

半地下トンネルにおける誘発目地工法の設計法に関する一考察

A STUDY OF THE DESIGN METHOD FOR THE DUMMY JOINTS IN TUNNELS

栖原 秀郎*、長谷川 豊**、藤井 康寿***、中川 建治****、服部 育男*****
Hideo SUHARA, Yutaka HASEGAWA, Koji FUJII, Kenji NAKAGAWA and Ikuo HATTORI

*工修 岐阜大学博士課程 工学部 土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
** 岐阜大学修士課程 工学部 土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
***工修 岐阜大学助手 工学部 土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
****工博 岐阜大学教授 工学部 土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
*****建設省 建設監督官 名四国道工事事務所 (〒467 愛知県名古屋市瑞穂区神穂町5-3)

In tunnel construction, the side wall concrete is placed, after the underflow concrete is hardened. Cracks may occur because the wall concrete is restricted by the underflow concrete. One of the countermeasures is to prepare some dummy joints there.

In this report, the crack opening displacements of the dummy joints and the stress distribution will be analysed and compared with the measured value and then a design method for the interval of the dummy joints will be proposed.

A half infinite elastic plane with cracks in vertical to rigid edge is taken as the analytical model, and then the theoretical solution with finite stress concentration at the crack tips is derived and used.

Key Word: crack, crack inducer, rigid edge, finite stress concentration

1. はじめに

近年のコンクリート構造物の大型化の傾向に伴ってマスコンクリートに生じる温度応力と温度ひびわれの問題がクローズアップされている。高速道路の半地下トンネル構造においても、かねてからこのマスコンクリートの温度ひびわれ対策が問題となっている。最近ではその対策として、誘発目地工法が採用されることが多い。しかしその形状やピッチについては、種々の方法が提案実施されているがいまだ設計法が確立されていないのが現状である。

本文は、従来著者等が提案している『亀裂先端で有限な応力集中を構成する応力関数』^{1), 2)}を用いて誘発目地工法の設計法(目地間隔の決定法等)に関する検討を行い、実施工における計測結果と比較することによってその整合性を確かめたものである。

理論の特徴は、次のような応力状態を解析し得る応力関数を準備したことである。直線状の固定辺(半地下トンネルの底版部相当部分)を持つ半無限弾性平板の内部に、固定辺に直角方向にクラック(誘発目地のひびわれ)が生じている板を対象とする。このクラック先端には無限大の応力集中を避けるためにプロセスゾーン相当部分が構成されていて有限で滑らかな応力分布と開口が生じ

る(著者等の従来の研究の特性)ような応力関数を導いた。これらの理論の検証として実施工の半地下トンネルの誘発目地の計測値を活用し、目地間隔の合理的な設定法を模索したものである。

2. 誘発目地工法の概要³⁾

一般には、マッシブな壁状の構造物等に発生する温度ひびわれを材料やその配合上の対策等により制御することは比較的難しいが、その対策工法として前述の誘発目地工法がある。この工法は、構造物の長手方向に一定間隔で断面減少部分を設け、その部分にひびわれを誘発して、その他の部分のひびわれ発生を防止あるいは制御するとともに当該のひびわれ誘発箇所での事後処理を容易にするものである。予定箇所にはひびわれを確実に誘発するには、誘発箇所での断面減少を20%以上とする必要がある。ひびわれ誘発目地の間隔は、4~5m程度を目安とするが、この間隔は構造物の寸法、鉄筋量、打込み温度、打込み方法等に大きく影響されるのでこれらを考慮して決める。また、ひびわれ誘発後ひびわれ誘発部からの漏水、鉄筋の腐食等を防止する場合には、適切な補修を行う。誘発目地の例およびその補修方法を図-1および図-2に示す。

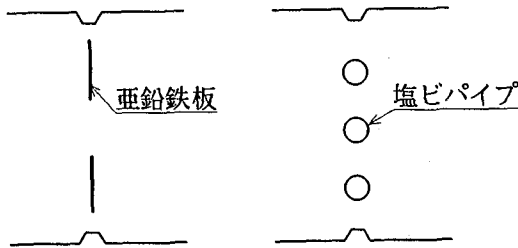


図-1 誘発目地の例

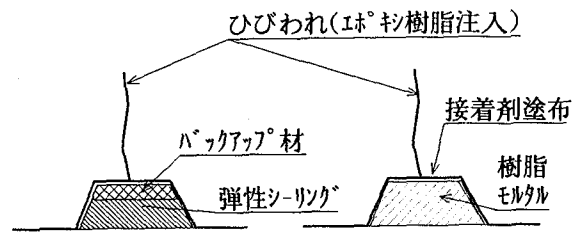


図-2 誘発目地の補修方法

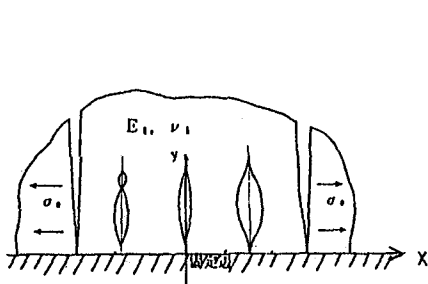


図-3 解析モデル

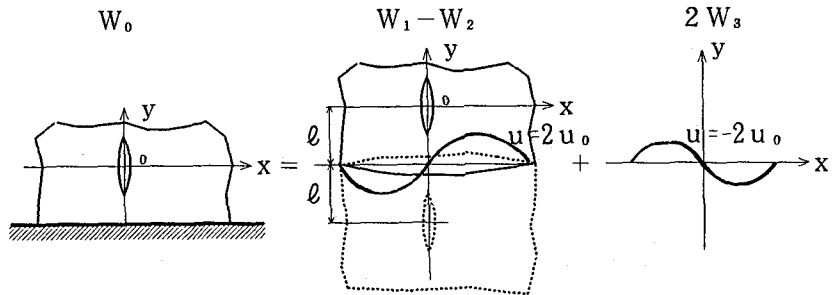


図-4 固定辺周辺のクラックを表現する応力関数の構成法

3. 従来の設計法

誘発目地工法の設計法（目地間隔の決定法）については、現状においては明確な算定方法はまだ確立されていないが、一般的に行われている方法として、次のような方法⁴⁾がある。

