

導水路トンネルの内巻鋼管の変形に関する検討

－水戸トンネルの事例－

STUDY OF DEFORMATION ON INSIDE STEEL LINING OF HEADRACE TUNNEL A CASE STUDY OF MITO TUNNEL -

谷村大三郎¹⁾ 西尾 誠高²⁾ 深井 直光³⁾ 今田 徹⁴⁾ 堀井 秀之⁵⁾

Daizaburou TANIMURA, Masataka NISHIO, Naomitu HUKAI, Tooru KONNDA, Hideyuki HORII

Mito tunnel on Naka Water Transmission Canal under the Kasumigaura Water-Conveyance Project was carried out by using the NATM for excavation work, steel pipe of 4.5 meter inside diameter was installed, and grouting was plugged between excavated tunnel and steel pipe. The Buckling deformation was caused to the wide range of steel lining, of which length is 180 meter.

In connection to the tunnel deformation, investigation on site, geology and construction record in order to identify the cause of deformation and study for the protection of buckling, investigation of property of grouting material by laboratory test, and verification on yield strength by numeric analysis were executed.

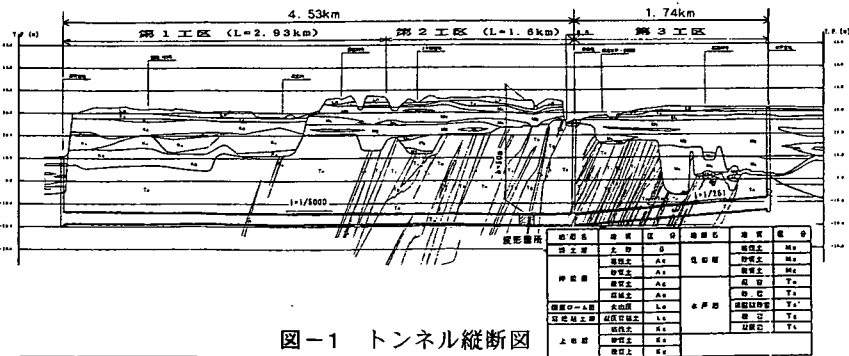
This paper reports the results of the analysis on yield strength of steel pipe through the buckling calculation by using theoretical formula and the elastic FEM analysis, on which model consists of steel pipe as beam member and grouting material as retaining spring.

Key word : Headrace tunnel, NATM, Steel Pipe, Deformation

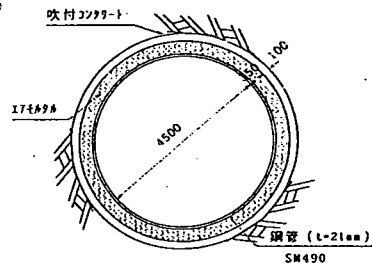
1. はじめに

建設省 関東地方建設局 霞ヶ浦導水事業のうち那珂導水路は、那珂川と霞ヶ浦を結ぶ仕上がり内径4500mm、全長約 42.9 kmの圧力水路トンネルである。このうち水戸トンネル（延長 6.3km）においては工事が終了しているが、そのうち、その2工区と呼ばれている桜機場立坑から那珂機場立坑方向へ向かう延長約 1600mの区間のうち 140mの範囲にて平成 11 年 3 月にトンネル鋼管の変形が生じた。

鋼管の変形に対し、現地状況等を総合的に調査し、変形原因の分析および対策検討を行った。本報告は、これら調査・分析結果のうち主として解析的検討についてまとめたものである。



図－1 トンネル縦断面図



図－2 トンネル断面図

- 1) 建設省 関東地方建設局 霞ヶ浦導水工事事務所 副所長
- 2) 正会員 (財) 先端建設技術センター 研究第二部 主任研究員
- 3) 正会員 日本セメントコンサルタント(株) 技術本部 技術研究部
- 4) 正会員 東京都立大学 工学研究科 教授
- 5) 正会員 東京大学 大学院工学系研究科 教授

2. 水戸トンネルの概要

2. 1 工事概要

本トンネルの掘削外径は 5400mm、通過土質は主に泥岩であり一部礫岩が出現する。掘削はNATM工法が採用され、吹付けコンクリートで支保された内径 5200mm のトンネル内に、内径φ4500mmの鋼管を据付け、トンネル吹付け面と鋼管の間にグラウト充填する構造となっている。なお、変形区間の通過地盤は主に礫岩で吹付けコンクリート厚さは 50mmを採用している。

