

ひび割れを考慮した トンネル覆工解析に関する研究

松岡 茂¹・益田 彰久¹・松尾 庄二¹・柳 博文¹

¹正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 技術研究所 (〒286 千葉県成田市新泉 9-1)

現在トンネル覆工の設計に広く用いられている骨組解析によりひび割れの発生・進展を考慮した覆工の解析を行うことを目的として、ひび割れが生じた無筋コンクリート部材のモデル化および解析フローを提案した。その結果、ひび割れが発生したと判断される節点をピン結合または回転ばねとすることにより、ひび割れを考慮した骨組解析を行うことができた。また、トンネル模型載荷実験結果およびコンクリートの破壊力学の考え方に基づいた有限要素法解析との比較を行うことにより、提案した解析方法の妥当性を確認した。

Key Words : tunnel lining, crack, frame analysis, fracture mechanics

1. はじめに

既設トンネル覆工には、ひび割れ等の損傷が生じているものがあり、このような覆工の安全性を検討するためには覆工の破壊プロセスを把握する必要がある。トンネル覆工の破壊プロセスについては、これまでにいくつかの実験研究が報告されている。今田ら¹⁾は、道路トンネル覆工を対象に覆工の耐荷力や破壊性状の実験を行っている。この実験報告によれば、トンネル覆工はその外周を周辺地山により弾性支承されたアーチ構造物と考えることができ、土圧等の外力により覆工部材の一部にひび割れが発生しても構造物は破壊に至らず、したがってトンネル覆工の最終的な破壊荷重を算定するためにはひび割れが生じた覆工の挙動を追跡する必要があると報告しており、ひび割れを評価した解析モデルの必要性を述べている。また朝倉ら²⁾は、トンネル覆工の模型載荷実験(新幹線複線断面 1/30 スケールモデル)から、ひび割れ部分をピンとしてモデル化した骨組解析で覆工の最終的な耐荷力を追跡できると報告している。しかしながらこのモデルではひび割れの進展が考慮されておらず、またひび割れ断面の最終的な破壊状態が不明であるため、そのままトンネル覆工の耐荷力算定に用いることは問題があると思われる。一方峯本ら³⁾は、コンクリートの破壊力学における大きな特徴の一つである引張軟化曲線を考慮した有限要素法解析を用いることにより、トンネル覆

工のひび割れ発生・進展を追跡することができること、軸方向圧縮力が無い場合にはひび割れの進展によりスナップバックと呼ばれる急激な破壊が生じることを報告している。しかしながらこのような破壊力学に基づく有限要素法解析はトンネル覆工のモデル化や収束判定等が非常に煩雑であり、トンネルの設計手法および破壊プロセスを追跡する手法とすることは困難であると思われる。

そこで、本研究では無筋コンクリートのトンネル覆工の破壊プロセスを追跡する解析モデルを構築する目的で、ひび割れの発生・進展を考慮した部材の断面力・変形挙動をモデル化し、このひび割れ断面モデルの妥当性を実験により検証した。さらに、ひび割れ断面モデルを現在一般的に設計で用いられている骨組解析に導入して、トンネル覆工の破壊プロセスを追跡した。

2. トンネル覆工の変形特性

破壊力学に基づく有限要素法解析によって、トンネル覆工の破壊プロセスを追跡することができることが峯本ら³⁾により報告されている。この報告に用いられているコンクリートの破壊力学における大きな特徴の一つは、応力が引張強度に達するとひび割れが生じ、その後はひび割れ開口幅が増加するのに伴って引張応力が低下するという引張軟化を考慮することである。このひび割れ開口幅と引張応力との関係である引張軟化曲線を使用した