- (1) 類似構造物に発生したひびわれ間隔に基づいて、その平均間隔の1～1.5倍とする方法
- (2) 類似構造物の施工例を参考に決める方法
- (3) 温度ひびわれ指数による方法

ここでは、(3) 温度ひびわれ指数による方法について簡単に説明する。

- 1) 構造形式、断面、材料、配合、施工法等を仮定する。
- 2) 上記仮定に基づいて温度予測計算を行う。
- 3) 上記の条件に基づき温度応力解析を行う。
- 4) 上記の温度応力解析により、温度ひびわれ指数を求める。
- 5) 求めた温度ひびわれ指数が所定の値（例えば1.5）となるように、 L （スパン長）/ H （高さ）の L を変えながら計算を繰り返しスパン長 L （誘発目地間隔）を決定する。

なお、温度応力解析の方法には、ACIの方法に代表される簡易法、有限要素法等の精解に近い近似解を与えるJCIマスコングクリートの温度応力研究委員会の方法（CP法）⁵⁾と有限要素法、差分法等の精算法がある。

ACIの方法による応力の算定方法（外部拘束による応力 σ_s ）は、つぎのとおりである。

$$\sigma_s = K \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

ここに、 σ_s ：外部拘束による応力（kgf/cm²）

K ：拘束度

E_c ：有効弾性係数（kgf/cm²）

α ：線膨張係数（1/°C）

ΔT ：コンクリート壁体に生ずる温度変化（°C）

また、CP法による応力の算定方法（外部拘束による応力 σ_s ）は、つぎのとおりである。

$$\sigma_s = \sum \Delta \sigma_{Ri}$$

$$\Delta \sigma_{Ri} = \Delta N_{Ri} / A + \Delta M_{Ri} \cdot y / I$$

ここに、 σ_s ：外部拘束による応力（kgf/cm²）

$\Delta \sigma_{Ri}$ ：材令 t_{i-1} から材令 t_i 間に生じる応力増分

ΔN_{Ri} ：材令 t_{i-1} から材令 t_i 間に生じる拘束軸力

ΔM_{Ri} ：材令 t_{i-1} から材令 t_i 間に生じる拘束曲げモーメント

A ：マスコングクリートブロックの断面積

I ：マスコングクリートブロックの断面二次モーメント

y ：マスコングクリートブロックの重心位置からの距離

また、温度ひびわれ指数 $I_{cr}(t)$ は、つぎのように表される。

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_s(t) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_s(t)$ ：材令 t 日における温度応力の最大値（kgf/cm²）

$f_t(t)$ ：材令 t 日におけるコンクリートの引張強度（kgf/cm²）

以上が従来の方法である。

4. 著者等の解析手法

著者等の解析手法も、3. 従来の設計法で述べた1)～3)までは同じである。すなわち、構造、材料、施工法等の条件を設定し、それに基づいて所定の位置で発生する温度応力を何らかの方法（例えば、ACIの方法、

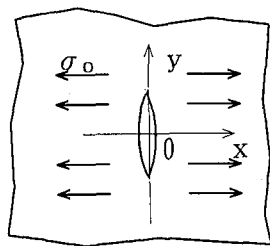


図-5 直線状クラックを有する無限板が
一様引張り応力を受ける問題

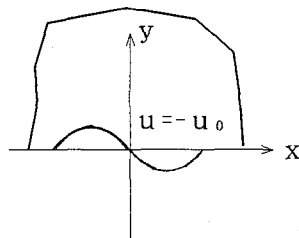


図-6 変位 \$u_0\$ を打消す曲面

CP法、有限要素法あるいは類似の計測データ等)で求める。次に、以下の方法で構造物全体の応力分布と設定した位置での誘発目地の開口量(ひびわれ幅)を算定し、構造物の重要度、耐用年数、用途等を勘案して目地間隔を決定するものである。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。本モデルは、図示のように半無限(片側)クラック、直線状対称開口クラック、逆対称開口形状(8の字)クラックが固定辺周辺に存在する場合の解析が可能である。

ここで、半無限(片側)クラックは伸縮目地(施工目地)を、直線状対称開口クラック、逆対称開口形状(8の字)クラックは、誘発目地を表現するために用いる。誘発目地部で最もポピュラーな開口形状は壁高の中央部で開口が最大となり上縁、下縁で0となるもので直線状対称開口クラックで表される。また、逆対称開口形状(8の字)クラックは亀裂変位計で計測した場合の誘発目地部の間隔の減少すなわち、めり込みを表現することができる。

(2) 固定辺近傍のクラックにx軸方向に一様引張り応力が作用する場合の半無限板の応力関数の構成法

固定辺近傍のクラックを構成する応力関数 \$W_0\$ は、次のように表すことができる。(図-4参照)

$$W_0 = W_1 - W_2 + 2W_3 \quad (3)$$

\$W_0\$: 固定辺近傍のクラックを構成する応力関数

\$W_1\$: 無限板内に含まれるクラックの開口を構成する基本応力関数

\$W_2\$: \$W_1\$ をy軸方向に \$-2\ell\$ シフトした曲面(よって、\$W_2\$ は \$y = -\ell\$ 軸を対称軸として \$W_1\$ を完全に反転した曲面を表す。)

\$W_3\$: \$W_1\$ および \$W_2\$ による \$y = -\ell\$ における変位 \$u_0\$ を打消す曲面

\$c_0\$: x軸(クラックの中心位置)から固定辺までの距離
\$u_0\$: \$W_1\$ および \$W_2\$ による \$y = -\ell\$ における変位 \$u_0\$。

すなわち、固定辺を有する半無限板の開口を表現する応力関数を構成するには、まず無限板中のクラックを表す基本曲面 \$W_1\$ に \$y = -\ell\$ 軸を対称軸として \$W_1\$ を反転した解 (\$-W_2\$) を重ね合わせる。ここで、\$y = -\ell\$ 軸上の \$v\$