覆工の設計は、吹付けコンクリートは仮設支保工と考え、内水圧、外水圧・土圧は内管(鋼管厚 19～21mm、材質 SM490)が負担するとして設計されている。内外水圧作用時の鋼管は、掘削吹付け面と鋼管の間に充填された所定の強度のグラウト材(エアミルク:厚さ 350mm)により外側から拘束することにより、十分な耐力を有するとした。グラウト材(エアミルク)の配合を表－1に示す。設計外水圧は 0.57N/mm2 であり、理論式により鋼管の限界座屈圧力を計算し、安全率 1.5 をとった設計外水圧と比較し必要鋼管厚を決定した。

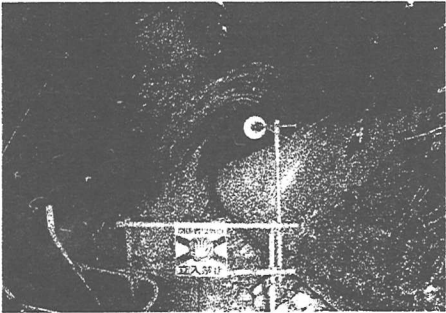
2. 2 変形概要

写真－1 は変形した鋼管の裏側の状況を示したものである。また変形状況を図－3 に示す。
発生したトンネルの変形について原因の調査と対策検討のために以下の検討を行った。

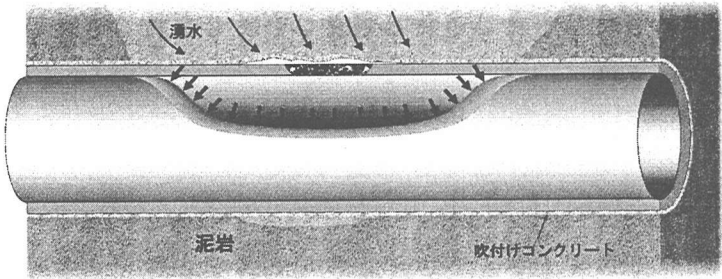
- ①現地調査・地質調査、当時の施工記録調査
- ②室内試験に基づくグラウト充填材の材料特性調査
- ③数値解析による外水圧に対する鋼管の耐力の検証

表－1 エアミルクの配合

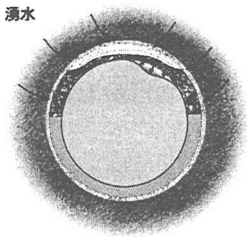
空気量	生比重	単位量		
		セメント (kg/m³)	気泡材 (kg/m³) (原液)	水 (kg/m³) (気泡材の 希釈液を 含む)
66±5%	0.58±0.05	350	1.48	231.5



写真－1 変形状況(鋼管内部)



図－3 変形状況説明図



3. 変形原因の検証

3. 1 現地調査

変形区間の鋼管背面をエアミルクの撤去に並行し調査した。その結果、エアミルクの巻厚にばらつきがあった。また、当該区間の湧水については施工当時防水シート・ドレーンにより排水処理しており、かつエアミルクの充填度合についても電気センサーおよびエア抜き管からエアミルクの湧出を確認するという、充分な施工管理の元に行っていたが、鋼管背面および吹付けコンクリートの表面状況の観察によれば以下が確認された。

- ①変形区間付近は天端・側部で吹き付け面の凹凸があり、天端部では充填しきれない部分が残りに、トンネル天端の吹付けコンクリート面とエアミルクの間に空隙が残っていた。
- ②吹付けコンクリートの表面には多数の防水シートが設置されているが、シート設置個所以外にも湧水の痕跡が見られた。
- ③コア抜き供試体によれば、エアミルクの強度にはばらつきが大きく、かつ低強度の部位が確認された。
- ④変形発生箇所の吹付けコンクリート面に崩壊等が無く、応急対策時に鋼管に穴を開けたところ大量の湧水が排出された。これより、鋼管の変形をもたらした外力は、地山崩落などの土圧ではなく鋼管外周部に作用する地下水圧であったと推定される。

3.2 地質調査

本トンネルの通過土質は主に泥岩であるが、一部の区間で一軸圧縮強度が $qu=100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の箇所がある。施工記録によると、変形区間は礫岩の分布域に相当する。礫岩は径 5～10cm の大礫が密集した部分と細礫部に区分され、また径 30cm 大の玉石も点在している。トンネル背面の地山状況は、事前調査では以下のような地質、岩盤状況となっている。

