

都市 NATM トンネル覆工コンクリートの ひびわれ制御対策選定に関する研究

STUDY ON THE SELECTION OF COUNTERMEASURES TO PREVENT CRACKS OF INNER LINING IN URBAN-NATM TUNNEL

西脇 芳文*・山崎 剛**・国見 宏***・小野 定****
By Yoshifumi NISHIWAKI, Takeshi YAMAZAKI, Hiroshi KUNIMI
and Sadamu ONO

Many arguments have been made on the countermeasures of cracks of inner lining in urban-NATM tunnel, but there are many uncertain points on the selection of countermeasures to prevent cracks at present stage. The purpose of the present investigation is to examine the practical method for selection of the countermeasures on the basis of experimental data on site.

As a results, we wish to propose a selection method of countermeasures by means of actual data obtained through site.

まえがき

近年、トンネルの施工法として NATM が広く使用されてきており、都市においても NATM が用いられてきている。都市トンネルは一般に地下水位以下の軟弱な地質条件下に構築される。このため都市におけるトンネルの覆工コンクリートは、周辺の埋設構造物や近接構造物に沈下等の変状をきたさないよう、高い止水性と強度を保有している必要がある。NATM によるトンネルの覆工コンクリートを施工する場合、覆工コンクリートは吹付けコンクリートおよび地山によってトンネルの軸、および周方向に拘束されており、温度および乾燥収縮に起因するひびわれにより止水性および強度が損なわれるおそれがある。

このため、都市トンネルのひびわれ制御対策は、重要な課題となっており、これまでも鉄道トンネルを対象

にした覆工コンクリートのひびわれ制御に関する調査研究がいくつか行われている。代表的な研究としては、日本トンネル技術協会が行った調査研究¹⁾が挙げられ、研究成果として、吹付けコンクリートと覆工コンクリート間の縁を切ることにより、覆工コンクリートの伸縮をしやすくするアイソレーション工法がひびわれを制御するために効果的であることを指摘している。

しかし、この研究を含めて、これまでの調査研究は、各種ひびわれ対策を定量的に論及するまでには至っておらず、さらに経済性を考慮した覆工コンクリートのひびわれ制御対策の選定についての研究は余り報告されていない。

本研究は、都市 NATM トンネルを対象にして、覆工コンクリートのひびわれ制御対策としてコントロールジョイント（ひびわれ制御目地）の間隔、トンネル軸方向の鉄筋比およびセメントの種類に着目した現場試験を行い、その結果に基づいて覆工コンクリートのひびわれ制御対策の効果について検討したものである。

さらに、ひびわれ特性の 1 つである最大ひびわれ幅を数量化し、この数量化したひびわれ幅の予測モデルとひびわれ制御対策コストを組み合わせることでより経済性を考慮したひびわれ制御対策の選定方法を提案するものである。

* 正会員 東京電力(株) 地中線建設所土木課長
(〒105/東京都港区芝公園 2 丁目 2-4)

** 正会員 東京電力(株) 地中線建設所土木課
(同上)

*** 正会員 清水建設(株) 土木本部技術部長
(〒108/東京都港区三田 3 丁目 13-16 三田 43 森ビル)

**** 正会員 工博 清水建設(株) 土木本部技術部
(同上)

1. 現地試験計画および結果²⁾

(1) 試験計画

試験を行った電力用ケーブル洞道の標準断面は、図-1に示すとおりである。洞道周辺地盤は、第3紀鮮新世の固結シルト層であり、その変形係数は 700 kgf/cm² (68.6 MPa)~2 500 kgf/cm² (245 MPa) で、1 軸圧縮強度は 6 kgf/cm² (0.6 MPa)~26 kgf/cm² (2.5 MPa) である。

a) 試験要因と水準

現地試験の要因と水準は、表-1 に示すとおりである。各要因の水準の選定理由は表-2 に示すとおりである。

b) 試験条件および試験項目

各スパンの試験条件および試験項目は、図-2 に示す

表-1 試験要因と水準

要因	水準数	水準		
		1	2	3
A コントロールジョイントの間隔	2	5.4m	3.6m	---
B 鉄筋比	2	0.597% (D13@25cm)	1.520% (D13@8.3cm)	---
C 配合	3	普通ポルトランドセメント	フライアッシュセメントB種	普通ポルトランドセメント+膨張材

表-2 各対策の水準の選定理由

対策	水準の選定理由
コントロールジョイント	1スパンの長さが10.8mであることから、施工性等を考慮して3.6mと5.4mの2水準を採用した。
鉄筋	鉄筋比とひびわれ分散効果の関係を把握するため、水準は有意差が認められるように原設計の鉄筋比と原設計の3倍の鉄筋比の2つを採用した。
配合	水和熱の少ないフライアッシュセメントB種、ケミカルプレストレスの導入が期待できる膨張材混入の普通セメント、一般に多く使用されている普通セメントを用いた3種類の配合を比較のために採用した。