は0、\$u\$ は \$2u_0\$ となる。ただし、\$u_0\$ は \$W_1\$ および \$W_2\$ の \$y = -\ell\$ 軸上のx方向変位である。次に、この変位に対しx軸上を自由辺に持つ半無限板に \$-u_0\$ が作用したものである \$W_3\$ (\$u_0\$ 打消し曲面)を重ね合わせると、\$y = -\ell\$ 軸上で \$u = 0\$、\$v = 0\$ を実現し固定辺を構成できるのである。ただしこれらを重ね合わせて固定辺を実現させるとクラック部分における応力解放の条件が多少乱されるがこれらについては選点法によってクラック部分について重ね合わせた最終状態の応力が0となるよう調整する。

5. 開口用応力関数

前記の解析手法を用いて固定辺近傍にクラックが存在する場合の応力関数を導くことができる。紙面の都合上、応力関数に関する詳細な誘導式は割愛して、応力関数は結果のみを示す。

(1) 固定辺に直角に直線状クラックが存在する解

a) 直線状クラックを有する無限板が一様引張り応力を受けている問題の解は(4)のように表される。

(図-5参照)

$$\nabla^2 \nabla^2 W_1 = 0$$

$$W_1 = \bar{z}\phi + \phi \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\sigma_0}{2} \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{\sqrt{z^2 + a^2}}, \quad \phi' = \frac{-\sigma_0 a^2}{2 \sqrt{z^2 + a^2}}$$

b) 直線状クラックを有する無限板が一様引張り応力を受けている問題の \$y = -\ell\$ における変位 \$u_0\$ を打消す曲面の解は、(5)のように表される。(図-6参照)

$$\nabla^2 \nabla^2 W_3 = 0$$

$$W_3 = \bar{z}\phi + \phi \quad (5)$$

$$\phi = \frac{-\sigma_0}{4} \left\{ \sqrt{(z + i\ell)^2 + a^2} - \frac{z^2 + \ell^2 - a^2}{\kappa \sqrt{(z + i\ell)^2 + a^2}} \right\}$$

$$\phi' = \frac{-\sigma_0}{4} \left[\frac{(z + i\ell)^2 - 2z/\kappa}{\sqrt{(z + i\ell)^2 + a^2}} + \frac{(z^2 + \ell^2 - a^2)(z + i\ell)}{\kappa \{(z + i\ell)^2 + a^2\}} \right]$$

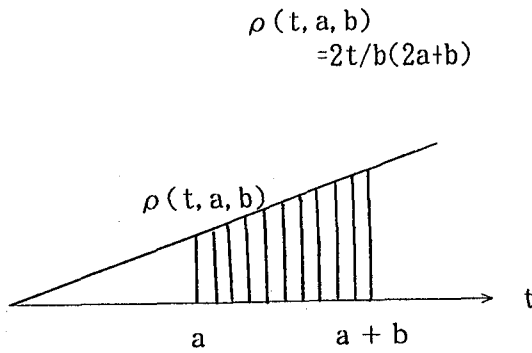


図-7 重み関数 ρ の形状

$$\phi' = -\kappa \phi - z\phi'$$

$$\kappa = \begin{cases} 3-4\nu & (\text{平面ひずみ状態}) \\ (3-\nu)/(1+\nu) & (\text{平面応力状態}) \end{cases}$$

c) 著者等の手法で有限化された直線状クラックの問題
著者等は、既に種々の問題について重み積分法によりクラック先端で有限な応力集中を構成する応力関数を導いている。その手法を式(4)、(5)に適用すると、クラック先端に無限大の応力集中を生じる基本曲面 W_1 と W_1 および W_2 による $y=-\ell$ における変位 u_0 を打ち消す曲面 W_3 は、式(6)、(7)のとおりとなる。これらについても、式(1)を適用しそれぞれの曲面 (W_1' , W_2' , W_3') を重ね合わせることによって固定面近傍のクラックの開口曲面を表現する応力関数を構成することができる。

なお、今回の重み積分に使用する重み関数 ρ は図-7に示す形状を持ち、定義域を $(a, a+b)$ として総面積が1になるように基準化されたもので次のように表される。これは、最も積分計算に都合がよい形を採用したものである。ここで、この重み関数を用いて積分し応力を有限化するという事は、あたかも作用する集中荷重による応力分布を分布荷重による応力分布に置き換えたような意味合いを持っている。(図-7, 8参照) 具体的には、プロセスゾーン幅で重み積分を行い応力を有限化する。

d) 直線状クラックを有する無限板が一様引張力を受けている問題の解は、著者等の有限化手法により次のように表される。ここで、 ρ は前述のとおり図-7に示す重み関数である。

$$\nabla^2 \nabla^2 W_1' = 0$$

$$W_1' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$\phi = \frac{\sigma_0 \rho}{6} [\{z^2 + (a+b)^2\}^{3/2} - \{z^2 + a^2\}^{3/2}] \Big|_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = -\frac{\sigma_0 \rho}{2} \left[\frac{1}{3} (z^2 + t^2)^{3/2} - z^2 \sqrt{z^2 + t^2} \right] \Big|_a^{t=a+b}$$

e) 直線状クラックを有する無限板が一様引張り応力を

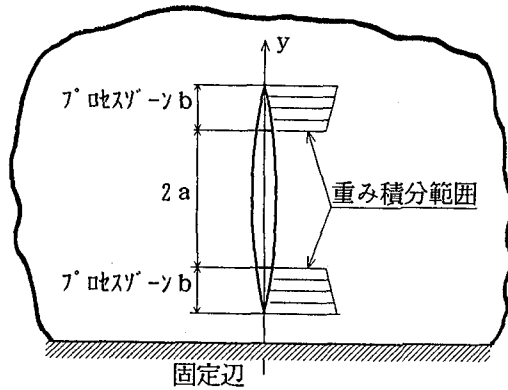


図-8 有限化された直線状クラックモデル

受けている問題の $y=-\ell$ における変位 u_0 を打ち消す曲面の解は、著者等の有限化手法により次のように表される。

$$\nabla^2 \nabla^2 W_3 = 0$$

$$W_3' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$(7)$$

$$\phi = -\frac{\sigma_0 \rho}{4} \left[\frac{(\kappa+1)}{3\kappa} \{t^2 + (z+i\ell)^2\}^{3/2} - \frac{2z(z+i\ell)}{\kappa \sqrt{t^2 + (z+i\ell)^2}} \right] \Big|_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = -\frac{\sigma_0 \rho}{4} \left[\frac{(\kappa+1)}{\kappa} (z+i\ell) \sqrt{t^2 + (z+i\ell)^2} - \frac{(4z+i2\ell)}{\kappa \sqrt{t^2 + (z+i\ell)^2}} - \frac{2z(z+i\ell)^2}{\kappa t^2 + (z+i\ell)^2} \right] \Big|_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = -\kappa \phi - z\phi'$$