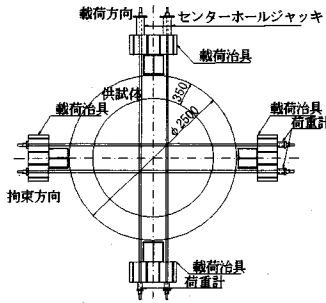


図-1 円環供試体載荷試験

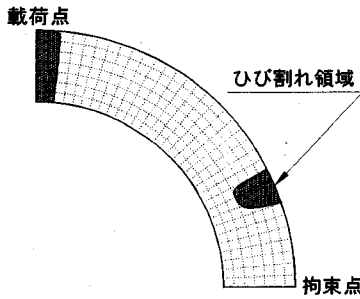


図-2 有限要素法解析によるひび割れ領域

有限要素法解析により、無筋コンクリートの曲げ強度に対する寸法依存性についても評価できることが報告されている^{4), 5)}。

さらに峯本らは、円環載荷実験を対象としてこの有限要素法解析によりひび割れ発生後の変形挙動を追跡している。円環載荷実験は図-1に示すように円環供試体の直径方向をPC鋼棒により拘束し、それに直交する直径方向から載荷を行ったものである。有限要素法解析では、対称条件を考慮して円環供試体の1/4の部分に対して計算を行っている。図-2に解析結果より得られた円環載荷実験最終状態の最大主ひずみ分布より判定したひび割れ領域を示すが、ひび割れ発生領域付近に大きなひずみが集中しており、その他の領域は比較的小さなひずみが分布していると峯本らは報告している。したがってひび割れ断面付近以外の部材はほぼ弾性状態を保持しているものと考えられる。また朝倉らの研究においても、ひび割れ断面をピンとしそれ以外の断面を弾性状態と仮定した骨組解析でトンネル模型載荷実験結果を追跡することができると報告されており、トンネル覆工のようなアーチ構造ではひび割れ断面の挙動が重要であると考えられる。

このようにひび割れ発生後のトンネル覆工の変形挙動はひび割れ断面の影響を受けると考えられる。よって、本研究ではひび割れ断面に注目して検討を行った。

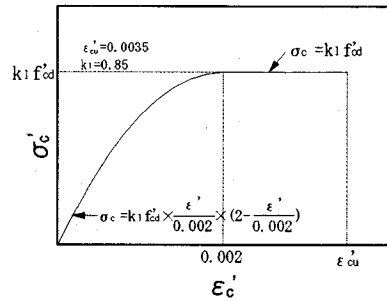


図-3 圧縮応力-ひずみ曲線

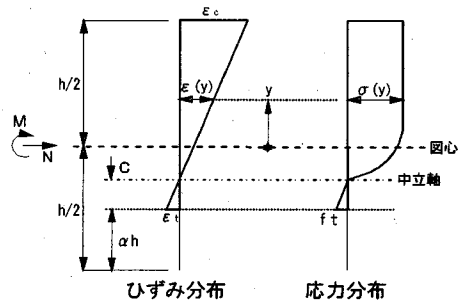


図-4 ひずみ・応力分布

3. ひび割れ断面のモデル

(1) ひび割れ断面における断面力のモデル化

ひび割れ断面における断面力を算定するために下記のような仮定を行った。

- ① ひび割れ断面以外の覆工は健全であることから、ひび割れ断面に作用する断面力は部材の図心に作用するものとする。
- ② ひび割れ間には、応力の伝達がないものとする。
- ③ ひび割れ以外の部分は、平面保持されているものとする。
- ④ コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は、図-3に示す「コンクリート標準示方書」の二次曲線タイプに準拠する。
- ⑤ コンクリートは、引張強度に達した時点でひび割れが発生するものとする。

以上の仮定に従うと、ひび割れ断面のひずみ・応力分布は図-4に示すようになる。ここで f_t : 引張強度, ϵ_t : 引張強度におけるひずみ量, ϵ_c : 圧縮縁におけるひずみ量, y : 図心からの距離, $\epsilon(y)$: 距離 y におけるひずみ量, $\sigma(y)$: 距離 y における応力, α : 部材高さに対するひび割れ深さの割合, C : 引張応力が作用している部材高さ, h : 部材高さである。ひずみ分布は、ひび割れ