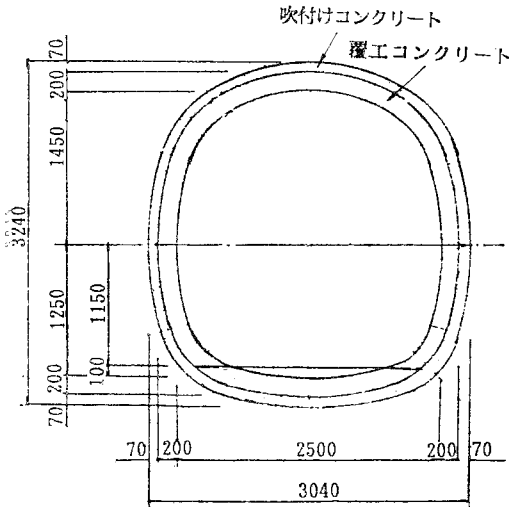


図-1 洞道の標準断面図

とおりである。試験に使用したコンクリートの配合は、表-3 に示すとおりであり、設計基準強度は材令 28 日で $\sigma_{CK}=210 \text{ kgf/cm}^2$ (20.6 MPa) である。

c) 試験方法

コンクリートの物性試験については、圧縮強度は JIS A 1132, 引張強度は JIS A 1113 により行った。試験材令は、7日と28日の2材令である。

コンクリート温度、コンクリートひずみ、鉄筋応力等の測定に使用した変換器は表-4 に示すとおりであり、図-3 に変換器の設置例を示す。

ひびわれについては、次のような方法で測定した。図-4 に示すように、覆工コンクリートを間隔 50 cm のメッシュで切り、このメッシュを横切る点のひびわれ幅を

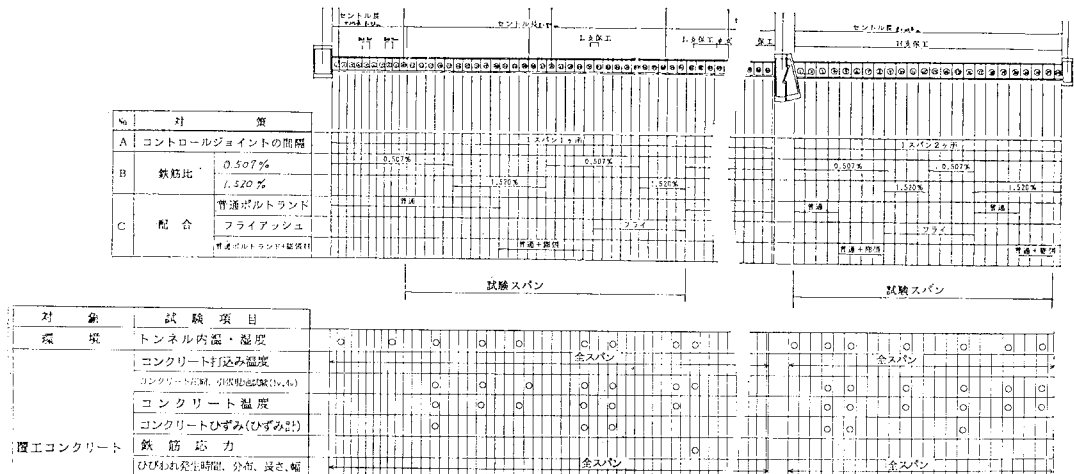


図-2 各スパンの試験条件ならびに試験項目

表-3 覆工コンクリート配合

No.	配合の設計条件				セメントの種類	配 合 表									
	呼び強度	スラブ厚(m)	ベース	変動化換		骨材の最大寸法(mm)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	硬化剤 (kg/m ³)	硬化材 (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	空気量 (%)
1	210	16	20	20	高強度ポルトランドセメント	277	174	928	626	ポゾリス No5L 0.692 マイティFD 0.333%		61.0	50.4	4.0	
2	210	16	20	20	フライアッシュセメントB種	277 F C+F = 37 286	161	833	1,002	ポゾリス No5L 0.715 マイティFD 0.333%		W/C+F 57.5	46.3	4.0	
3	210	16	20	20	普通ポルトランドセメント + 膨張剤	250	174	928	921	ポゾリス No5L 0.700 マイティFD 0.348%	CSA100R 30kg/m ³	61.0	50.4	4.0	