以上の方法により、固定面近傍に直線状クラックが存在する場合の応力関数を導くことができる。また、半無限(片側)クラックおよび逆対称開口形状(8の字)クラックについても、同様にして有限化された基本関数および変位 u_0 を打ち消す曲面を表現できる。これらの応力関数について以下に示す。

(2) 固定面に直角に半無限(片側)クラックが存在する解

a) 基本関数

$$\nabla^2 \nabla^2 W_1' = 0$$

$$W_1' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$(8)$$

$$\phi = \rho e^{i3\pi/4} \left[\frac{i2}{3} t(z-i t)^{3/2} + \frac{4}{15} (z-i t)^{5/2} \right] \Big|_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = \rho e^{i3\pi/4} \left[i t \sqrt{z-i t} + \frac{2}{3} (z-i t)^{3/2} \right] \Big|_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = -\phi + z\phi'$$

b) 変位 u_0 を打ち消す曲面

$$\nabla^2 \nabla^2 W_3 = 0$$

$$W_3' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$(9)$$

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{-\rho}{2\kappa} [(\kappa+1)e^{-i3\pi/4} \left\{ \frac{i2}{3} t(z+i\ell+i t)^{3/2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{15} (z+i\ell+i t)^{5/2} \right\} + 2e^{-i3\pi/4} \cdot \\ &\quad \left. z \{ i t \sqrt{z+i\ell+i t} - \frac{2}{3} (z+i\ell+i t)^{3/2} \} \right]_{a}^{t=a+b} \\ \phi' &= \frac{-\rho}{2\kappa} [(\kappa-1)e^{-i3\pi/4} \{-i t(z+i\ell+i t)^{1/2} \\ &\quad + \frac{2}{3} (z+i\ell+i t)^{3/2}\} \\ &\quad + e^{-i3\pi/4} z \{ \frac{i t}{\sqrt{z+i\ell+i t}} - 2\sqrt{z+i\ell+i t} \}]_{a}^{t=a+b} \\ \phi' &= -\kappa\phi - z\phi'\end{aligned}$$

(3) 固定辺に直角に逆対称開口形状(8の字)クラックが存在する解

a) 基本関数

$$\nabla^2 \nabla^2 W_1' = 0 \quad (10)$$

$$W_1' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$\phi = i\rho \left[\frac{z}{3} (z^2+t^2)^{3/2} \right]_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = i\rho \left[\frac{1}{3} (z^2+t^2)^{3/2} + z^2 \sqrt{z^2+t^2} \right]_a^{t=a+b}$$

$$\phi' = z\phi' - \phi$$

b) 変位 u_0 を打ち消す曲面

$$\nabla^2 \nabla^2 W_3' = 0$$

$$W_3' = \bar{z}\phi + \phi$$

$$\phi = \frac{i\rho}{2\kappa} \left[\frac{1}{3} \{ (\kappa-1)z + (\kappa+1)i\ell \} \{ (z+i\ell)^2 + t^2 \}^{3/2} \right. \\ \left. - 2z(z+i\ell)^2 \sqrt{(z+i\ell)^2 + t^2} \right]_a^{t=a+b}$$

$$\begin{aligned}\phi' &= \frac{i\rho}{2\kappa} \left[\frac{1}{3} \{ (\kappa-1)z + \{ (z+i\ell)^2 + t^2 \}^{3/2} \right. \\ &\quad \left. + \{ (\kappa-7)z + (\kappa-1)i\ell \} \sqrt{(z+i\ell)^2 + t^2} (z+i\ell) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2z(z+i\ell)^3}{\sqrt{(z+i\ell)^2 + t^2}} \right]_a^{t=a+b}\end{aligned}$$

$$\phi' = -\kappa\phi - z\phi'$$

6. 力学的諸係数および設定条件の決定

誘発目地工法の設計法について、従来の方法と著者等

の方法との比較検討に当たり図-9に示す構造形式をもつ半地下トンネルをモデルとする。これらの解析に用いる力学的諸係数および設定条件は、次のとおりである。

なお、これら諸係数は材令とともに変化するので、実際には経時的な検討が必要であるが、本文では計算手法を問題としているので、コンクリートの材令28日の場合を例に諸係数を設定した。

よって、ここでは瞬間的な解析を行っているが経時的な解析も内部に発生する応力履歴等を正確にいずれかの方法で求めるならば、著者等の方法で誘発目地部のクラック周辺および一般部の変位および応力について求めることができる。

また、実際の配筋では主筋がD29でピッチが150mm 配筋筋がD22でピッチが250mm で配置されこれらの影響とともにクリープ、材令、乾燥収縮等の影響も考慮し力学的諸係数を決定した。すなわち、コンクリートの有効弾性係数 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ にはこれらの影響を考慮した値となっている。クラック発生地点の拘束度 $K = 0.55$ ($h/H = 0.1$) についても、底盤と側壁コンクリートの剛性比による拘束度の低減を考慮した値となっている。

これら諸係数の設定に当たって細かい計算は省略するが、ひびわれ制御指針⁶⁾ および計測結果⁷⁾ の例に基づいて算出している。その結果は次のとおりである。

コンクリートの有効弾性係数 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

” ポアソン比 $\nu = 0.167$

” 設計基準強度 $\sigma_{CK} = 240 \text{ kgf/cm}^2$

” 引張り強度 $f_t(28) = 24 \text{ kgf/cm}^2$

” 温度変化 $\Delta T = 25^\circ \text{C}$

” 線膨張係数 $\alpha = 10^{-5}/^\circ \text{C}$

クラック発生地点の拘束度 $K = 0.55$ ($h/H = 0.1$)

7. 従来の方法と著者等の方法との比較検討

前項で設定した力学諸係数に基づき従来の方法と著者等の方法で行った解析結果を次に示す。

(1) 従来の方法

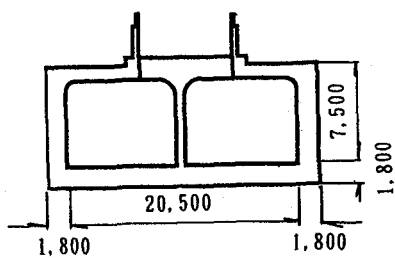
ACIの方法では構造物の L (λ°ソ長) / H (高さ) が1以上についてしか規定していない。よって、 $H = 7.5\text{m}$ なので $L = 7.5\text{m}$ (取り得る最小値) とすると式(1)。

(2) より

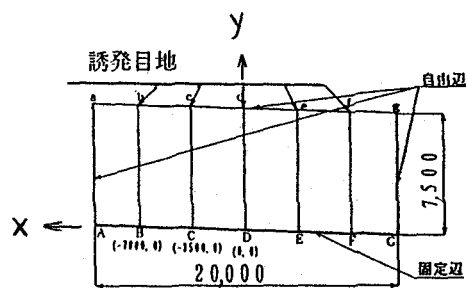
$$\begin{aligned}\sigma_t &= K \cdot E_s \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0.55 \times 2.0 \times 10^5 \times 10^{-5} \times 25 \\ &= 27.5 \text{ kgf/cm}^2 \quad (L/H = 0.1 \text{ 付近})\end{aligned}$$

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t) = 24 / 27.5 = 0.87$$

となる。よって、仮にひびわれが発生しないといわれているひびわれ指数1.5を確保しようとした場合、ACIの方法では L/H が1以上についてしか規定していないので正確には算出できないが、拘束度 K が L/H に反比例するとすれば、誘発目地間隔 L は4.35mとなる。