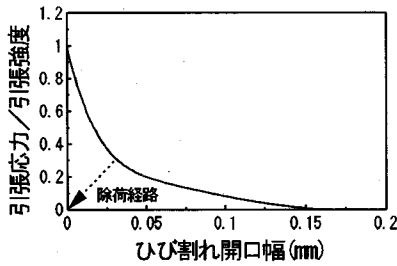


図-5 引張軟化曲線

先端から線型分布となり、よってひび割れ断面における断面力は式(1)に示すように表せられる。

$$N = \int \sigma(y) \cdot b \cdot dy \quad (1a)$$

$$M = \int \sigma(y) \cdot y \cdot b \cdot dy \quad (1b)$$

ここで、 N : 軸方向圧縮力、 M : 曲げモーメント、 b : 部材幅である。

ひび割れ断面におけるひずみ分布は、仮定③から式(2)のように表せられる。

$$\epsilon(y) = \frac{\epsilon_c}{h - \alpha h - C} \cdot \left[y - \left(-\frac{h}{2} + \alpha h + C \right) \right] \quad (2)$$

圧縮側の応力は、ひずみ分布および仮定④から式(3)のようになる。

$0 \leq \epsilon(y) \leq 0.002$ のとき

$$\sigma_c(y) = 2 \cdot k_1 \cdot f_{ca} \cdot \left\{ \frac{\epsilon_c}{0.002 \cdot (h - \alpha h - C)} \right\} \cdot \left[y - \left(-\frac{h}{2} + \alpha h + C \right) \right] - k_1 \cdot f_{ca} \cdot \left\{ \frac{\epsilon_c}{0.002 \cdot (h - \alpha h - C)} \right\}^2 \cdot \left[y - \left(-\frac{h}{2} + \alpha h + C \right) \right]^2 \quad (3a)$$

$0.002 < \epsilon(y) \leq 0.0035$ のとき

$$\sigma_c(y) = k_1 \cdot f_{ca} \quad (3b)$$

コンクリートの破壊力学では、ひび割れ先端には引張応力が伝達されるフラクチャープロセスゾーンが存在しておりこのフラクチャープロセスゾーンが曲げ引張強度の寸法効果に大きく影響するものと考えられている⁶⁾。

したがって、無筋コンクリート部材の断面力を正確に算定するためには、フラクチャープロセスゾーンで伝達する応力を考慮する必要があるものと考えられる。筆者らはフラクチャープロセスゾーンで伝達される応力を図-5に示す引張軟化曲線でモデル化し有限要素法解析により曲げ引張強度の寸法依存性を計算しており⁷⁾、その結果を図-6に示す。この図の横軸は部材高さを、縦軸は曲げ引張強度と引張強度との比を示している。この計算結果によればトンネル覆工の一般的な覆工厚(30cm以上)では曲げ引張強度と引張強度との差は10%程度であり、フラクチャープロセスゾーンの影響は小さいものと考えられる。そこで本研究では引張軟化曲線を考慮しな

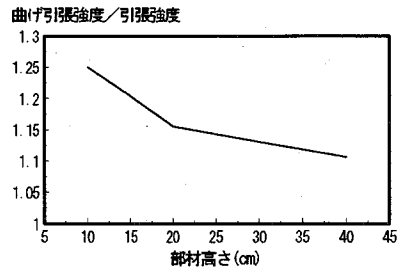


図-6 曲げ引張強度の寸法効果

いものとした。また、ひび割れが発生する前の弾性係数は、式(4)により表せられるものとした。

$$E_i = k_1 \cdot f_{ca} / 0.001 \quad (4)$$

よって式(1)は、式(2)、(3)から式(5)のように変換される。

$$N = \int_{-\frac{h}{2} + \alpha h + C}^{\frac{h}{2}} \sigma_c(y) \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot f_i \cdot C \cdot b \quad (5a)$$

$$M = \int_{-\frac{h}{2} + \alpha h + C}^{\frac{h}{2}} \sigma_c(y) \cdot y \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot f_i \cdot C \cdot \left(\alpha h - \frac{h}{2} + \frac{C}{3} \right) \cdot b \quad (5b)$$

(2) ひび割れ断面における変形挙動のモデル化

ひび割れが発生したコンクリート部材の変形挙動のモデル化については、Rivaら⁸⁾が鉄筋コンクリート部材を対象とした研究報告を行っており、そこで等価塑性ヒンジ長 (equivalent plastic hinge length) という概念を導入している。等価塑性ヒンジ長間で生じる部材のたわみ角はひび割れ開口により生じる部材の回転角と同じであると定義することにより、ひび割れが発生した鉄筋コンクリート部材の変形挙動をモデル化している。