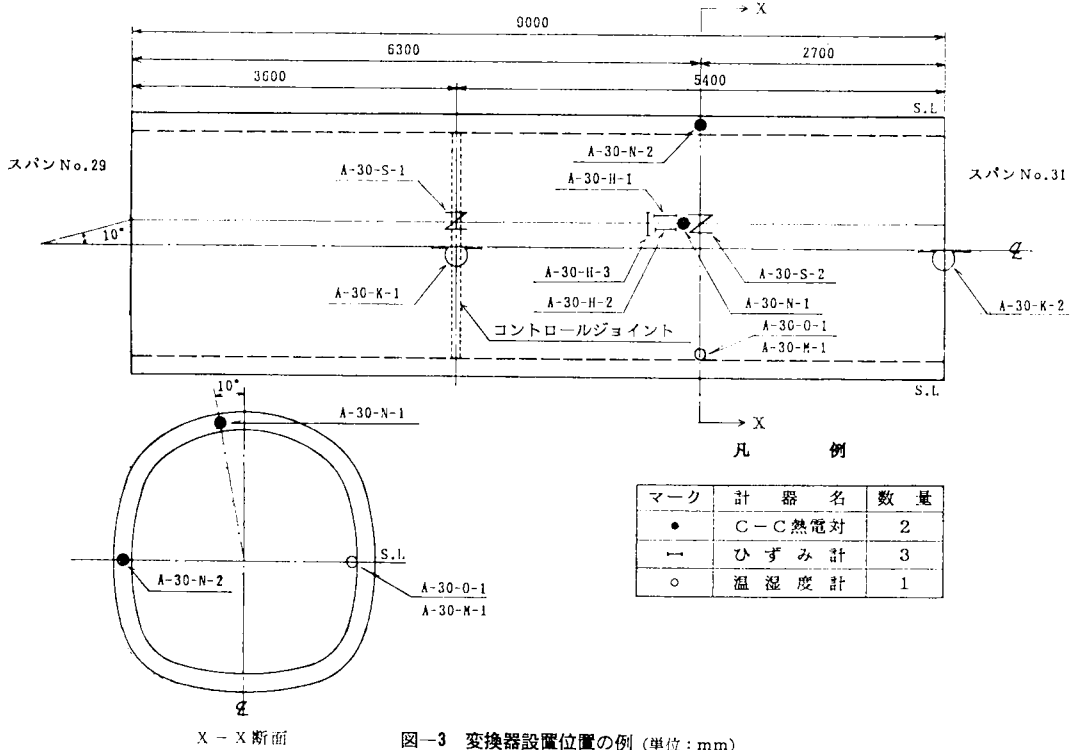


図-3 変換器設置位置の例 (単位: mm)

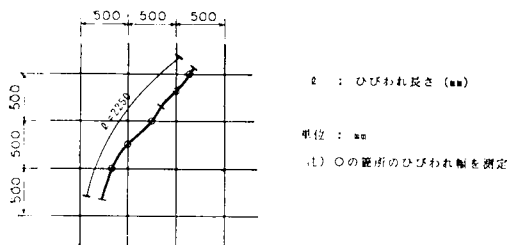


図-4 ひびわれの調査方法

経時的にクラックスケールを使用して目視で測定した。

(2) 試験結果

現地試験で得られた主な結果は以下に示すとおりである。

1) コンクリート温度の測定結果の1例は図-5に示すとおりである。コンクリート打込み後3日前後で打込み温度まで降下し、以後坑内温度の変化に伴って変化し

ている。

2) コンクリートひずみの測定結果の1例は図-5に示すとおりである。コンクリートひずみは、コンクリート温度の上昇時には圧縮を示し、コンクリート温度の降下に伴い引張側へ移行している。

表-4 使用変換器および測定器

測定項目	使用変換器および測定器	フルスケール	精度
坑内温度	大田計器製作所製	-20 ~ 40℃	±0.5℃
坑内湿度	自記湿度計 MN-5型	0 ~ 100%相	±3%
コンクリート温度	千野製作所製 C-C熱電対 VT6	-200 ~ 100℃	±1℃
コンクリートひずみ	東京測器製 ひずみゲージ型ひずみ計 KM-100F	±5000μ	±50μ
鉄筋応力	東京測器製 ひずみゲージ型鉄筋計 KS-13	±2400kgf/cm ² (±235MPa)	±24kgf/cm ² (±2.4MPa)

3) 覆工コンクリートの動きが吹付けコンクリートや地山等により拘束される程度を示す外部拘束度は、次のようにして求めた。すなわち、コンクリート温度が最大値を示した後の温度降下量にコンクリートの熱膨張率(10×10⁻⁶)を乗じた自由収縮ひずみと、ひずみ計より得られた実測ひずみとの比をとって外部拘束度を算定した³⁾。算定式を以下に示す。

$$R = \frac{\epsilon_R}{\epsilon_f} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、R：外部拘束度

ϵ_R ：拘束ひずみ (実測値)

ϵ_f ：自由収縮ひずみ (= $\alpha_c \times \Delta T$)

α_c ：コンクリートの熱膨張率 (=10×10⁻⁶)

ΔT ：温度降下量 (°C)

上式で求めた外部拘束度は、図-6に示すとおりである。これらの結果から分かるように、外部拘束度はトン

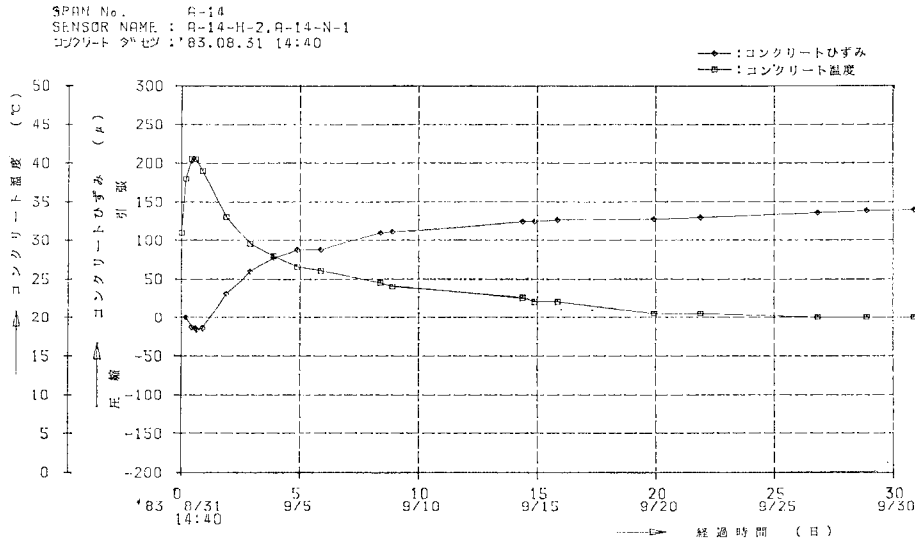
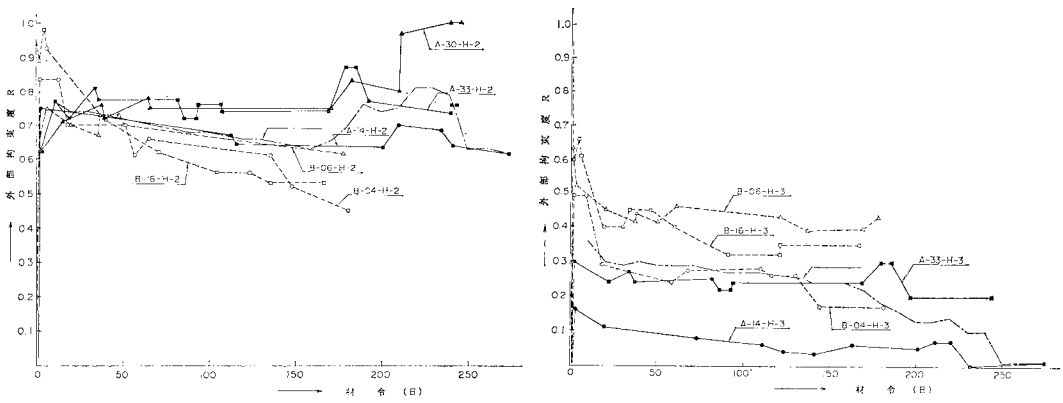


