

岩盤内トンネル配水池の湛水時における 変形挙動の計測と評価

桜井春輔¹・芥川真一²・数原麗香³・徳山武⁴・湊隆⁵

¹正会員 工博, Ph.D. 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 Ph.D. 神戸大学助手 都市安全研究センター (〒657神戸市灘区六甲台町1-1)

³非会員 工修 (株)長大 大阪支社 (〒550大阪市西区新町2-20-6)

^{4,5}非会員 神戸市水道局技術部 (〒650神戸市中央区加納町6-5-1)

NATMにより岩盤内トンネル配水池を建設し、供用前にその一部を利用した湛水試験を実施した。湛水に伴うトンネルの挙動を詳細に計測・分析した結果、覆工コンクリートは表面に塗布したコーティング材を通過した水分の浸入により不均一に膨張していることが分かった。設計時には、覆工コンクリートには自重と貯留水の水圧だけが作用すると仮定している為、不均一な膨張挙動により応力・ひずみ分布がどの程度の影響を受けたかを推定するために、水圧、温度変化、吸水膨張、地山反力を考慮した逆解析手法を開発し適用した。その結果、不均一な吸水による膨張挙動によって生じるひずみは、水圧によるそれよりはるかに大きく、覆工コンクリートの変形挙動に大きく影響を及ぼしていることが判明した。

Key Words : tunnel reservoir, expansion, moisture transfer, back analysis, allowable tensile strain

1. はじめに

NATMにより掘削されたトンネル形式の配水池において上水を貯留する場合、湛水によって2次巻きとしての覆工コンクリートにひずみが発生する。その原因は通常、水圧、温度変化の2つであると考えられることが多い。この時、覆工コンクリートの変形挙動は地山側からの拘束の状態に依存する。しかし、その大きさおよび分布は吹付けコンクリートの凹凸度、防水シート^{1)~3)}の有無などに依存するため、これを精度良く予測することは非常に困難であることが知られている^{4)~6)}。また、トンネル形式の配水池の挙動に関しては、覆工打設直後数日間の挙動に関する報告⁷⁾はあるもの、十分な乾燥期間の後に実際に湛水した時の挙動に関する報告はほとんどないのが現状である。

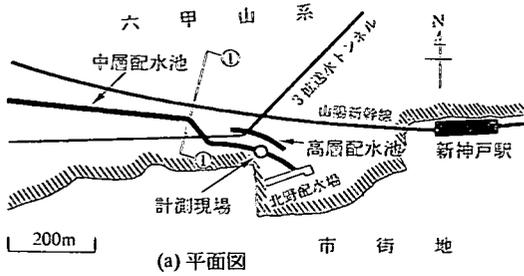
そこで、本研究では供用に先駆けて完成したトンネル配水池の一部分を利用して、湛水時にトンネルが示す実際の変形挙動を詳細に計測し、変形のメカニズムとその要因を明らかにすることを試みた。その結果、湛水試験を開始して数時間後から、防水目的で塗布されたコーティング材を透過した水分が覆工コンクリートに浸入することにより不均一な膨張ひずみが発生していることが判明した。また、この

膨張ひずみは水圧、温度変化によるものに比較してはるかに大きいものであること、さらに、実測された覆工コンクリートの変形過程における地山からの拘束は比較的希少であることなどが、現場計測結果の分析および逆解析によって明らかとなった。このような結果は、NATM形式のトンネル配水池の湛水時挙動に関する新しい知見を与えるものであり、本論文はその詳細について述べたものである。

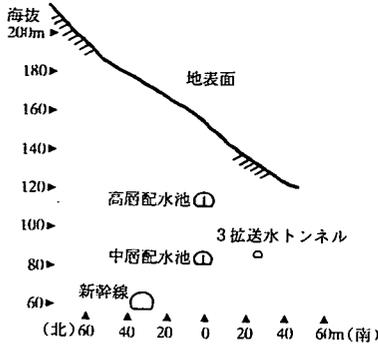
2. 現場の概要と計測及び湛水試験の方法

(1) 現場の概要と計測項目

神戸市水道局が平成元年から7年度にかけて推進した、北野浄水場整備事業の概要を図-1に示す。計画している全長約900mの配水池トンネル(中層配水池)のうち、北野配水場側の約180mが平成6年3月までに完成し、供用前に湛水試験を実施することとした。湛水試験を実施したトンネルの断面を図-2に示す。本トンネルは上水の貯留を目的とし、維持・管理用に設けられたトンネル中央部の隔壁を介して左右2つの貯水槽(以後、簡単のためそれぞれ左側、右側と呼ぶ)を持つ鉄筋コンクリート構造である。満水時の水位は約3.6mである。計測断面は坑口から約70m付近に位置し(図-1(a)参照)、周辺岩盤は、



(a) 平面図



(b) 断面図①-①

図-1 北野浄水場整備事業の概要

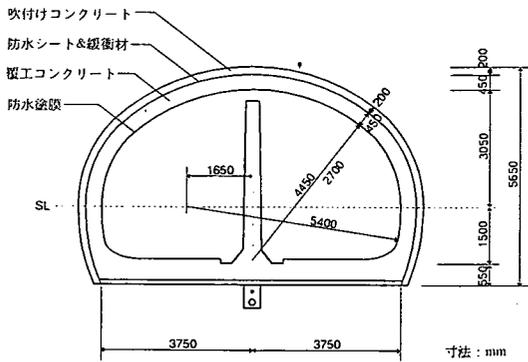
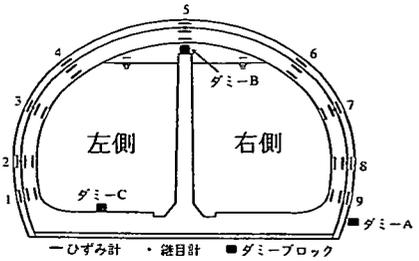
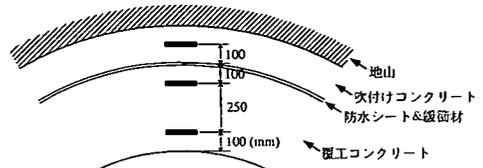