- ① 礫は、八溝山地由来と思われる砂岩、頁岩を主体とし、扁平型の円礫が多い。
 - ② 高角度の亀裂がみられ、多くは石英およびドロマイトにより充填されている。また一部の縦亀裂には開口が認められる。
- 切羽観察記録によれば、上記の亀裂は特に礫岩部分で頻度が多い。また、開口した亀裂も多いことから、これらの亀裂が岩盤中の“水みち”を形成しているものと考えられる。また同様に観察記録によれば、広域的な地層の構造は北～北東方向に緩く傾斜しているが、礫岩分布域付近では水平に近い分布となっている。このため、この付近はすり鉢状の地層を呈しており、地下水が集中しやすい構造を呈していることも考えられる。

施工実績によれば、掘削時には変形区間での湧水はほとんどみられなかったが、時間の経過とともに湧水量が増加しており、鋼管設置時期までその都度湧水処理を行っていた。

これらより、顕著な“水みち”の存在と地下水の集中しやすい地質構造が変形要因の一つである可能性が考えられ、隣接区間におけるエアミルク充填に伴い、逃げ場を失った湧水が当該工区に集中し、湧水の影響を受けやすい環境にあったものと考えられる。

3.3 材料特性

本トンネルの設計では、鋼管外周にエアミルクがすき間なく充填され、十分な拘束効果が期待できることが前提条件であるが、室内試験結果によれば、硬化前のエアミルクは水の影響を受けやすく、少量の水の散布で水が侵入しエアが分離浮上して、強度低下する事が確認された。これによりエアミルク表面にはエフロレッセンス(白華)が発生することも確認されている。

また、上記室内試験結果では、散水の有無にかかわらず、同一条件にて打設した試験体について、供試体の採取位置により強度・剛性がばらついていた。写真-2に確認試験の状況を示す

当該区間の湧水については、防水シート・ドレーンを用い可能な限り行い排水処理したが、鋼管打設時からエアミルク打設時までには湧水が増加し、硬化前のエアミルクに混ざり、材料分離が生じたものと考えられる。

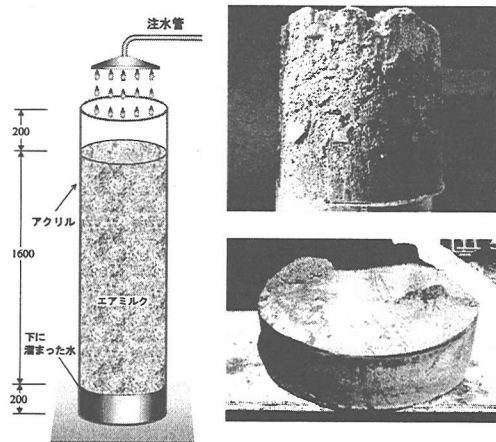


写真-2 材料試験(水の影響を受けた試験体)

4. 解析的検討

地質条件およびエアミルクの性状から、変形の要因を推定した。しかし、変形の要因としてはこの他にも種々考えられる。ここでは、考えられるトンネル変形要因を抽出し、解析的に外水圧に対しての鋼管の耐力(限界座屈圧力 P_k)を求め、変形要因を検証した。

表－1は、考えられる変形要因とその解析内容を整理したものであり、①～⑪の項目が考えられる。これらのうち、調査結果や試計算の結果から、表中の○に示す項目を変形要因として考慮した。

限界座屈圧力は、技術基準などに示されている理論式により計算される限界座屈圧力と、数値解析による限界圧力を求めて検証した。数値解析は、種々の要因をパラメータとした基本パラメータ解析と、調査結果を反映したより現実に近い総合モデル解析を行った。