図-5 コンクリート打込み後の覆工コンクリート温度およびコンクリートひずみの経時変化



(a) トンネル軸方向外部拘束度 (b) トンネル断面方向外部拘束度

図-6 外部拘束度 R の経時変化

SENSOR NAME : A-42-T-2, A-33-H-1

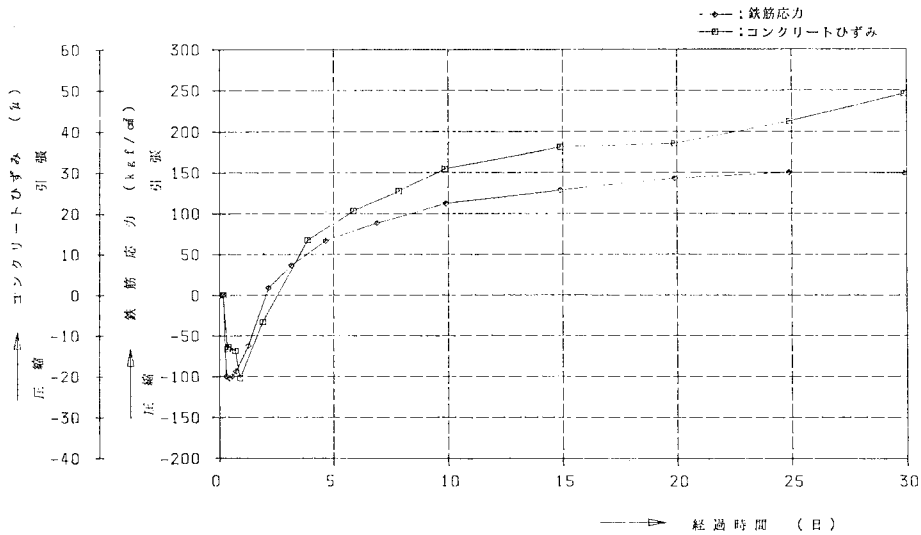


図-7 コンクリート打込み後の鉄筋応力とコンクリートひずみの経時変化の比較

ネル断面方向よりも軸方向のほうが大きい。

4) 鉄筋応力は、コンクリート温度上昇時に圧縮を示し、コンクリート温度の降下に伴って引張側へ移行している。この挙動は、コンクリートひずみの挙動と傾向はほぼ同じである(図-7 参照)。

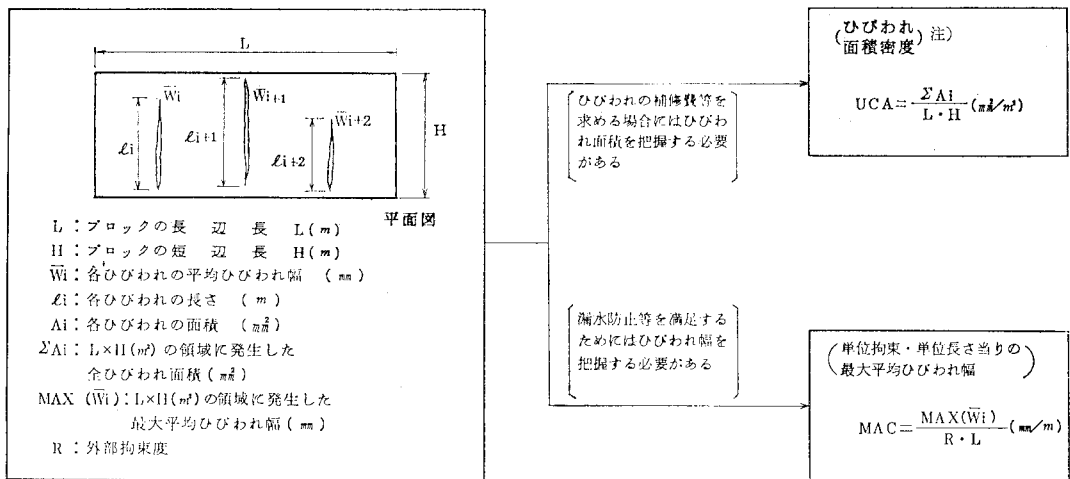
2. ひびわれ制御対策の解析

本研究で対象としたひびわれ制御対策の効果については、ひびわれ面積密度(UCA)とひびわれ幅比(MAC)の2つの特性値により解析した。ひびわれ面積密度とひびわれ幅比の定義は次のとおりである。図-8 に示すよう

に、UCA は覆工コンクリートに発生した全ひびわれ面積をスパン長(L)と周長(H)で除したもの、つまり単位面積当りのひびわれ面積である。次に、MAC は、スパン長(L)×周長(H)の領域に発生した平均ひびわれ幅の最大値 $MAX(\bar{W}_i)$ (最大平均ひびわれ幅と称す) を外部拘束度とスパン長で除したもの、つまり単位拘束単位長さ当りの最大平均ひびわれ幅である。

制御対策の解析は、分散分析および数量化理論I類により行った。

ひびわれ面積密度およびひびわれ幅比に関する分散分析の解析結果は表-5 に、また、数量化理論I類の解析結果は式(2)および式(3)に示すとおりである。なお、



(注: ひびわれが美観性に及ぼす影響を評価する場合、ひびわれ状態がそれを評価する目安の1つになると考えられたことから、このような数量を定義した。)

図-8 ひびわれの数量化

表-5 分散分析

要因	U C A	M A C	
		F o	ρ (%)
コントロールジョイントの間隔 A	7.06*	5.9	7.25*
鉄筋比 B	10.18*	3.0	13.78*
配合 C	1.68	0.4	0.91
e	---	90.7	91.4

F(1, 234; 0.05) = 3.88 **: 有意水準5%で有意
 F(2, 234; 0.05) = 3.03
 F(3, 234; 0.05) = 2.64

この解析は、覆工コンクリート打込み開始後約250日に調査したデータで行ったものである。

$$UCA = -0.6788 X_1 - 1.7090 X_3 + 0.4761 X_4 - 0.8335 X_5 - 0.2271 X_6 + 0.5649 X_8 + 4.1681 \dots \dots \dots (2)$$

$$MAC = -4.38 \times 10^{-3} X_1 + 7.236 \times 10^{-5} X_2 - 7.738 \times 10^{-5} X_3 + 5.361 \times 10^{-3} X_4 + 3.210 \times 10^{-4} X_5 - 1.105 \times 10^{-3} X_6 + 1.441 \times 10^{-5} X_7 + 3.375 \times 10^{-3} X_8 + 0.01263 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 X_1 はコントロールジョイントの本数(本)、 X_2 はひびわれに直交する辺長(m)、 X_3 は鉄筋比(%), X_4, X_5 は普通セメントの場合 $X_4=1, X_5=0$, 普通セメント+膨張材の場合 $X_4=0, X_5=1$, フライアッシュセメントB種の場合 $X_4=X_5=0$, X_6 は打込み温度(°C), X_7 は通風前後の坑内温度差(°C), X_8 は通風前後の坑内湿度差(%)である。坑内の温湿度差は、通風前後1週間のそれぞれの平均値の差である。なお、式(2)および式(3)のF値は、それぞれ8.26, 7.07であり、共に有意水準5%で式の有意性が認められる。また、式(2)および式(3)の寄与率は、それぞれ17%, 19%である。

分散分析による解析の結果、ひびわれ面積密度については、コントロールジョイントの間隔および鉄筋比の2要因がともに有意水準5%で有意性が認められた。一方、ひびわれ幅比についても、前述の2要因がともに有意水準5%で有意性が認められた。セメントの種類については、いずれの場合も有意性が認められなかった。

数量化理論I類による解析の結果、ひびわれ面積密度およびひびわれ幅比はともに、コントロールジョイントの間隔が小さくなるほど、また、鉄筋比が大きくなるほど小さくなることが認められた。

覆工コンクリートの設計施工において、止水性からひびわれ幅について限界値を設定して覆工コンクリートの品質を規定する場合、与条件で施工した場合の最大ひびわれ幅を予測する必要がある。

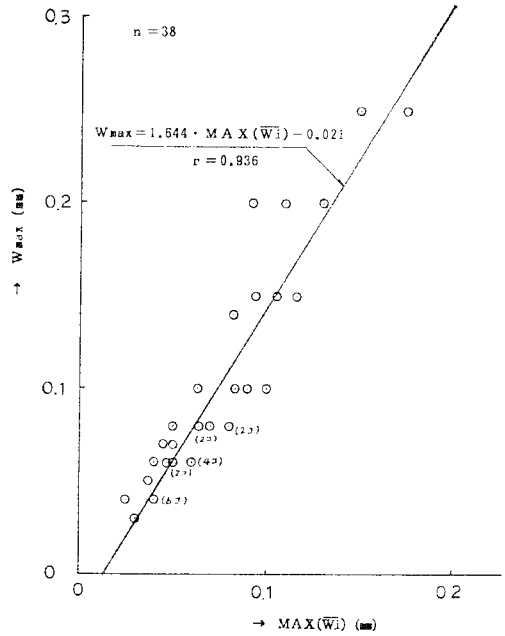


図-9 W_{max} と $MAX(\bar{W}_i)$ との関係

ひびわれ幅の調査結果から得られた最大ひびわれ幅(W_{max})と $MAX(\bar{W}_i)$ との関係は 図-9 に示すとおりである。両者は、ほぼ直線的な関係(相関係数 $r=0.936$)で近似できることがわかる。この関係と、ひびわれ幅比に関する特性値 MAC と $MAX(\bar{W}_i)$ との関係式 $MAC = MAX(\bar{W}_i)/(R \times L)$ から、 W_{max} を予測すると次式が得られる。

$$W_{max} = 1.644 \times MAC \times R \times L - 0.02 \dots \dots (4)$$

式(4)により、最大ひびわれ幅が予測できるので、ひびわれ幅を限界値内に制御するための対策を、式(3)のMACを用いて定量的に検討することができる。

3. ひびわれ制御対策の選定に関する検討

(1) 検討条件

経済性を考慮した制御対策の選定方法を検討するに際して、次のような条件を設けた。

- ① 最大ひびわれ幅：トンネルが保有すべき止水性から決定する。
- ② 打込み温度： $T_p=20^\circ\text{C}$
- ③ 外部拘束度： $R=0.7$
- ④ 通風前後の温度差： 1°C
- ⑤ 通風前後の湿度差： 8.1%
- ⑥ 覆工コンクリートの形状寸法： $9.9\text{m} \times 6.9\text{m}$ (スパン長×周長)
- ⑦ 覆工厚： 20cm

⑧ 使用鉄筋：D 13

⑨ コスト：普通セメントコンクリート (C 円/m³)，普通セメント+膨張材コンクリート (1.077 C 円/m³)，フライアッシュセメントコンクリート (C 円/m³)，コントロールジョイント (設置費，補修費等，0.323 C 円/m)，鉄筋 ($\rho=1\%$ で 5.815 C 円/1 スパン)

ただし，基本コスト C 円/m³ は，生コン材料費およびコンクリートの打込み費用を含めたものである。

(2) 選定方法および検討結果

式 (3) の MAC の帰帰式を利用して，最大ひびわれ幅 $W_{max}=0.0, 0.1, 0.2 \text{ mm}$ となる場合のコントロールジョイント(C.J. と略記)の本数(コントロールジョイントの間隔)と鉄筋比との関係を求めた結果は 図-10 に示すとおりである。鉄筋比と W_{max} との関係は 図-11 に示すとおりである。ただし，コントロールジョイントは等間隔で設置した場合である。また， $W_{max}=0 \text{ mm}$ とは，50 cm メッシュを横切るひびわれが発生しないことを意味している。なお，本研究ではコントロールジョイントの間隔は 3.6 m までしか試験を行っていないので，それ以下の間隔については式 (3)，(4) を外挿した。図-10 から，例えば $W_{max}=0.1 \text{ mm}$ にするためには，普通セメ

ントを使用した場合，コントロールジョイントを設置しなければ，必要鉄筋比が約 1.7% であるのに対し，コントロールジョイントを 1 本設置すれば(間隔が 4.95 m) 鉄筋比が負になり鉄筋は必要でないことがわかる。

次に，目標とする W_{max} を満足するような関係を有したコントロールジョイントの本数(等間隔)，鉄筋比および配合(図-10 の関係を満足する組み合わせ)を用いて，1 スパン当りのコストを算定した結果を 図-12 から 図-14 に示す。また，コントロールジョイントを 1 本設置するとして，その設置位置が異なる場合の 1 スパン当りのコストを算定した結果を 図-15 に示す。図-12 から 図-15 のコスト算定図において，鉄筋比が負となる場合の鉄筋に要する費用は 0 としている。

例えば，図-13 において，コントロールジョイントの本数が 1 本のところを境にして両側でコストが高くなっているのは，コントロールジョイントの本数が 0 の場合は鉄筋が必要となるため，また，コントロールジョイントの本数が 1 本以上の場合は鉄筋は不要であるが，コ

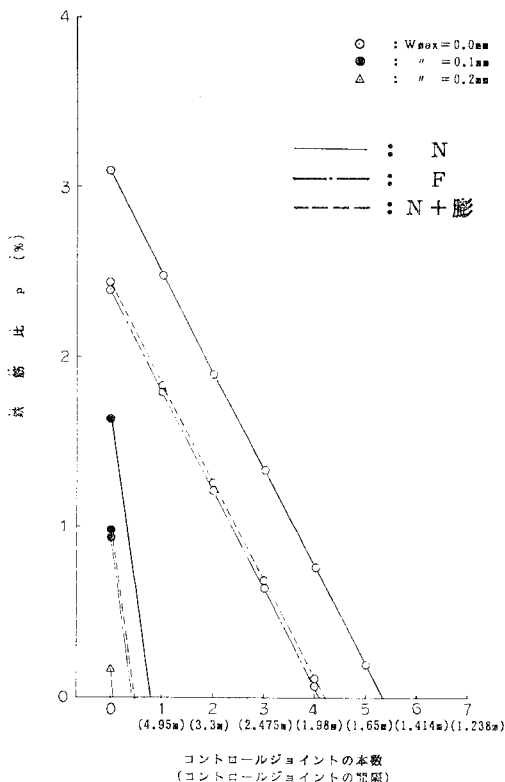


図-10 任意の最大ひびわれ幅を満足するための各配合別のコントロールジョイントの間隔と鉄筋比との関係

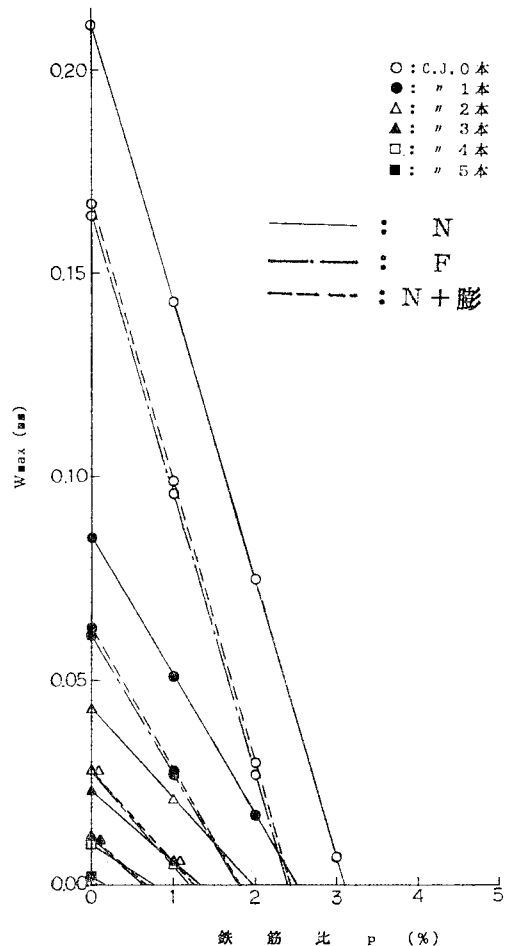


図-11 鉄筋比 P と W_{max} との関係

コントロールジョイントの延長が長くなりそれに要する費用が高くなるためである。さらに、コントロールジョイントの本数が1本以上の場合には、図-11 からわかるように W_{max} は 0.1mm 未満である。したがって、 W_{max} を 0.1mm 以下にするためには、コントロールジョイントを1本設置し(鉄筋は不要)、配合は普通セメントあるいはフライアッシュセメントB種を使用するのが経済的であることがわかる。コントロールジョイントをスパン中央に設置できない時は、図-15 からわかるように、配合が普通セメントの場合、コントロールジョイントの間隔が 5.8m 以上になると鉄筋が必要となるためにコストが上がる。このため、この場合には普通セメントよりもフライアッシュセメントB種を使用する方が経済的になる。

以上の検討結果を基にして、次のような経済性を考慮した覆工コンクリートのひびわれ制御対策の選定方法を提案する。

本方法は、まず覆工コンクリートの所要の品質を得るために、制御する必要があるひびわれの最大ひびわれ幅を設定する。次に、制御目標の最大ひびわれ幅が決まると、図-11 から最大ひびわれ幅 W_{max} 以下になる対策の組み合わせを選定する。さらに、図-12 から 図-15 を用いて選定した対策の組み合わせの中でコストが最小となる対策の組み合わせを選ぶ。このようにして、従

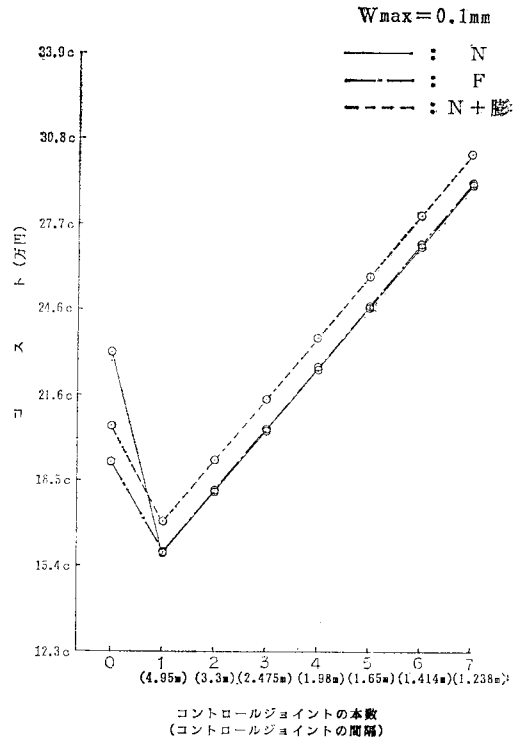


図-13 $W_{max} = 0.1mm$ を満足する場合の1スパン当りのコスト

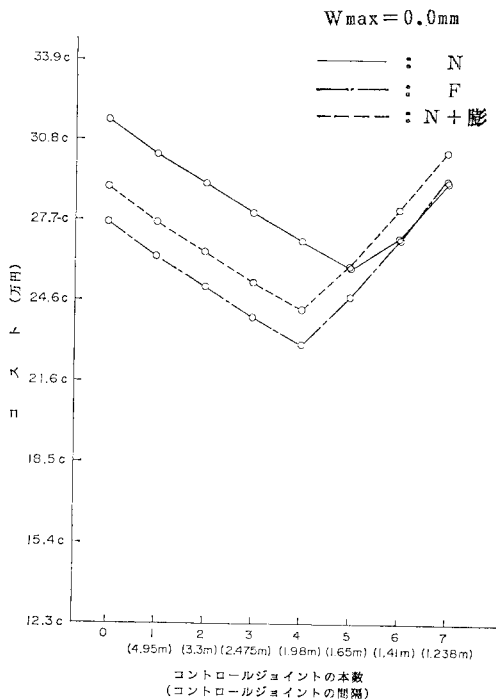


図-12 $W_{max} = 0.0mm$ を満足する場合の1スパン当りのコスト

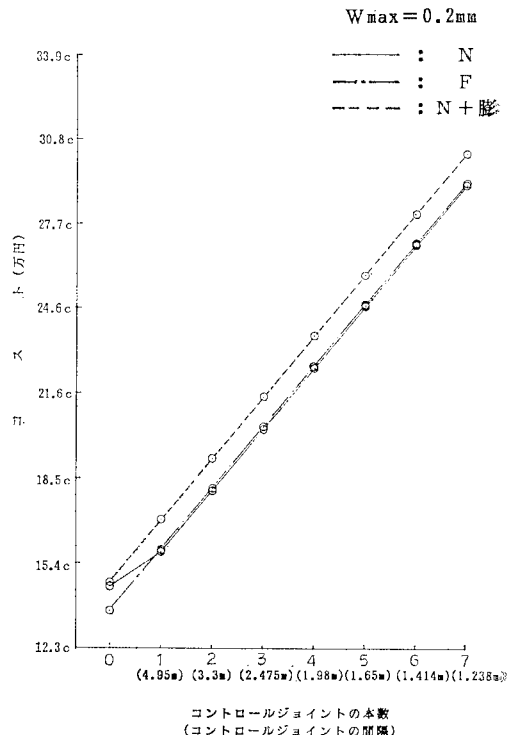


図-14 $W_{max} = 0.2mm$ を満足する場合の1スパン当りのコスト

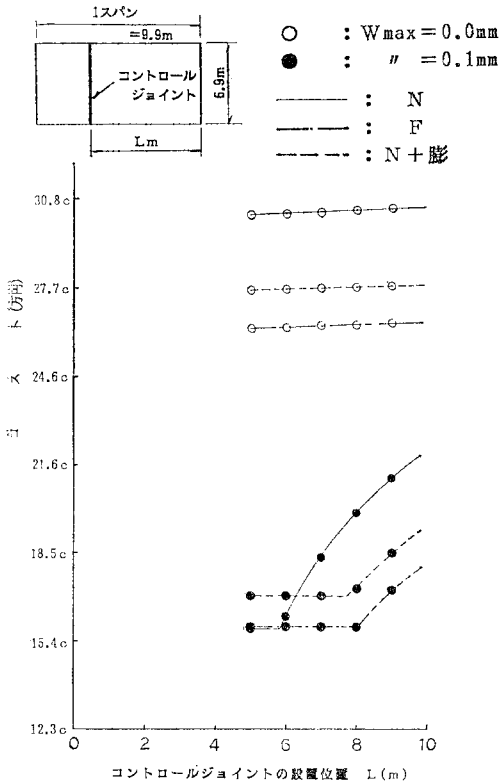


図-15 コントロールジョイントの設置位置が異なる場合の1スパン当りのコスト(コントロールジョイント1本で、全スパンをブロック長の長い場合の対策で施工した場合)

来、経験的に選定されていたひびわれの制御対策を、合理的に選定することができる。

本研究で提案した選定方法は、制御対策をコントロールジョイント、鉄筋および使用セメントの種類の3つに限定したものであるが、今後他の対策も検討に加えていくことは可能であると考えられる。

あとがき

本研究は、現場試験により都市 NATM トンネル覆工

コンクリートのひびわれ制御対策の効果を定量的に検討し、さらに、この結果に基づいて経済性を考慮した覆工コンクリートのひびわれ制御対策の選定方法を提案したものである。得られた主な成果を列挙すれば、次のとおりである。

(1) 覆工コンクリートのひびわれ幅およびひびわれ面積の制御対策としては、従来、カルバートなどの壁状構造物で指摘されているコントロールジョイント(ひびわれ制御目地)およびひびわれ直交方向の鉄筋の配置が効果的であることが定量的に認められた。

(2) 覆工コンクリートに発生する最大ひびわれ幅は、コントロールジョイントの本数、鉄筋比、コンクリートの配合等を変数に使うことにより定量的に表現することができる。

(3) ひびわれの制御対策を経済的に選定することができる。

本研究は、一つのトンネルを対象としたものであるので、今後種々の地質および形状寸法での NATM トンネルにおいて、本研究で提案した制御対策の選定方法の適用性を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本トンネル技術協会：NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，昭和 58 年 3 月。
- 2) 西脇芳文・新津 強・小野 定：都市 NATM の覆工コンクリートのひびわれ制御対策についての一考察，第 40 回土木学会年次学術講演会 講演概要集，第 5 部門，pp. 549~550，1985 年 9 月。
- 3) S. Ono, et al. : Evaluation of External Restraining Effect and Prediction Method for Thermal Cracks in High Strength Lightweight Concrete, 土木学会論文集, No. 354/V-2, pp. 147~155, 1985 年。
- 4) 小野 定・名倉健二・金森洋史：マスコンクリートの温度ひびわれの数量化に関する一研究，第 38 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，pp. 391~392，1983 年 10 月。

(1985.10.15・受付)

●土木学会新刊案内●

コンクリート・ライブラリー第 58 号

エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる

鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)

B 5 判一部カラー 174 ページ 定価 4 000 円 会員特価 3 500 円 (〒 350)

脚光をあびつつある EP 鉄筋のすべてがわかる新しい指針案なる