図-2 トンネル配水池の断面図

主に布引花崗閃緑岩である。本トンネルはNATMで施工され、計測断面を含む区間ではフォアパイル工法を併用し全断面で掘削された。吹付けコンクリート（厚さ約200mm）施工後、地山の変形が終了した時点で、地下水の流入防止とコンクリート層間の分離機能を兼ねて、防水シート及び緩衝材（合計厚さ約3.4mm）を吹付けコンクリート表面に配置した後、覆工コンクリート（厚さ450mm）を打設した。覆工および吹付けコンクリートの配合を表-1に示す。さらに、表面保護と貯留水の覆工への浸入を防止する目的でコーティング材（エポキシエマルジョン樹脂塗料）を覆工コンクリート表面に塗布した。塗装膜厚はアーチ部で0.145mm、インパート部で0.170mmとした。図-3に計測器の配置を示す。底盤部を除い



(a) 計測器の配置概略図



(b) ひずみ計配置の詳細図

図-3 計測の概要

表-1 配水池トンネルにおけるコンクリートの配合

コンクリートの種類	セメントの種類	最大寸法 (mm)	スランプト比 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
覆工	高炉セメントB種	20	10	54	44.5
吹付け	普通ポルトランドセメント	15	8	55	60

コンクリートの種類	単位量(kg/m ³)				
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
覆工	311	168	792	1,000	0.778
吹付け	360	198	1,015	684	19.8

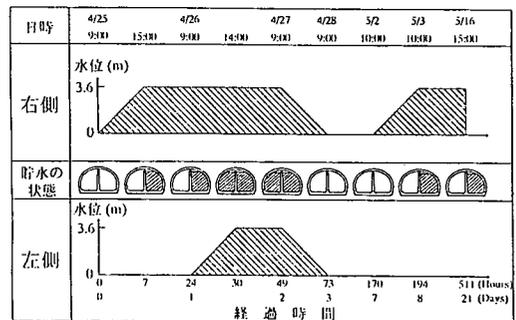


図-4 水位の変動履歴

た9ヶ所（測点1~測点9）にひずみ計を3個ずつ（覆工コンクリート内2個、吹付けコンクリート内1個）埋設した。

覆工コンクリートと吹付けコンクリートの間の開閉度を計るため継目計を図-3(a)に示す5ヶ所に設置した。さらに、ひずみ計のドリフトに対する参考データ収集のため最大辺長約20cmのコンクリートブロックにひずみ計を埋設し無応力状態としたものを吹付けコンクリート背部、中壁上部および左側底部に設置した。なお簡単のため、これらのダミーブロックを以後ダミーA、ダミーB、及びダミーCと呼ぶ。な

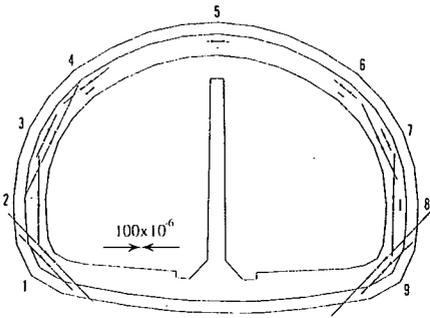


図-5 湛水試験開始までに発生した乾燥収縮ひずみ

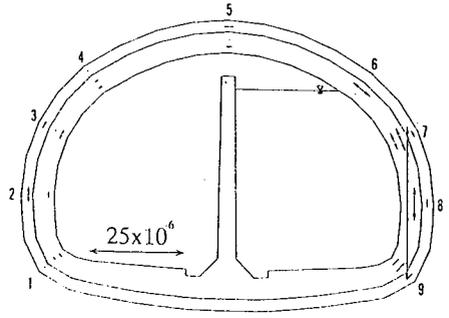


図-7 左側注水直前における計測結果 (T=24時間)

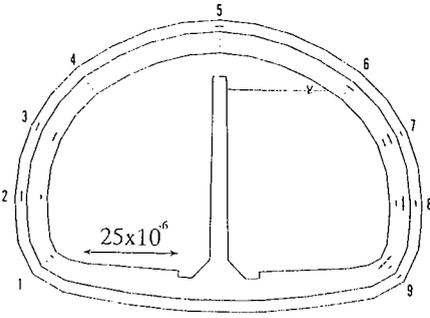


図-6 右側注水完了時の計測結果 (T=7時間)

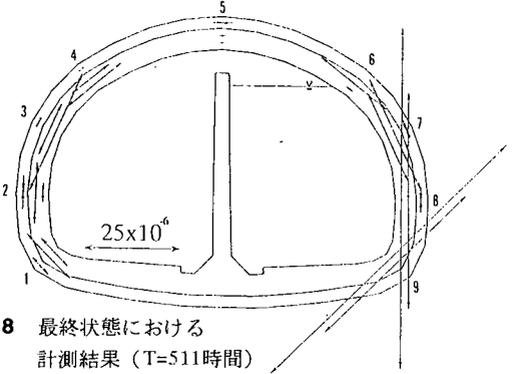


図-8 最終状態における計測結果 (T=511時間)

お、すべての計測器には測温機能を有するものを用いた。

(2) 湛水試験の概要

覆工コンクリート打設後約1年2ヶ月にあたる平成6年4月25日午前9時（この時を経過時間T=0とする）から約3週間かけて湛水試験を実施した。まず、右側を約7時間かけて満水とし、その水位を49時間後まで保持した。左側は、24時間後からおよそ6時間かけて満水とし、その水位を同じく49時間後まで保持し、右側と同時に約24時間かけて排水した。その後、右側のみ170時間目から24時間かけて満水としその状態を保持したまま計測を511時間目まで継続した。この間の、水位の履歴を図-4に示す。また、湛水試験を通じて覆工コンクリート内の温度変化は、最も大きい箇所（測点2の内側）で2.1℃（上昇）であった。

3. 覆工コンクリートの挙動

本節では湛水試験中に観測された覆工コンクリートの挙動について分析する。まず、覆工コンクリート打設後、湛水試験開始までに生じた乾燥収縮量を

確認する。続いて、湛水試験を開始してからの挙動を分析し、水圧による力学的挙動に比べ、不均一な膨張挙動が覆工コンクリートの変形挙動の主要因となっていることを示す。

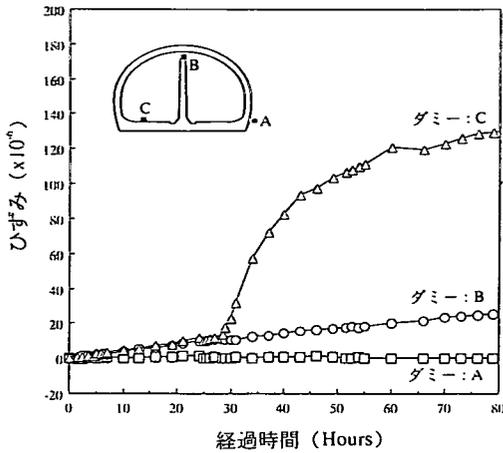
(1) 湛水試験開始までの覆工コンクリートの挙動

図-5は覆工コンクリート打設後13ヶ月である平成6年3月11日における覆工コンクリートのひずみ計測結果（打設時の値を0とする）を示したものである。この図では乾燥収縮によりコンクリートに発生したひずみを各測定点における矢印で表示している。収縮量が最も大きいのは測点9の内側で、その値は 196.2×10^{-6} であった。

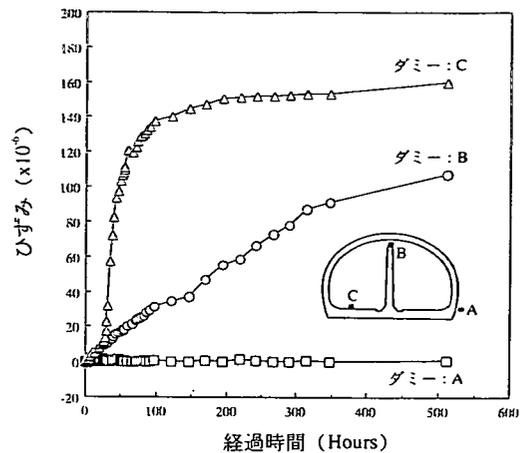
(2) 試験開始から24時間後までの挙動

図-6に右側注水完了時（T=7時間）のひずみ計測結果（湛水試験開始時を0としたもの）を示す。ここに見られるひずみの大きさ及び分布は、覆工コンクリートが水圧に対して弾性的に反応したと仮定した場合のものに近くなっている¹⁰⁾。

右側注水完了後、約17時間その状態を保持した。その間、特に右側周辺の水没部分（特に測点7と8）において顕著なひずみの増加が確認された（図-7参照）。測点7および8の覆工内側のひずみはそれぞれ 7×10^{-6} 、 38×10^{-6} の膨張を示している。覆工内側だ



(a) 試験開始後80時間までの挙動



(b) 試験開始後511時間までの挙動

図-9 ダミーひずみ計の挙動

けのひずみに着目すれば、その他の測点においては $0-0.5 \times 10^{-6}$ しか現われていない。また、この間に左側周辺では特筆すべきひずみの変化は認められない。

(3) 左側注水以後の挙動

続いて左側に注水し ($25 \leq T \leq 30$ 時間)、これを約20時間保持した後およそ24時間かけて両池を同速度で排水した。その後、約4日間放置した後、右側に注水し、これを約2週間保持した。この間、覆工コンクリートは各場所において不均一な膨張を続け、最終的に図-8に示すような状態となった。この時、測点8の内側におけるひずみは 87×10^{-6} であった。

これらの計測結果から、覆工コンクリートは注水した直後の極短時間においては水圧に対応した弾性挙動を示すが、時間の経過に伴い不均一な膨張挙動が卓越する様子が分かる。また、この現象は、排水後も水との直接接触が無いにも関わらず継続することが確認された。しかしながら、覆工コンクリートの変形挙動は種々の境界条件によって拘束を受けているため、この段階で計測されたひずみから真の膨張量を分離することは難しい。

4. ダミーブロックの挙動

本節では、不均一な膨張挙動を含む覆工コンクリートの変形挙動のメカニズムを明らかにするために、異なる条件下に置かれた3つのダミーブロック (ダミー-A, B, C) の挙動について考察する。

(1) 計測結果の分析

まず、ダミー-Aは中央にひずみ計を埋設した最大辺長約20cmのコンクリートブロック (吹付けコンクリートと同質のもの) を発泡スチロールでくるむことによって他の部分と縁を切り、吹付けコンクリート背面部に静置した。他の2つのダミーブロック (それぞれ、ダミー-B, ダミー-C) に関しては覆工コンクリートと同質のコンクリートによって、中央にひずみ計を埋設した最大辺長約20cmのコンクリートブロックを作成し、中壁上部と左側底部に置いた。これら2つのコンクリートブロック表面は、1つの面については覆工に施したのと同じコーティング材を塗布し、他の5つの面はこれより遮水性の高い材料で塗装した。湛水試験開始後に観測されたダミーブロックのひずみ計の挙動 (温度補償後のもの) を、80時間内のものについて図-9(a)に、それ以降のものについて図-9(b)に示す。

まず、吹付けコンクリート背部のダミー-Aに関しては、温度も含めそれを取り囲む周辺の環境がほとんど不変であるため特に顕著な挙動は示していない。

トンネル内に置いたダミー-BとCは、左側に注水をする直前 ($T=24$ 時間) までの間、共に気中に存在し、この間のひずみは微小レベルではあるが、経過時間にはほぼ比例して増加している。左側に注水を開始した直後 ($T=25$ 時間)、ダミー-Cは水中に没し、ひずみは急激に増加する。左側に注水を完了後 ($T=30$ 時間) もひずみは増加し続け、排水を始める ($T=50$ 時間) までの約20時間に 100×10^{-6} を越えている。

左側注水開始後、中壁上部に静置されているダミー-Bはそれ以前とほぼ同じ速度で膨張を続けている。

表-2 ダミーブロックにおけるひずみの回復率

ダミーの種類	乾燥による 収縮 ($\times 10^6$)	湛水試験 による膨張 ($\times 10^6$)	ひずみの 回復率 (%)
ダミー-B (気中)	385.8	107.2	28
ダミー-C (水中)	447.5	159.8	36

このひずみ計は直接水に接することはないが、注水作業が開始されてからはトンネル内の湿度が比較的高い(T=73時間までにおいては68~80%)ため、これがダミー-Bのひずみ増加に関与していると考えられる。

排水が終了(T=73時間)するとダミー-Cは気中に存在することになるが、ひずみの増加は水没時に比べその速度は劣るものの、依然続いている。その後右側を再度満水とした(T=194時間)が、それ以降ひずみは約 160×10^6 程度のレベルに収束する傾向を示している。

気中のダミー-Bについては、試験開始からほぼ一定のひずみ増加率を保持しているがT=300時間付近からは、やや収束する傾向を示している。

(2) 水分移動によるコンクリートの収縮と膨張

ここで、観測されたダミーブロックBとCの挙動は水分移動によるコンクリートの収縮・膨張の典型的なものと考えることができる。即ち、ある湿度の下で気中乾燥により収縮していたコンクリートを水中に置くか、或いは高湿度下に置くことによりコンクリートには膨張ひずみが生じる¹¹⁾。ただし、このときに生じる膨張ひずみは乾燥収縮量の40~70%に相当し¹²⁾、通常用いられるコンクリートでは約70%程度となる¹³⁾。覆工コンクリートと同質の材料で作成したダミー-BとCに注目すると、これらの作成から湛水試験までに生じた乾燥収縮ひずみ、湛水試験中に生じた膨張ひずみ、及びひずみの回復率は表-2のようになる。

水中に没したダミー-Cの場合は、膨張によるひずみの回復率は約36%となっており通常の約半分となっているが、これは表面のコーティング材により水の浸入がある程度妨げられていることに関連していると考えられる。

これは、コーティング材を塗布していない通常のコンクリート供試体に対して実施した浸水・膨張試験の結果¹⁴⁾と比較しても妥当なものである。この実験では、大きさ10x10x40cmのコンクリート供試体を浸水し、コンタクトゲージを用いて長軸方向のひずみを測定した。この試料は、約1年2ヶ月の乾燥期間を有するもので、その配合は、覆工コンクリートの

それと類似したものをを用いた。その結果、1日で 300×10^6 、1週間で約 400×10^6 の膨張ひずみが観測された。これは、コーティング材が塗布されているダミー-Cと比較すると約2から3倍の膨張量である。

(3) 水分移動のメカニズムと深さ

これまでに検証してきた覆工コンクリート、及びダミーブロックの挙動は、乾燥したコンクリートの吸水・吸湿による膨張が主要因であることを述べた。今、コンクリートを実用上不透水性と見なし⁶⁾、注水から膨張挙動が生じるまでに要した時間を考慮すると、この時の水分移動の原因は乾燥コンクリートがもつサクションであると考えられる。また、水分がコンクリート内に浸入する深さについては、覆工コンクリート、もしくはダミーブロックの挙動からこれを推し量ることは困難である。電極法による実験的検討により、通常のモルタル供試体で負圧、もしくは低水頭圧による水分の移動状況を調べた結果、実験開始から3週間程度では、水分の浸入深さはおよそ15から20cm程度になることが報告されており¹⁵⁾、これは文献14)が示す結果とほぼ一致する。

5. 吹付けコンクリートと継ぎ目計の挙動

これまでの議論で明らかのように、本湛水試験における覆工コンクリートの挙動は、乾燥したコンクリートの不均一な吸水膨張によって特徴づけられる。従って、覆工コンクリートは水圧と吸水膨張、及び温度変化によって変形するが、その挙動については覆工と吹付けコンクリートの間でどの程度の力が伝達されているかを考慮して検討する必要がある。

ここでは、吹付けおよび覆工コンクリートに生じたひずみと、継目計により計測された両コンクリート間の相対変位について弾性有限要素解析結果も交えて検討した¹⁰⁾。その結果、以下のような挙動特性が認められた。

(1) 右側を満水とした時点(T=7時間)までの継目計の挙動は、水圧に対して覆工コンクリートが吹付けコンクリートに接触することなく、単独で変形していると仮定した場合(分離型モデル)の挙動に近い。

(2) 右側の満水状態を保持したT=24時間までの間に見られる覆工コンクリートの膨張挙動により、継目計の計測結果には変化が見られるが、吹付けコンクリート自身には、ほとんどひずみの変化が認められない。

(3) T=24時間以降, 194時間までの間, 覆工コンクリートは注水, 排水に伴い基本的には分離型モデルに近い挙動を示し, その間, 吹付けコンクリートのひずみは比較的小さな変動のみを示した.

(4) T=194から511時間の約2週間においては, 右側を満水とした状態で水位は一定であり, 継目計の値はさほど変化しなかった. ところが, 吹付けコンクリートのひずみは, これまでの挙動の中では最も大きな変動を示し, ほとんどの場所においてコンクリートに圧縮ひずみが生じた. また, この間の吹付けコンクリートの温度変化量は, これまでの変動幅を大きく上回り, 全体的に0.3から1.2°Cの上昇を示した.

以上の計測結果から, 湛水試験の初期の段階では, 覆工コンクリートと吹付けコンクリート間での力の伝達は希少であることが考えられる. しかし, 時間の経過と共に, 覆工コンクリートの膨張量が増大し, 吹付けコンクリートも, 温度などの影響により変形を生じているため, 両者間の接触状態も変化する可能性があることを示唆している.

6. 膨潤ひずみと境界圧力の逆解析

(1) 逆解析の概要と目的

これまでに述べたように, 本湛水試験においては注水を開始して以降, 時間の経過と共にコーティング材を通過して水分が覆工コンクリートに浸入し, その結果, 膨張ひずみが不均一に発生したことが分かる. このとき, 覆工コンクリートにひずみを発生させている原因の内, 既知のものは(1)水圧, (2)温度変化, また, 未知のものは, (3)吸水による膨張挙動, (4)吹付けコンクリートとの間に存在する境界圧力である. 図-10はこれらの要因で発生する外力群を模式的に示したものである. 通常は, (1)の要因を仮定し, (4)の要因についても吹付けコンクリート・地山側からの反力を仮定して覆工を設計することが多い. しかし, 本湛水試験においては(2)の成分が存在することに加え, (3), (4)の要因も覆工コンクリートの挙動に影響を及ぼしていると考えられる. 従って, 覆工コンクリートに発生している応力・ひずみの状態を正しく評価するためには, 上記の未知成分を明らかにする必要があるため, 逆解析を行った. ここでは, その定式化と適用結果について述べる.

(2) 逆解析の定式化

まず, 簡単のため湛水試験直前の状態における応

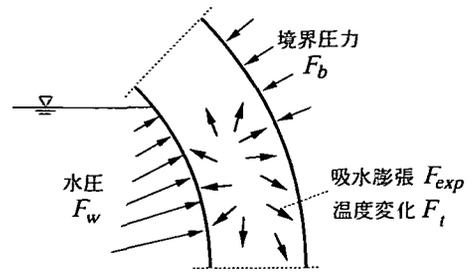


図-10 逆解析における外力系の概念図

力・ひずみをゼロと考える. ここで, 注水により覆工コンクリートに外部から直接作用する力は, 水圧 (F_w) と, 吹付けコンクリートとの間に作用する未知の境界圧力 (F_b) である. いま, 覆工コンクリートの部分領域 v が吸水, 及び温度変化に伴い, それぞれ ϵ_{exp} , ϵ_t だけ膨張, もしくは収縮したとする. ここで, ϵ_{exp} はコンクリートを無応力状態においた場合に発生する膨張ひずみであり, ϵ_t は温度変化 Δt に対応し $\epsilon_t = \alpha \Delta t$ で定義される温度ひずみである. ただし, α は線膨張係数である. 現実には, 覆工コンクリートはその構造特性, 境界条件などから自由に膨張・収縮することはできず, しかもこれらのひずみの大きさは場所によって異なっている. 従って, この拘束された不均一なひずみの発現によって覆工コンクリートには新たに応力・ひずみが発生する. このとき, 覆工コンクリートに生じている応力を σ , 全ひずみを ϵ とすると, 以下のような関係が成立する.

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_{exp} - \epsilon_t) \quad (1)$$

ここで, D は弾性係数とポアソン比から成る等方弾性応力・ひずみマトリックスである. 式(1)を仮想仕事の式¹⁰⁾に代入し, 膨張ひずみと温度ひずみに関する物体力項を荷重項に移行すると以下の関係を得る.

$$\int_V B^T D \epsilon dv = F_w + F_t + F_{exp} + F_b \quad (2)$$

ここで, V : 解析領域, B : 変位ひずみマトリックスである. また, F_{exp} , F_t はコンクリートの吸水膨張, 温度変化に起因する荷重ベクトルであり, それぞれ以下のように表される.

$$F_{exp} = \int_{V_{exp}} B^T D \epsilon_{exp} dv, \quad F_t = \int_{V_t} B^T D \epsilon_t dv \quad (3)$$

ここで, V_{exp} は覆工コンクリートの吸水による膨張領域, V_t は温度変化を生じている領域である. 式(2)を有限要素離散化し, 以下の式を得る.

$$[K]\{u\} = \{F_w\} + \{F_i\} + \{\{\bar{F}_{exp}^1\}, \{\bar{F}_{exp}^2\}, \dots, \{\bar{F}_{exp}^n\}, \{\bar{F}_b^1\}, \{\bar{F}_b^2\}, \dots, \{\bar{F}_b^k\}\}\{x\} \quad (4)$$

ここで、 $[K]$ は全体剛性マトリックス、 $\{u\}$ は節点変位ベクトルである。右辺の $\{F_w\}$ と $\{F_i\}$ は既知情報である。 n は覆工コンクリートの中で、異なる値の膨張ひずみが発生していると考えられる領域の数を示し、 $\{\bar{F}_{exp}^i\}$ は領域 i ($1 \leq i \leq n$)に単位量の膨張ひずみが発生したときの荷重ベクトルを表わす。また、 k は覆工と吹付けコンクリートの境界面の分割数であり、 $\{\bar{F}_b^j\}$ は番目 $(1 \leq j \leq k)$ の境界区間において単位面積あたり1.0の圧縮力が作用するときの荷重ベクトルを表す。これらの荷重ベクトル、および対応する変位ベクトルなどは数値計算によって求めるものとする。 $\{x\}$ は未知数ベクトル(サイズは $n+k$)であり、最初の n 個は各膨張領域における膨張ひずみを、また残りの k 個は各境界区間に作用する圧縮力の強さを表す。

式(4)より変位 $\{u\}$ は未知パラメータ $\{x\}$ の線形関数として与えられる。従って、ある時刻における計測点での変位ベクトルを $\{u^m\}$ 、また、その内、既知の荷重によって生じた部分を $\{u_{known}^m\}$ とすれば、以下の関係が成立する。

$$\{u^m\} - \{u_{known}^m\} = [A]\{x\} = \{\{A_1\}, \{A_2\}, \dots, \{A_N\}\}\{x\} \quad (5)$$