表－1 考えられる変形要因と解析内容

考えられる変形要因	解 析 内 容	理 論 式	数 値 解 析	
			基本パラメータ解析	総合モデル解析
(1) 鋼管 ①仕上がり寸法 (外径、内径) ②材質 (鋼材強度など) ③組立状態	・製造公差のばらつきによる、鋼材強度などの基本的な諸元はミルシート等により保証されていることを考え、ここでは考慮しない。 ・鋼管の腐食、自重による変形など設計時の鋼管の腐食を考慮する。	— — △ 状態で適用	— — ○	— — ○
(2) 鋼管、外巻、充填の空隙 ①鋼管とエアミルクの空隙 k_0 ②外巻と充填との空隙	・エアミルクの充填状態などによる生ずるもの。 ・②として考慮する。	— ○	○ ○	○ ○
(3) エアミルク ①エアミルクの弾性係数 E_m ②エアミルクの充填状態	・エアミルクの充填状態を基にしたパラメータ解析。 ・数値解析結果にはほとんど影響しないことから無視とした。	— —	○ —	○ —
(4) 荷重 ①土圧 (周辺土圧の影響) ②外水圧	・自立しているものとして考慮しない。 ・水圧分布パターンを想定したパラメータ解析。	— —	— ○	— ○
(5) 支持力伝達 ①エアミルクの空隙状態 ②浮上り防止材集中支持状態	・調査結果を基にしたパラメータ解析。 ・数値解析結果の変形モードより考慮しないこととした。	— —	— —	○ ○
(備考) 自由管の座屈変位				

4. 1 理論式による限界座屈圧力

外水圧に対する必要鋼管厚さは、過去に圧力トンネル等の設計用いられてきた「ダム・堰施設技術基準」¹⁾によるアムシュタツの式により、限界座屈圧力を推定した。

アムシュタツの理論式は、式(1)、(2)で与えられているが、基本的な前提条件は以下のとおりである。計算は式(1)に諸条件を入力し、 σ_N (円周方向応力度)を算出し、式(2)によって補剛材の無い場合の限界座屈圧力 P_k を求める。計算方法の特長を以下に示す。

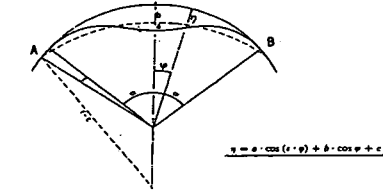
- ①鋼管は外水圧により内外に変形するが、周辺が外巻で拘束されている場合は外側への変形は制限され、そのために自由管より高い外水圧に耐えることができると言う仮定にもとづいた式である。
- ②鋼管の変形は図－4に示すように、変形区間 $a \sim b$ では当初より大きい曲率半径のもとで、半円周で余弦関数1.5波長で変形する。
- ③変形開始区間では変位、たわみ角、曲げモーメントが0
- ④鋼管の耐力は最大曲げモーメント発生箇所での鋼管板厚が全断面塑性となった時点の限界座屈圧力 P_k とする。
- ⑤平面ひずみの条件で弾性係数 E を設定している。

$$p_k = \frac{\sigma_N}{\frac{\gamma_m}{t} \left(1 + 0.35 \frac{\gamma_m}{t} \cdot \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_s} \right)} \quad (1)$$

$$\left(\frac{k_0}{\gamma_m} + \frac{\sigma_N}{E_s} \right) \left(1 + 12 \frac{\gamma_m^2}{t^2} \cdot \frac{\sigma_N}{E_s} \right)^{1.5} = 3.36 \frac{\gamma_m}{t} \cdot \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_s} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_m}{t} \cdot \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E_s} \right) \quad (2)$$

ここに

- r_m : 余裕厚を除いた管厚中心半径(mm)
- k_0 : 充填部と管外面との隙間(mm) k_0 は一般に $0.4 \times 10^{-3} \cdot r_m$
- σ_N : 管の円周方向直応力度(N/mm²)
- E_s^* : $E_s^* = E_s / (1 - \nu_s^2)$; E_s : 鋼材の弾性係数 ν_s : 鋼材のポアソン比
- t : 余裕厚を除いた管厚
- σ_F^* : $\sigma_F^* = \mu \times \sigma_F / \sqrt{(1 - \nu_s^2 + \nu_s^2)}$; σ_F : 鋼材の降伏点
- $\mu = 1.5 - 0.5 \times 1 / (1 + 0.002 \times E_s / \sigma_F)^2$
- P_k : 限界座屈圧力(N/mm²)



図－4 座屈モード

鋼管の板厚が21mm(SM490材)の場合、この理論式で定められている $k_0/r_m=0.0004$ (すきま $k_0=0.904\text{mm}$) で限界座屈圧力 P_k を計算すると $P_k=1.03\text{N/mm}^2$ となり、設計水圧 0.56N/mm^2 に対して安全率は1.8となっている。