a) 横断面図



b) 縦断面図

図-9 半地下トンネル解析モデル

誘発目地間隔 $L = 3.5 \text{ m}$

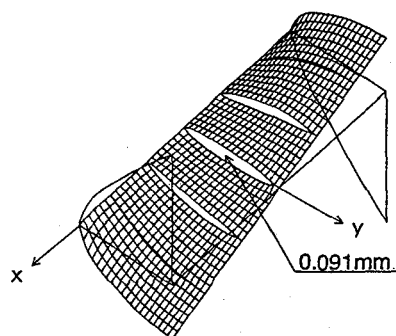


図-10 変位図 u

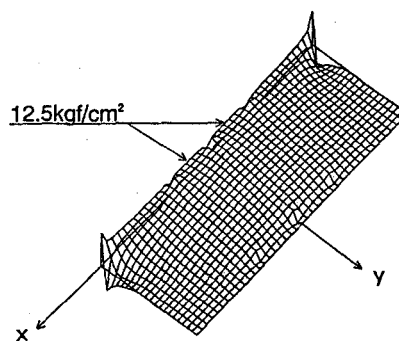


図-11 応力図 σ_x

誘発目地間隔 $L = 4.0 \text{ m}$

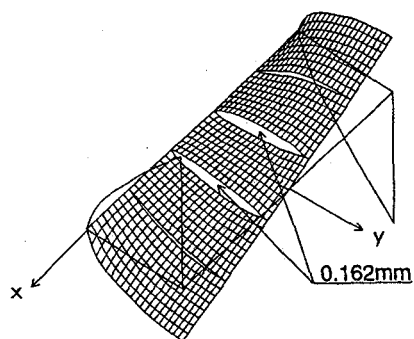


図-12 変位図 u

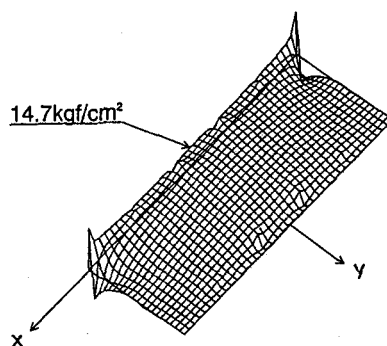


図-13 応力図 σ_x

誘発目地間隔 $L = 5.0 \text{ m}$

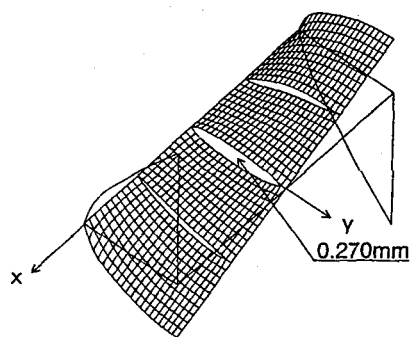


図-14 変位図 u

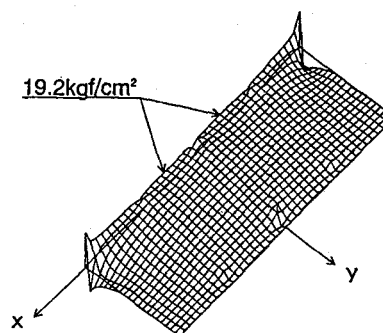


図-15 応力図 σ_x

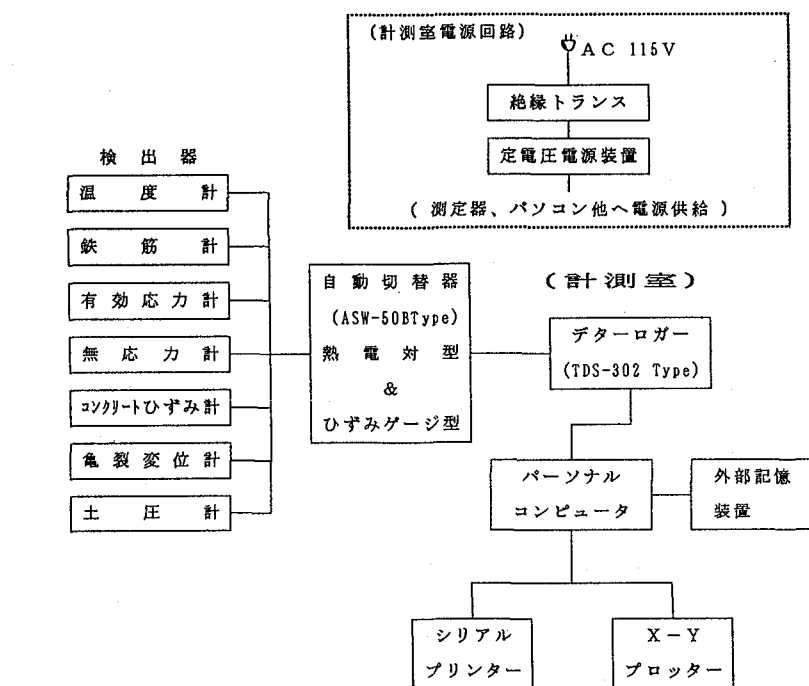


図-16 計測システム

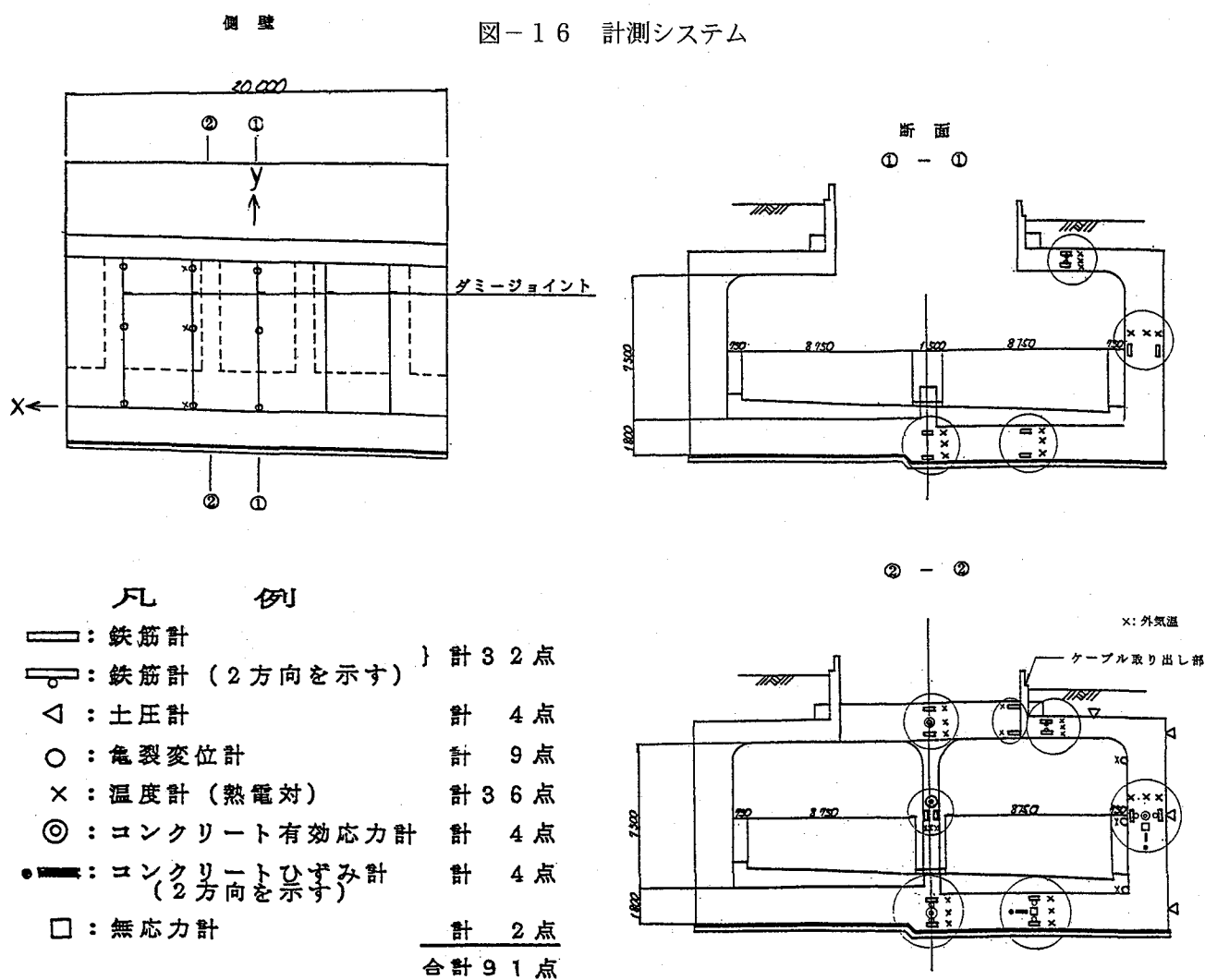


図-17 計器配置図

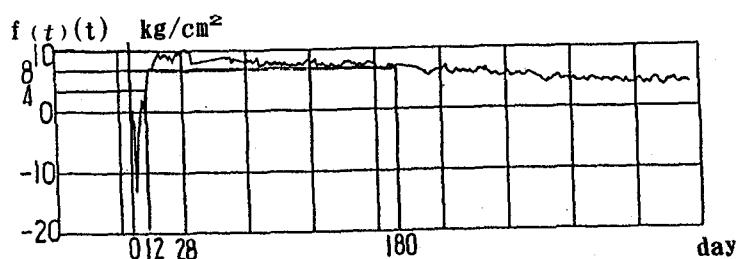


図-18 発生応力の経時変化

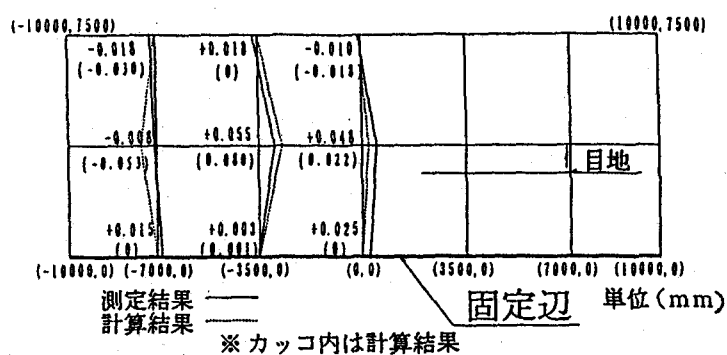


図-19 誘発目地の伸縮量調査結果 (12日)