本研究において無筋コンクリート部材におけるひび割れ断面の変形挙動をモデル化するのに際し、Rivaらの提案している等価塑性ヒンジ長と同様の概念を導入するものとした。すなわち等価塑性ヒンジ長におけるたわみ角は、図-7に示すようにひび割れ開口により発生するひび割れ面の回転角と等しくなると仮定した。なお、等価塑性ヒンジ長は中立軸における長さとし、等価塑性ヒンジ端では平面保持が成り立つものとする。図-7より、ひび割れ開口による回転角 λ は、式(6)のように表せられる。

$$\lambda = \frac{W}{\alpha \cdot h} \quad (6)$$

ここで、 W : ひび割れ開口幅、 α : 断面高さに対するひび割れ深さの割合、 h : 断面高さである。一方、等価塑性ヒンジ長間のたわみ角は両端の縁変形量から式(7)に示すようになる。

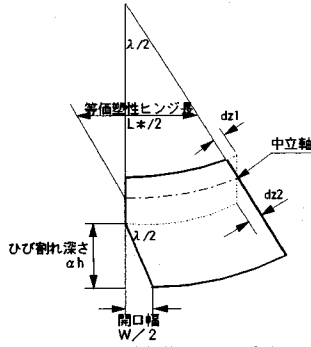


図-7 等価塑性ヒンジ長

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{dz_1 + dz_2}{(1-\alpha)h} \quad (7)$$

ここで、 dz_1 : 圧縮側の縁変形量、 dz_2 : 引張側の縁変形量である。縁変形量は等価塑性ヒンジ長から式(8)で表される。

$$dz_1 = \epsilon_c \cdot \frac{L^*}{2}, \quad dz_2 = \epsilon_t \cdot \frac{L^*}{2} \quad (8)$$

ここで、 L^* : 等価塑性ヒンジ長、 ϵ_c : 圧縮側の縁ひずみ量、 ϵ_t : 引張強度における引張ひずみ量である。次に式(8)を式(7)に代入し式(9)を得る。

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_t}{(1-\alpha)h} \cdot \frac{L^*}{2} \quad (9)$$

ここで、式(6)の回転角と式(9)のたわみ角は仮定により等価であるため、等価塑性ヒンジ長は式(10)のように表せられる。

$$L^* = \frac{1-\alpha}{\alpha(\epsilon_c + \epsilon_t)} W \quad (10)$$

一方、無筋コンクリート部材ではひび割れが深くなるとひび割れ断面の挙動は剛体変形に近づくものと推定される。そこで、等価塑性ヒンジ長は断面高さに対するひび割れ深さの割合 α の関数であると考え、式(11)で表すように仮定する。

$$L^* = (1-\alpha) \cdot h \quad (11)$$

以上のように、等価塑性ヒンジ長の概念を導入することによりひび割れ断面における圧縮側の縁ひずみとひび割れ開口幅は式(10)、(11)により式(12)のように表せられる。