また、初期不整 1%の公差を考慮して楕円の長径を真円の径として簡便に計算した場合でも限界座屈圧力は $P_k=1.01\text{ N/mm}^2$ と真円に比較して2%程度小さくなる程度であり、必要安全率は確保されている。なお、設計では公差、腐食代など考慮して鋼管厚み 19.5mm で照査が実施されているが、この場合でも限界座屈圧力 $P_k=0.89\text{ N/mm}^2$ 、安全率も 1.6 となり設計上必要な安全率 1.5 を満足している。

図-5は、上記の計算式に基づき、鋼管とエア

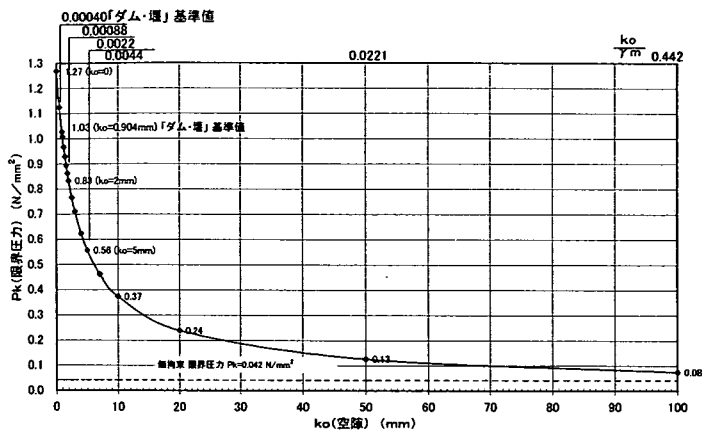


図-5 鋼管とエアミルクとの空隙 k_0 と限界座屈圧力 P_k との関係 (アムシュッツの理論式)

ミルクとの空隙と限界座屈圧力の関係を示したものである。これによるとエアミルクと管外側との隙間が大きくなるにしたがい限界座屈圧力は小さくなり、一般に設計に用いられている隙間 k_0 (ここでは、 0.904mm) の約5倍の $k_0=5\text{mm}$ で安全率が 1.0 となることがわかる。

4. 2 数値解析

(1) 基本パラメータ解析

数値解析は、種々の変形要因をパラメータとした基本解析により、変形要因の影響度合を比較し、調査結果を反映させ、より現実に近いモデル設定を行い、変形発生状況を模擬した。基本パラメータとして、鋼管の初期不整(扁平度合)、鋼管とエアミルクの空隙、掘削面とエアミルクの空隙、エアミルクの弾性係数、外水圧を考慮した。

表-1に示した基本パラメータのうち、③初期不整(楕円扁平化)、④鋼管とエアミルクの空隙 k_0 、⑥エアミルクの弾性係数 E_m 、⑨偏水圧を考慮した。本計算によれば、鋼管の限界座屈圧力は、エアミルクの弾性係数 E_m が $E_m \rightarrow \infty$ から $E_m=150\text{N/mm}^2$ まではほとんど変化が見られないが、 $E_m=150\text{N/mm}^2$ 以下になると急激に低下することがわかった。

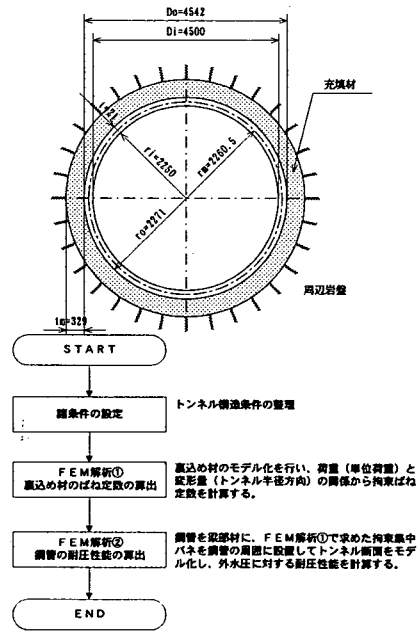


図-6 解析モデル

(2) 総合モデル解析

総合モデル解析は、基本パラメータ解析結果をもとにモルタルの空隙や水圧の偏荷重を考慮した図-6に示す解析モデルにより実施した。「トンネル天端部の空隙範囲」、「エアミルクの弾性係数」を用いて数値解析(弾性有限変位解析)を行い、変形時の外水圧を検証した。弾性係数が小さく、天端空隙が大きい程、限界座屈圧力(P_k :座屈が生じる圧力)は小さくなることが明らかになった。結果を図-7に示す。