表-1 誘発目地の伸縮量の経時変化

320日	接合目地	目地(A)	目地(B)	目地(C)
函体中央からの距離(m)	10.000	7.000	3.500	0.000
変位量(mm)				
上(U)	2.168	0.060	0.528	0.355
中(M)	0.788	0.228	1.255	-1.165
下(L)	-0.250		-0.008	-0.120

260日	接合目地	目地(A)	目地(B)	目地(C)
函体中央からの距離(m)	10.000	7.000	3.500	0.000
変位量(mm)				
上(U)	0.500	0.018	0.473	0.178
中(M)	-0.785	0.168	0.863	-1.165
下(L)	-1.058	-0.145	-0.063	-0.153

180日	接合目地	目地(A)	目地(B)	目地(C)
函体中央からの距離(m)	10.000	7.000	3.500	0.000
変位量(mm)				
上(U)	-0.900	-0.155	+0.073	-0.053
中(M)	-1.990	-0.125	+0.145	-1.163
下(L)	-1.383	-0.098	-0.145	-0.223

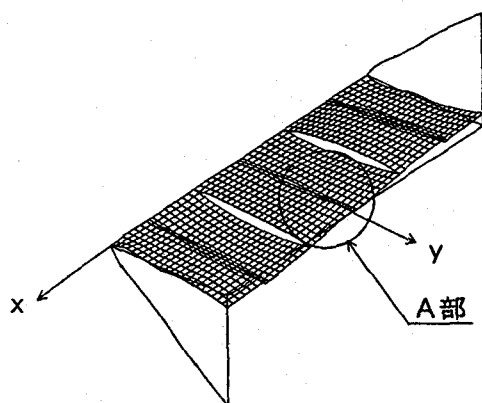


図-20 変位図 u

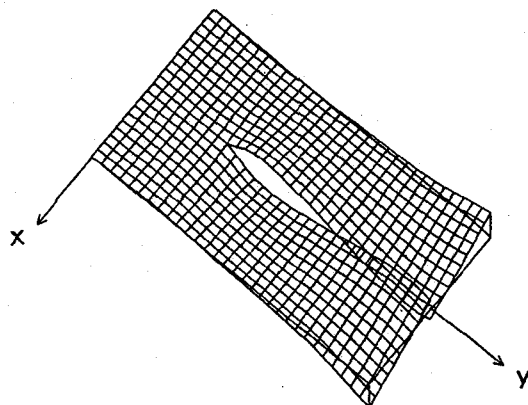


図-21 変位図 u (A部詳細図)

表－２ ６ヶ月後の誘発目地の開口量調査結果⁸⁾と解析結果

底板からの 高 さ	打設後 6 ヶ月の目地開口量測定値 (mm)				
	誘発目地の位置				
	-7,000	-3,500	0	3,500	7,000
6 m	0	0.04	0.04	0.04	0
5 m	0	0.04	0.04	0.06	0
4 m	0	0.06	0.04	0.15	0.06
3 m	0.06	0.06	0.10	0.15	0.08
2 m	0.10	0.15	0.20	0.20	0.10
1 m	0.06	0.20	0.10	0.20	0.10

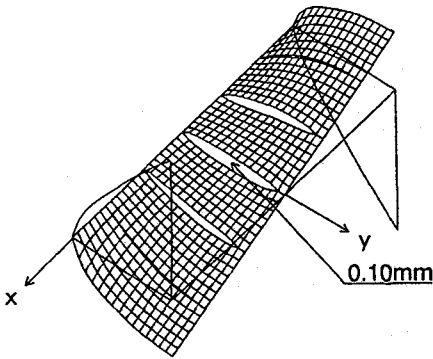
底板からの 高 さ	目地開口量解析結果 (mm)				
	誘発目地の位置				
	-7,000	-3,500	0	3,500	7,000
6 m	0.01	0.05	0.07	0.05	0.01
5 m	0.01	0.07	0.09	0.07	0.01
4 m	0.01	0.08	0.10	0.08	0.01
3 m	0.01	0.08	0.10	0.08	0.01
2 m	0.01	0.07	0.09	0.07	0.01
1 m	0.01	0.06	0.07	0.06	0.01

(2) 著者等の方法

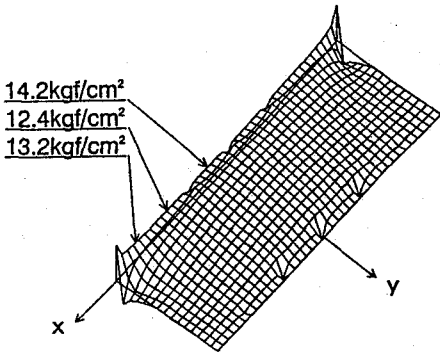
著者等の方法による誘発目地間隔 3.5 m, 4.0 m, 5.0 m の 3 とおりに関する解析結果 (変位図および応力図) を図-10~15 に示す。なお、発生応力 σ については、ACI の方法では、算出できないので今回は計測結果⁸⁾ の例 (側壁の中央部分 $L/H=0.5$ で 10kgf/cm^2 を参考とした。なお、この数値の採用はコンクリートの引張強度とひびわれ発生との相関関係考えて妥当な値と判断した。) の値 10kgf/cm^2 を無限遠方での一様引張応力として用い解析を行った。以上の結果より、当然のことであるが誘発目地本数が増えれば誘発目地開口量 (ひびわれ幅) は小さくなる。またこれらひびわれ幅は、 $0.1\text{mm}\sim0.3\text{mm}$ の値となっている。構造物の重要度、耐用年数、用途等を勘案して目地間隔を決定し、これらの中から選定すればよい。応力については、固定辺周辺の特に各誘発目地の中間で発生している値は、 $12\text{kgf/cm}^2\sim20\text{kgf/cm}^2$ であり引張り強度 (24kgf/cm^2) との関係よりひびわれ指数を計算して、所定の値を満足するものを選定すればよい。仮に許容ひびわれ幅を 0.2mm 、必要ひびわれ指数を 1.5 とすると、誘発目地間隔は 4.0 m が選定される。

これらの計算を経時的に繰り返し行い、最終的に誘発目地間隔を決定する。

8. 実施工での計測結果との比較検討



図－２２ 変位図 u



図－２３ 応力図 σ_x

国道 302 号小幡改良工事と国道 302 号猪高改良工事について計測結果^{7), 8)} と著者等の方法による解析結果との整合性について検証する。なお、構造は図-9 に示した解析モデルと同様である。

図-16~図-17 に国道 302 号小幡改良工事における半地下トンネル部の計測システムと計器配置図を示す。図-18 に側壁部の発生応力の経時変化を示し、図-19 と表-1 に 12 日後の誘発目地の亀裂変位計による伸縮量調査結果 (変位計設置後 2 日) とそれ以降の伸縮量の経時変化を示す。また、図-20 および図-21 に著者等の方法による変位 u の解析結果を示す。変位については、半無限 (片側) クラック、直線状対称開口クラック、逆対称開口形状 (8 の字) クラックを組み合わせた、重ねた合わせることで実際のクラックの開口形状を表現し得ることがわかる。特に、亀裂変位計による収縮側の値 (めり込んだクラック) を逆対称開口形状 (8 の字) クラックによって表現し得た。しかし、目地開口形状特性は、よく近似できているものの変位量については、解析結果のほうが大きめの値が出ている。

これは、本解析の性質上コンクリートの若令期については、変位が大きめにでることと、コンクリート打設後 12 日を経ているけれども型枠解体後に亀裂変位計を設置するため、計器設置後 2 日しか経ていないので、硬化型枠解体前後のクラック開口量を見落としているためである。(本データは、開口量ではなく伸縮量である。)

すなわち、この場合型枠解体前後の開口量を見落とし
ているため実際例とひびわれ開口形状をある程度整合さ
せた場合有効弾性係数が $E=3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となり実際
には、 $E=2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 以下と考えられるのでこの場
合、変位がより大きくなると考えられる。また、本解析
法の特徴である開口変位と応力が共存する遷移区間（プ
ロセスゾーン）を構成したことにより、有限応力を実現
し多少大きな変位が生じる解を導いたこと起因して、
弾性係数が小さい場合に開口変位量がより顕著になるこ
とも一因であろう。

よって、著者等の方法は、解析法としては合理的であ
ると思われる。著者等の導いた応力関数は、プロセスゾ
ーンの長さを変えたり、複数のクラックを組み合わせる
ことによってどのようなクラック形状にも対応でき、こ
の点に本解析法の最大の特徴がある。

表-2に国道302号猪高改良工事における半地下ト
ンネル側壁部の6ヶ月後の誘発目地の開口量（ひびわれ
幅）調査結果⁹⁾と解析結果を示す。また、図-22および
図-23に著者等の方法による変位および応力の解析結果
を示す。誘発目地の開口量（ひびわれ幅）について、よ
く近似できていることがわかる。なお、今回使用した有
効弾性係数は $E=2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ である。

以上の結果より、固定辺を持つ板の内部にプロセスゾ
ーンを持ち有限な応力集中を構成する、クラック開口関
数を活用することによって、実施工の計測値と同程度の
開口量と応力値を導き得たと考えられる。

なお、誘発目地が固定辺に接近に接近する部分、（解
析上では半無限クラック開口部の先端部分）には有限で
あるが大きな応力集中が生じているのが図-11、図-13
図-15あるいは図-23（応力図中の固定辺両端部）で明
かである。

本解析上では応力と開口変位が共存しつつ近傍を固定
するという力学的条件が実現されているのであるが、実
際にはコンクリートの塑性と破壊が生じている部分と思
われる。

本研究はこの点に言及し得るものではないが、誘発目
地に挟まれる部分に発生する可能性があるクラックにつ
いての検討を可能にしたものとして有効な解析法の一つ
であると思われる。

なお、著者等の調査では誘発目地部以外でのひびわれ
についても皆無とは言え難く今後の検討事項と考えられ
る。

9. むすび

近年、マスコンクリートの温度ひびわれ対策として、

誘発目地工法が採用されることが増えつつあるが、いま
だ設計法が確立されていないのが現状である。本文は、
従来著者等が提案している『ひびわれの先端で有限な応
力集中を構成する応力関数』^{1), 2)}を用いて誘発目地工
法の設計法（目地間隔の決定法等）に関する検討を行い、
実施工の計測値との整合性について検証を行った。

誘発目地の開口量（ひびわれ幅）および開口形状につ
いて、ほぼ実際の形状を表現しうることが分かった。ま
た、応力についても、固定辺周辺のひびわれの発生が予
測される位置付近の応力状態を表現し得ることが分かつた。
しかし、半地下トンネルに生じるひびわれ発生メカ
ニズムやひびわれの進展に関する問題については、例え
ば型枠を外した時点では既に誘発目地部にひびわれは発
生しており、どこに最初にひびわれが発生するかを限定
する事さえも難しい。今後、許容ひびわれ幅およびひび
われ指数をいくりにするのかと言った問題を含め研究を
進めてゆく必要があろう。

著者等の導いたこの応力関数は、理論を更に自由辺周
辺の応力解析にまで発展させ、くさび貫入による岩盤掘
削工法あるいは、静的破碎剤工法の破壊機構の解析への
応用が可能である。

参 考 文 献

- 1) 栖原秀郎・中川建治: 亀裂先端部分で有限な応力集中を構成する応力関数に関する研究, 土木学会論文集, No. 501/ I-29, pp. 65-74, 1994.
- 2) 段樹金・児嶋弘行・中川建治: 亀裂先端部分で有限な応力集中を与える応力関数, 土木学会論文集, No. 374 / I-6, pp. 399-407, 1986.
- 3) 土木学会編: コンクリート標準示方書 施工編, pp131-132, 1991.
- 4) 土木学会編: コンクリートライブラリー第70号, pp227-229, 1991.
- 5) 土木学会編: コンクリート標準示方書 施工編, pp141-144, 1991.
- 6) 日本コンクリート工学協会編: マスコンクリートのひびわれ制御指針, pp60-72, 1986.
- 7) 建設省中部地方建設局愛知国道工事事務所編: 302号小幡改良その2工事に伴う測定業務報告書(その1), pp51, pp63, 1994.
- 8) 勝木和男・桑田誠: 平成元年度302号猪高改良その2工事報告書, マスコンクリートにおけるひびわれ誘発目地について, pp10, 1992.

(1995年 9月18日受付)