$$W = \alpha \cdot (\epsilon_c + \epsilon_t) h \quad (12)$$

式(5)によりひび割れ断面における断面力は求めることができるため、よってひび割れ断面のひび割れ開口幅と断面力との関係を算定することができる。

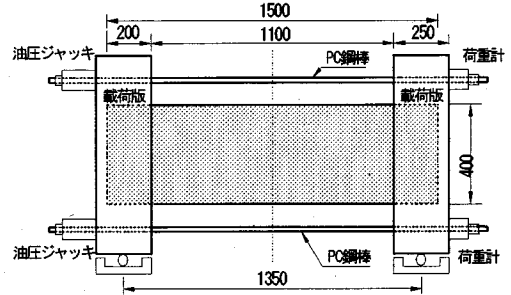


図-8 40cm角供試体曲げ試験

4. ひび割れ断面モデルの妥当性

ひび割れ断面モデルの妥当性を検証するために、40cm×40cm×150cmの直方体供試体を用いて曲げ実験を行った。実験は、図-8に示すように供試体両端に鋼製の載荷版を取り付け、この載荷版の上下各々に2台ずつ設置した油圧ジャッキにより供試体に軸力と曲げを載荷した。載荷方法は、まずすべての油圧ジャッキで均等の荷重を与えることにより、供試体に所定の軸圧縮力(980kN)を導入し、その後上下の油圧ジャッキに荷重差を与えることにより、供試体に曲げモーメントを載荷した。なお、曲げモーメント載荷時においても上下ジャッキの荷重和を一定にすることにより初期に供試体へ導入された軸圧縮力を一定に保持した。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用した呼び強度 30N/mm²、スランプ 12cm、粗骨材最大寸法 25mm のレディミクストコンクリートである。

ひび割れ発生後の変形挙動(ひび割れ幅)を前章に述べた関係式により算出し、実験結果と比較した。供試体に作用する断面力(軸圧縮力・曲げモーメント)は載荷条件により既知であるため、式(5)によりひび割れ断面の圧縮側の縁ひずみとひび割れ深さの割合が求められる。図-4に示すように、ひび割れ断面におけるひずみ分布はひび割れ先端からの距離に比例していることから、縁ひずみとひび割れ深さから引張応力が作用している領域 C が決定される。さらにひび割れ断面の変形挙動の関係から式(12)によりひび割れ幅を得ることができる。なお、コンクリート圧縮強度は曲げ試験供試体と同一条件で養生した圧縮強度試験供試体を試験することにより求め、引張強度については圧縮強度試験結果から式(13)に示す Koenig ら⁹⁾ が提案した式により求めた。

$$f_t = 2.12 \times \ln\left(1 + \frac{f_c}{10}\right) \quad (13)$$

図-9に実験結果と計算結果により得られた曲げモーメントとひび割れ開口幅との関係を示す。実験では供試体の下部に切り込みを入れることによりひび割れ発生位

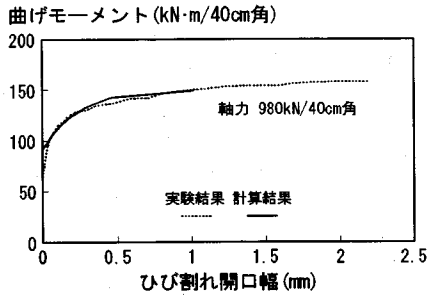


図-9 開口変位-曲げモーメント線図

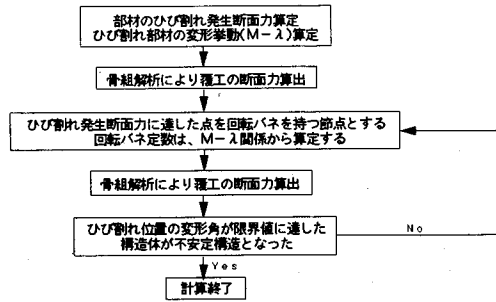


図-10 トンネル解析フロー

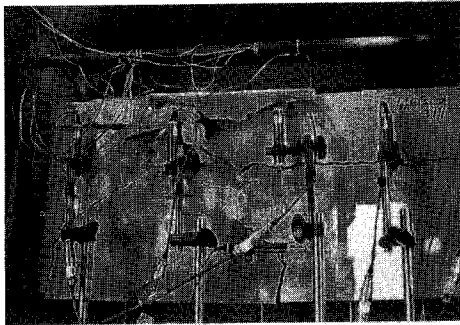


写真-1 曲げ試験最終状況

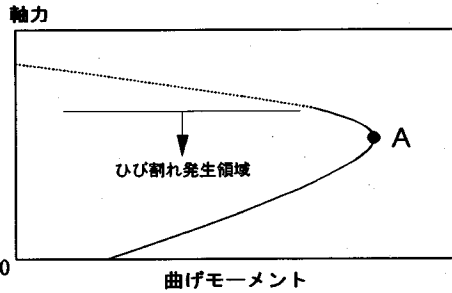


図-11 ひび割れ発生断面力

置を限定し、その位置にΩ型変位計を取り付けることによりひび割れ開口幅を計測している。曲げモーメント-ひび割れ開口幅曲線は、ひび割れが発生すると開口変位の増加率が徐々に大きくなり曲げモーメントが 150kN・m 付近を過ぎるころから開口変位のみが急増している。そして最終的には写真-1に示すようにひび割れ断面の圧縮側で破壊が発生した。