ここで、変位の計測点は覆工コンクリート内のひずみ計設置場所を意味する。また、 $N=n+k$ であり、 $\{A_i\}$ は i 番目 ($1 \leq i \leq N$)の未知数が1.0の時に生ずる、計測点における変位ベクトルである。式(5)から、未知数ベクトルは最小二乗法¹⁷⁾により以下の式で求められる。

$$\{x\} = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T(u^m - u_{known}^m) \quad (6)$$

式(6)により求められた未知数ベクトルから、各場所における膨張ひずみ、及び境界面における外力が明らかになる。従って、式(2)における外力項はすべて確定し、それぞれの外力に対応する変位は以下のようになる。

$$\{u_w\} = [K]^{-1}\{F_w\}, \quad \{u_i\} = [K]^{-1}\{F_i\} \\ \{u_{exp}\} = [K]^{-1}\{F_{exp}\}, \quad \{u_{bnd}\} = [K]^{-1}\{F_b\} \quad (7)$$

ここで、 $\{u_w\}$ 、 $\{u_i\}$ 、 $\{u_{exp}\}$ 、 $\{u_{bnd}\}$ は、それぞれ水圧、温度変化、膨張ひずみ、境界圧力によって生じた変位である。また、全変位はこれらの成分の総和であるから、

$$\{u\} = \{u_w\} + \{u_i\} + \{u_{exp}\} + \{u_{bnd}\} \quad (8)$$

で与えられる。最後に、式(8)で得られた変位から覆工コンクリートに生じているひずみを求め、式(1)よ

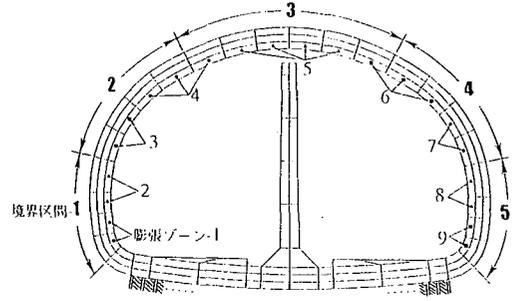


図-11 逆解析における諸条件の設定

り応力を計算することができる。

(3) 逆解析における仮定

図-11に逆解析に用いた有限要素メッシュと、覆工コンクリート内の膨張挙動、及び温度変化を考慮するために設けたゾーンを示す。コンクリートのひずみ、及び温度は図-3に示すように、覆工の各セクションの内側と外側において計測されている。ひずみ計のデータについては、これを長さ8cmの線分で計測された相対変位に変換して用いた。温度は、各セクションにおいて内側、外側の要素は計測値を用い、中間の要素にはその平均値を用いた。従って温度変化を既知情報として与えたゾーンの数27である。

膨張ひずみの発生を想定したゾーンは図-11において示したゾーン1から9であり、従って未知数の数 n は9となる。このゾーン分割は、前述したように、類似したコンクリート供試体による実験¹⁴⁾から、本湛水試験と同等の期間において覆工コンクリート内に水分が浸入する深さが、おおよそ15cm程度であることに基づいて設定した。

吹付けと覆工コンクリートとの未知の境界圧力を独立に取り扱う境界区間の数 k は5とした。それぞれの区間における境界圧力は、吹付けコンクリート側が防水シートを介して覆工コンクリート側に作用させる境界面に垂直な圧縮力であるとし、せん断成分は無いものと仮定した。

水圧は、既知の外力として与えた。また、インバートと中壁については、ひずみ計による計測結果が無く、また、その部分の変形挙動が覆工コンクリートのそれに及ぼす影響は少ないと考え、温度変化はゼロとした。また、ヤング率は 247000kgf/cm^2 (24.2GPa)、ポアソン比は0.3、線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とした。

上記のような設定で、湛水開始後7, 24, 30, 49, 73, 97, 170, 194, 511時間における計測データを用いて、

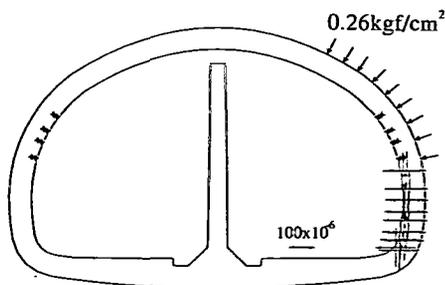


図-12 最終状態における膨張ひずみと境界圧力

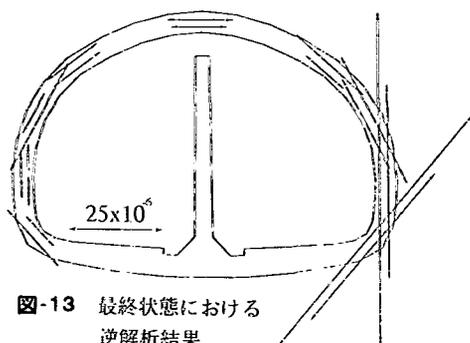


図-13 最終状態における逆解析結果

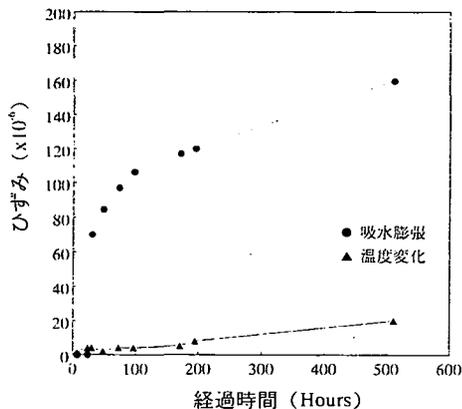


図-14 ゾーン8に発生したひずみの時間的推移

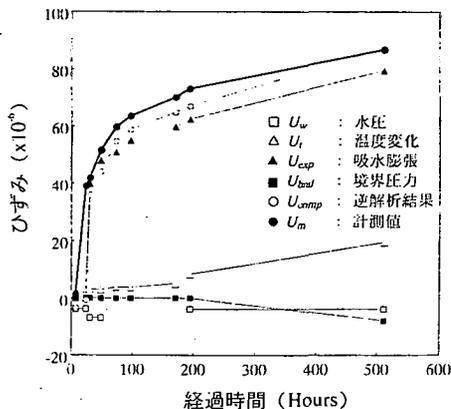


図-15 ゾーン8のひずみ計でのデータ成分の時間的推移

合計9ケースの逆解析を行った。なお、膨張ひずみ、及びコンクリート間の圧縮力はどちらも正值のみをとる。従って、式(6)により未知パラメータが負値を取った場合は、そのパラメータを考慮せずに逆解析を再行し、最終的にどのパラメータも負値をとらないようにした。

(4) 結果と考察

図-12に最終状態 (T=511時間) における逆解析結果 (膨張ひずみと境界圧力) を示す。膨張ひずみは測点3付近と、特に卓越した膨張挙動を呈した測点8, 9付近に認められている。境界圧力については、本ケース (T=511時間) において境界区間4に 0.26kgf/cm^2 (25kPa) の圧縮力が認められたが、他の全てのケースにおいてはゼロとなった。次に、図-13に最終状態におけるひずみ計の逆解析結果を示す。これは、図-8に示した計測結果と良く一致していると考えられる。

次に、最も膨張挙動の卓越していると考えられる測点8の内側のゾーンについて、逆解析によって得られた膨張ひずみの推移を温度ひずみと合わせて図-14に示す。膨張ひずみは試験の初期から急激な上

昇を見せ、最終段階では約 160×10^6 程度となっている。これは、水中に置いたダミーブロックが示した膨張の程度にほぼ等しい。また、膨張の著しい測点8付近においては全体のひずみ挙動に占める温度の影響は、比較的小さいことが分かる。また、図-15に測点8の内側に逆解析によって得られたひずみデータを、その発生要因ごとに比較して示す。ここに表示したひずみは、各要因によって発生したひずみを時間軸に沿って、それぞれ単独にプロットしたものである。ここで、 U_w 、 U_t 、 U_{exp} 、 U_{bound} はそれぞれ、水圧、温度変化、吸水膨張、吹付けコンクリートとの境界圧力によって測点8の内側に発生したひずみである。また、 U_m (太線) は計測値、 U_{comp} は逆解析の結果から全ての要因によるひずみを重ね合わせたものである。最終状態におけるひずみは 87×10^6 となっているが、その内、膨張挙動によるものが 80×10^6 (全体の約91%) となっており、測点8の内側で計測されたひずみが、膨張挙動に大きく影響されていることが分かる。

さらに、最終状態における力学ひずみ ϵ^* を図-16に示す。力学ひずみは全体のひずみ ϵ から膨張、および温度変化によるひずみ ϵ_{exp} 、 ϵ_t を差し引いたも

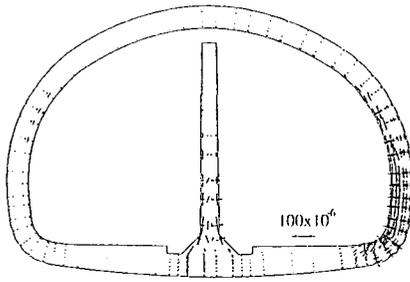


図-16 最終状態における力学ひずみ

のである。測点8付近では、覆工コンクリートの内側において膨張挙動が顕著であるが、その挙動はリング構造としての覆工全体の境界条件から拘束されるため、覆工の周方向には圧縮、半径方向には引っ張りのひずみが生じている。

最後に、力学ひずみの最大主成分が 20×10^6 を越えていると推定される領域を図-17(a)に示す。また、 $T=7$ 時間における逆解析結果を図-17(b)に示した。両者とも右側が満水となっている状態であるので、水圧に関する条件は同一であるにもかかわらず、ひずみ分布には顕著な差が生じている。このように、本湛水試験においては、覆工コンクリートの変形挙動が、主に吸水によるコンクリートの膨張挙動により、大きく影響を受けていることが分かる。

7. 結論

本研究で得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 覆工コンクリートは、打設後約1年2ヶ月間におおよそ左右対称なモードで乾燥収縮挙動を示した。この時、乾燥収縮ひずみはの最大値はおおよそ 200×10^{-6} であった。
- 2) 湛水試験の初期 ($T=7$ 時間後まで) における覆工コンクリートの変形挙動は、主に水圧の影響によるものと考えられるが、時間の経過と共に覆工コンクリートは吸水・吸湿により不均一な膨張挙動を示し、最終状態では、最大で 87×10^{-6} の伸びひずみが観測された。
- 3) 3つのダミーブロックを無応力状態として、それぞれ異なる環境下に置きその挙動を調べた結果、水没時間が最も長いものについては約 160×10^{-6} の膨張ひずみが観測された。また、気中に置いたダミーブロックは約 110×10^{-6} の膨張挙動を示した。これらのブロックは覆工コンクリートに使用したものと同一のコーティング材を塗布していたが、

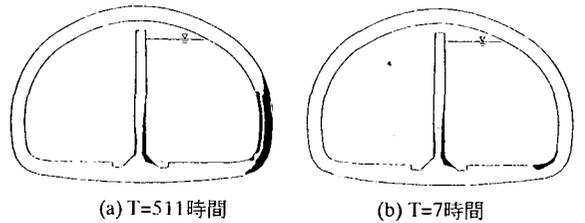


図-17 最終状態における力学ひずみの最大主成分が 20×10^6 を越えている領域

水分はこれを透過し膨張挙動を引き起こしたものと考えられる。ただし、観測された膨張ひずみはコーティング材を施さなかった場合の約1/2から1/3程度であった。

- 4) 吸水による膨張ひずみと、吹付けコンクリート側から覆工コンクリート側に作用する境界圧力を未知数とし、覆工内の温度変化、及び水圧を既知情報として逆解析を行い、覆工コンクリートに生じた応力・ひずみ分布を求めた。その結果、最も膨張挙動の顕著であった場所においては、無応力状態で膨張を許したダミーブロックと同程度の約 160×10^{-6} の膨張ひずみが発生していることが分かった。
- 5) 覆工コンクリートと吹付けコンクリート間の相対変位の計測結果、および逆解析結果から、本湛水試験で見られた変形挙動の範囲では、両コンクリート間の力の伝達は比較的希少であることがわかった。