今回の現地調査結果より、変形箇所为天端空隙範囲が $90^\circ \sim 120^\circ$ で、エアミルクの弾性係数が $E=50 \sim 150\text{N/mm}^2$ 程度であることから、この条件で限界座屈圧力(変形時の外水圧)を計算すると、 $P=0.38 \sim 0.59\text{N/mm}^2$ となることがわかった。

(3) 解析結果の評価

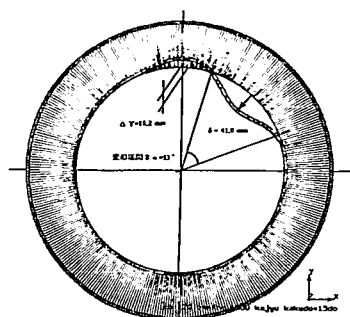
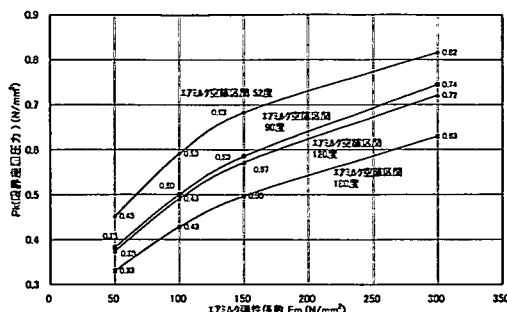
今回の変形は、トンネル外壁と鋼管内の充填材が湧水等の影響により材料分離を生じ空隙が拡大され、加えて強度低下により充填材の鋼管に対する拘束効果が弱まったことが主な原因である。これにより鋼管の座屈耐力が低下し、外水圧に耐えきれず座屈変形に至ったものと考えられる。解析の結果より推測された条件と現場の状況を比較するとほぼ推測通りであり、このような天端空隙範囲の拡大及び充填材の剛性低下が生じれば、設計値に近い水圧がかかることによって座屈変形が起こることの説明は数値解析上も可能である。

5. まとめおよび今後の課題

5.1 まとめ

当該区間においては、亀裂が多く透水性の高い礫岩層がすり鉢状に分布しており、地下水の集まりやすい地質条件であり、この礫岩層の亀裂等の水みちを介して集まった湧水の影響により、硬化前のエアミルクが影響を受けたものと考えられる。

硬化前のエアミルクは、湧水の影響を受けると気泡とセメントペーストに分離し、その過程で空隙が広がったと思われる。あわせてこのように湧水等により材料分離を生じたエアミルクは、強度、剛性が低下したため、鋼管を拘束する条件が確保できなくなった。このため、鋼管の限界座屈耐力が低下し、設計値に近い水圧で座屈が発生したと推定される



図一7 解析結果

5.2 今後に向けての提言

本調査にて、充填材としてのエアミルクは硬化前において水の影響を受け、材料分離による体積収縮や強度・剛性の低下がおこることが定量的に明らかになった。このため今後、湧水の可能性があるトンネル等において同様な材料を使用する場合は、湧水の影響を受けないような慎重な施工が必要である。

設計に際して各種技術基準等を用いる場合は、その適用条件や範囲に十分注意すると共に、その適用条件等に極力合った材料の選定・施工法の検討を行う必要がある。また、さらに施工条件に応じ裏込め材を確実に充填させるための施工方法の工夫が必要である。

今回の工事では「ダム・堰施設技術基準(案)」を参考にして、鋼管と地山吹付けコンクリート間をエアミルクで充填することで鋼管を拘束し、外圧による座屈から耐える構造とした。しかしながら施工上の限界や予想外の湧水の影響により、トンネル天端部に空隙が生じ、変形の原因となった。今後、同様な構造物の設計・施工を行うに際しては、可能な限り、湧水等の自然条件の把握に努めると共に、設計条件等を十分満たしうる材料や施工方法の改良を進める必要がある。

6. おわりに

今回の調査により、同種工事の設計・施工を行う上でこれまでに必ずしも明らかにされていなかった事実や問題点が指摘された。これらは今後の技術開発や改良の課題とするともに、同様な工事を実施する際に生かされる必要がある。今後これらの施工実績データ等をふくめ、より効率的かつ安全なトンネル工法の確立が望まれる。

これらの検討業務を進めるに当たり、ご協力・ご指導いただいた関係者特に「水戸トンネル調査検討委員会」の委員をはじめ建設省関連各位に対し、ここに改めて感謝の意を表する次第です。

参考文献

1)ダム・堰施設技術基準(案):(社)ダム・堰施設技術協会 1999年発行: