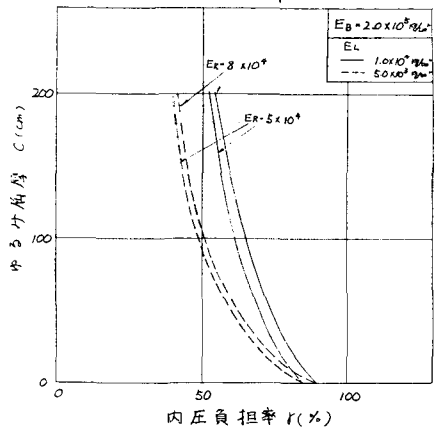


図5 岩盤内圧負担率



3. 試験結果 および 考察

3-1 理論計算

水室の力学的挙動を明らかにするためOtto-Frey-Bearの式を用いて吹付コンクリートおよび岩盤の応力を算出した。図4, 5は計算例で、ここに E_B , E_L , E_R はそれぞれ吹付コンクリート、ゆるみ層、地山の弾性係数、 C はゆるみ層厚、 μ は吹付コンクリート厚、 P は内圧および B は吹付コンクリートの円周方向応力を示す。また、岩盤内圧負担率(%)は $\sigma = 1 - \sigma_B / (PD/2t)$ (D は水室直径)より求めた。

図より、吹付コンクリート応力あるいは内圧負担率は地山の弾性係数よりゆるみ層厚およびゆるみ層の弾性係数の影響を強く受けることがわかる。よって、たとえばNATMのようにトンネル掘削後すみやかに吹付コンクリートと施工し地山のゆるみを最小限におさえられる工法は、周辺地山の強度を積極的に利用でき強度的に有利であり、経済的な水路トンネルを構築することができると考えられる。

3-2 平板载荷試験および吹付コンクリート物性試験

(1) 平板载荷試験

弾性係数は65 μ m/載荷で両室とも約27,000 μ m²であった。1か、No.2の試験位置には局部的に小さな断層があり全体的な弾性係数はNo.2水室の方が大きいものと考えられる。また、以上の値は事前の孔内載荷試験の値よりかなり小さい。

(2) 吹付コンクリート物性試験

各水室から採取した径5cmの吹付コンクリートコアにより表2に示す試験を実施した。吹付コンクリートの配合は $W/C=50\%$ 、 $C=350\text{kg}$ で、No.1水室では湧水があったので急結剤の量を多くした。

超音波伝播速度は、1局吹付の場合($t=5\text{cm}$)と3局吹付の場合($t=15\text{cm}$)を含めてNo.1, No.2水室でほぼ等しかった。これは各局間に欠陥がないことを示しており、多局吹付の場合でも全局が一体化した良好な吹付が可能であると考えられる。圧縮強度は同一配合の打設コンクリートと比較して小さく、静弾性係数も小さく、柔なコンクリートになっている。透水係数は一般的な地山の透水係数より小さく、十分な遮水性をもつ。

3-3 耐圧試験

(1) 内圧によるトンネルの挙動

水室に内圧を作用すると、吹付コンクリートを通してトンネル外にも水圧が発生する。これを外水圧とし、さらに内水圧と外水圧の差として実作用圧を定義する。

図3は内水圧(実線)と外水圧(破線)の時間変化の一例を示す。外水圧は内水圧によく追従しており遅延時間は1~2分程度であり、その大きさは内水圧の30~60%程度であった。また、内外水圧の比は、内水圧2%のとき20%、4%のとき40%であり、これは内水圧の増加に伴い吹付コンクリートのクラックが発達したためと考えられる。

図6は実作用圧とコンクリート歪より算出したコンクリート応力(コンクリートの弾性係数 $2.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$)の関係の一例を示す。これより、作用内圧3% (0.9MPa) 実作用圧が約2%の境において応力へ作用圧の関係が変化しているのが認められ、これは吹付コンクリートにクラックが発生したためと考えられる。このときの吹付コンクリート応力は 0.5kg/cm^2 と物性試験で得た引張強度 29kg/cm^2 よりも小さな値であり、これは水室内面の凹凸のため応力集中が起こったものと考えられる。よって、トンネルボーリングマシン等で掘削面を滑らかに仕上げることであれば応力集中がなくなり、吹付コンクリートの強度を有効に利用できる。

(2) 外圧によるトンネルの挙動

グラウトホールからの加圧は、圧力1%および3%で行なったが、3%加圧時に天端付近で一部クラックの発生が見られた。これは天端付近での吹付コンクリートが、施工性の悪さのため他の部分に比べて薄くなっていることも影響していると考えられる。一般に、圧力トンネルでは設計内圧の2倍程度のグラウトを施工するが、今回の実験ではグラウト圧3%程度まで安全性が確認されたことになる。

図7は内圧急除荷による外水圧の時間変化を示し、図で右側は経過時間2分以後の拡大図である。外水圧は内圧に応じて初期の値は異なるが、減圧後2分程度で急激に消散する。このとき外水圧による吹付コンクリートの大きな破壊は認められず、排水時におけるトンネルの安全性が確認されたものと考えられる。

表2 吹付コンクリート物性

試験項目	No.1 水室	No.2 水室
比重試験	2.32	2.35
超音波伝播速度試験		
P波速度(m/sec)	3,810	3,910
S波速度(m/sec)	2,310	2,340
動弾性係数(kg/cm^2)	3.07×10^5	3.19×10^5
ポアソン数	0.21	0.21
一軸圧縮試験		
一軸圧縮強度(kg/cm^2)	307	318
静弾性係数(kg/cm^2)	1.99×10^5	2.30×10^5
ポアソン数	0.26	0.23
圧裂試験		
引張強度(kg/cm^2)	29	33
透水試験		
透水係数(cm/sec)	4×10^{-8}	

図6 吹付コンクリート応力

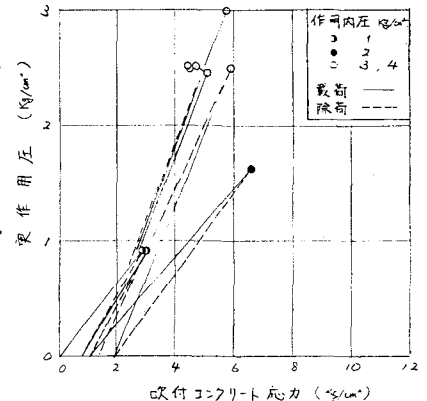
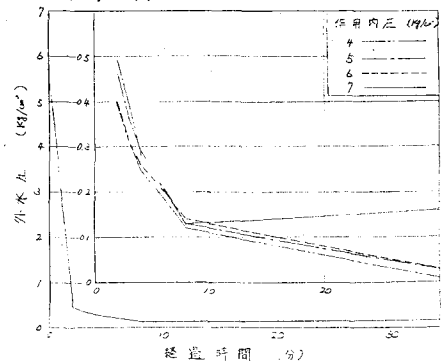


図7 外水圧



(3) 施工時期がトンネルに及ぼす影響

図8は横方向変位と縦方向変位と掘削後ただちに吹付コンクリートと施工したIIブロック(破線)とそれより約1ヶ月後に吹付コンクリートを施工したIIブロック(実線)で比較したものである。掘削後の地山のゆるみは天端付近で顕著であると考えられるが、図ではIIブロックの結果(実線)にゆるみの影響を認めることができる。

図4では岩盤の弾性係数が $5.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ から $8.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ に変化しても吹付コンクリート応力は10%程度しか改良されなれど、図8の結果ではゆるみをおさえることにより変位を50%程度も減少させることができる。すなわち、トンネルに及ぼす影響は、地山の弾性係数によるものよりトンネルの掘削法およびその後の処理によるもののほうが大きいと考えられる。

3-4 漏水

図9はグラウト前後における水室全体での漏水量の比較を示す。グラウトにより漏水量が約 $\frac{1}{3}$ となっている。

この漏水量を透水係数に換算すると水室および岩盤では 10^{-5} オーダーである。また、水押テストによる岩盤の透水係数も 10^{-5} オーダーでありほぼ一致した。一方、吹付コンクリートの透水係数は 10^{-8} オーダーであり、このことは水室からの漏水が実際はコンクリートのクラックを通していていることを示す。今回の結果ではグラウト後の漏水量はトンネル100m当り280 $\frac{\text{kg}}{\text{min}}$ であり、吹付コンクリートにクラックのない理想的な状態では $\frac{1}{100}$ 程度となり、漏水に関しては吹付コンクリートの施工法等の改良により吹付コンクリートのみの覆工で十分実用性のあるトンネルとなる。

図8. 内空変位

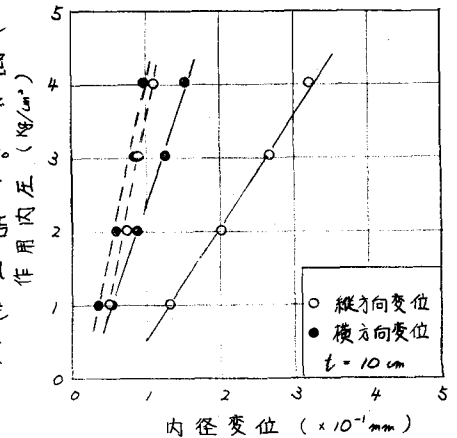
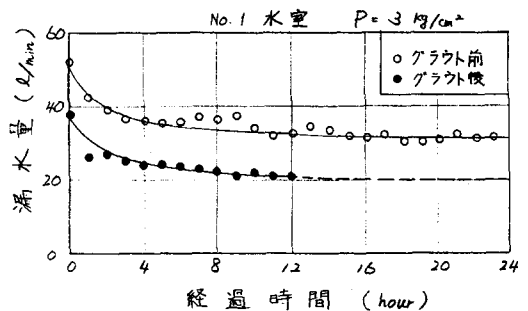


図9 漏水量



4 まとめ

吹付コンクリートで覆工したトンネルの内外圧に対する挙動を調べる目的で実施した水室試験より明らかになったことを列記すると以下のとおりである。

- 1) 内圧に対する吹付コンクリートおよび周辺地山の挙動は地山のゆるみ状態が大きく影響し、掘削後すみやかに吹付コンクリートを施工したトンネルはゆるみが少なくなり岩盤負担も大きくなる。
- 2) グラウトの効果は、周辺地山の透水性を改良する他、地山の特性も改良され内圧に対する岩盤負担の増加にも効果がある。
- 3) 吹付コンクリートの透水性は打設コンクリートに比べて多少劣るが、クラックの発生を減少させることにより水路トンネルとしての機能は確保できる。

In-situ Experiment on Characteristic of Shotcrete for Pressure Tunnel

Dengen Kaihatsu C.C. S.Hakoshima K.Kubota M.Kashiwayanagi

Shotcrete which is the main supporting member of NATM is advantageous in terms of sharing the inner pressure with surrounding bedrock because of the good attaching. Thus, if pressure tunnels can be lined by only the shotcrete, construction of the tunnels will be advantageously achieved in both economic-wise and strength-wise. Along the said line, in-situ experiment has been performed and the behavior of the tunnel lined by shotcrete was analysed under conditions of inner and/or outer pressure.

The analysis resulted in indicating that shotcrete is effective as a lining for pressure tunnel.