本論文では、従来の設計では考慮されていなかった湛水時の吸水による膨潤挙動によって、覆工コンクリートの変形挙動が大きく影響を受けることが分かった。このような場合、ひずみの拘束度^{3), 7), 8)} ($1 - \epsilon_t / \epsilon_f$; ϵ_t は実際のひずみ, ϵ_f は拘束が無いときのひずみ)が0.6以上であるとコンクリートにひび割れが発生すると言われている。本ケースでは、例えば、測点8の内側では拘束度が約0.46となり安全側となっているが、拘束度が0.25~0.6の場合でも条件によってはひび割れが発生することが知られており³⁾、注意が必要である。今後、同形式のトンネル配水池を建設する場合、覆工コンクリートと地山との境界条件の不均一性については、これを完全に消去することは施工上困難であるが、防水シート及び緩衝材を介した2次覆工コンクリートの形式は、一般に乾燥収縮時のひび割れ防止などの観点からも有利であるといえる。また、膨潤挙動の不均一性については、より高い遮水性を有するコーティング材を使用すれば、膨潤挙動そのものを低レベルに押さえることが

でき、従って、覆工コンクリートに発生するひずみ・応力は比較的小さいレベルに保つことができると考えられる。しかし、ある程度の水分の浸入が避けられない場合には、本論文で示されたような膨潤挙動の不均一性を考慮し、最終的に発生すると予想されるひずみ・応力の状態に対して覆工コンクリートが十分な耐力を有していることを設計段階で慎重に検討することが必要である。

謝辞：本研究をとりまとめるに当たり、貴重なご意見を頂いた飛鳥建設(株)の近久博志、中原博隆、小林薫各氏に、また計測全般に渡りご協力いただいた応用計測工業(株)の関係諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 立石俊一：山岳トンネルの防水技術(1)、トンネルと地下、Vol.20, No.7, pp.73-77, 1989.7.
- 2) 定塚正行、田島利男、八木弘：山岳トンネルの防水技術(2)、トンネルと地下、Vol.20, No.8, pp.75-79, 1989.8.
- 3) 八木弘、猪間英俊、佐藤和夫：山岳トンネルの防水技術(6)、トンネルと地下、Vol.20, No.12, pp.72-77, 1989.12.
- 4) 西脇芳文、山崎剛、国見宏、小野定：都市NATMトンネル覆工コンクリートのひび割れ制御対策選定に関する研究、土木学会論文集、No.367/VI-4, pp.81-89, 1986.3.
- 5) 満尾淳、片瀬貴文：NATM 2次覆工の温度応力解析、トンネルと地下、Vol.16, No.11, pp.33-40, 1985.11.
- 6) オメール・アイダン、R.ギュルオール、川本眺万：2次覆工コンクリートの水和作用による温度分布と熱応力、トンネルと地下、Vol.17, No.2, pp.29-36, 1986.2.
- 7) 片瀬貴文、谷本親伯、中島順雄：NATMにおける2次覆工の温度応力とひずみ測定(1)、トンネルと地下、Vol.15, No.3, pp.43-54, 1984.3.
- 8) 片瀬貴文、谷本親伯、中島順雄：NATMにおける2次覆工の温度応力とひずみ測定(2)、トンネルと地下、Vol.15, No.4, pp.33-38, 1984.4.
- 9) 小田切重夫、岡村雄樹、奥田一宏：トンネル貯水池における鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の2次ライニング、トンネルと地下、Vol.16, No.7, pp.55-65, 1985.7.
- 10) 數原麗香：湛水時における岩盤内トンネル貯水池の変形挙動に関する研究、神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修士論文、1996.3.
- 11) Neville, A.M. 著、後藤幸正、尾坂芳夫監訳：ネビルのコンクリートの特性、技報堂出版株式会社、1979.
- 12) R. L'Hermite : Volume changes of concrete, *Proc. 4th. Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, Washington D., C., pp.659-694, 1960.
- 13) B. W. Shacklock and P. W. Keene : The effect of mix proportions and testing conditions on drying shrinkage and moisture movement of concrete, *Cement Concr. Assoc. Tech. Report TRA/266*, London, June, 1957.
- 14) 中原博隆、近久博志、小林薫、桜井春輔、芥川真一：硬化したコンクリートにおける水分移動と体積膨張、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、V-277, pp.554-555, 1996.9.
- 15) 田代忠一、田澤栄一、笠井芳夫編：セメント・コンクリート中の水の挙動、セメント・コンクリート研究会水委員会、スピナ、1993.
- 16) 市川康明：地盤力学における有限要素法入門、日科技連出版社、1990.
- 17) 桜井春輔、武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文報告集、第337号、pp.137-145, 1983.

(1996. 8. 8. 受付)

MEASUREMENT AND IDENTIFICATION OF DEFORMATIONAL BEHAVIOUR OF A TUNNEL RESERVOIR

Shunsuke SAKURAI, Shinichi AKUTAGAWA, Reiko SUHARA,
Takeshi TOKUYAMA and Takashi MINATO

An investigation was carried out to measure, identify, and analyze deformational behaviour of a concrete lining of a tunnel reservoir excavated by NATM, subject to the first water pouring. The measurement results showed that moisture was transferred into concrete through the layer of surface coating. To identify the extent of expansion due to moisture transfer, back analysis was performed considering all the factors affecting the deformation of concrete lining. The results showed that the magnitude of strain caused by moisture-induced expansion surpassed by far that caused by water pressure and was the main factor controlling the deformational behaviour of the concrete lining.