一方、計算により実験とほぼ一致した傾向の結果を得られている。計算の打ち切りは圧縮ひずみが限界ひずみ (3500 μ) に達したために判断したものであり、そのため最終変位量に差がみられるが、部材耐力は実験結果と同様に圧縮破壊により決定されている。

以上のように、提案したひび割れ断面モデルにより、ひび割れ発生部材の挙動をほぼ近似することができる。またひび割れ部材では、ひび割れ断面に作用している圧縮応力により部材耐力が決定される場合があることが実験で確認された。

5. トンネル覆工への適用

(1) 骨組解析方法

ひび割れ断面モデルを用いて、図-10に示す解析フローに従って骨組解析によりひび割れを考慮したトンネル覆工の挙動を追跡した。トンネル覆工の計算では、解析

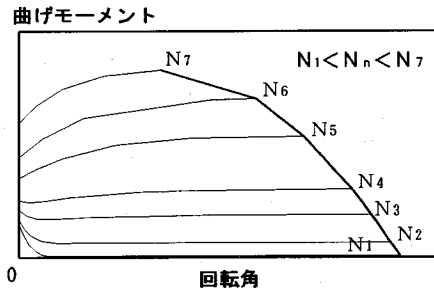


図-12 ひび割れ発生後の変形

フローに示すように覆工部材のひび割れ発生断面力とひび割れ発生後の変形挙動を求める必要がある。

ひび割れ発生断面力は、引張側の縁応力が引張強度に達した時の断面力とする。図-11にひび割れ発生断面力の概念図を示す。図に示すひび割れ発生断面力の破線部分は、引張側の縁応力が引張強度に達する前に圧縮側の縁ひずみが限界ひずみに達する領域であり、すなわちひび割れが発生する前に部材が圧縮応力により破壊する領域である。したがって、本研究で対象となる領域は、図中の実線で示した領域である。ひび割れ深さは軸力が増加するのに伴って減少し、軸力が図中のA点以上となるとひび割れ深さは断面高さ h の 1/2 以下になる。ひび割

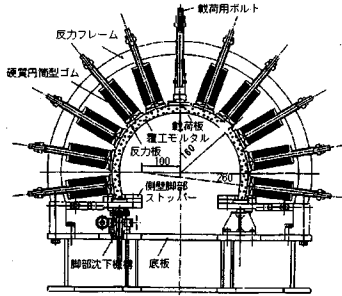


図-13 トンネル覆工模型載荷試験

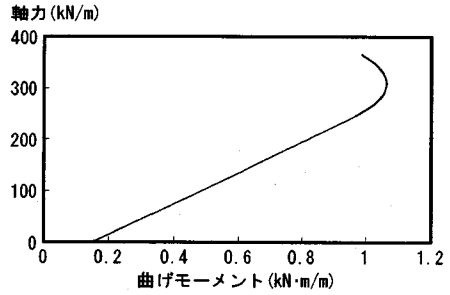


図-15 ひび割れ発生断面力 (2cm厚)

表-1 試験および解析条件

単位体積重量 (g/cm ³)	1.89
一軸圧縮強度 (MPa)	26.1
圧裂引張強度 (MPa)	2.26
静弾性係数 (MPa)	14100
ポアソン比	0.21
地盤ばね定数 (kN/m)	108

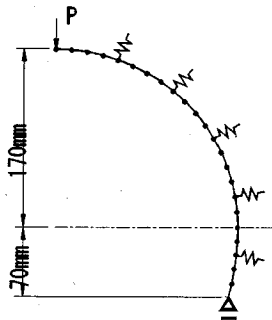


図-14 解析モデル

れ断面の曲げモーメントは、式(5)に示すように応力に図心までの距離を乗じた偏心モーメントであるため、ひび割れ深さが断面高さの1/2以下となると曲げモーメントは減少する。

ひび割れ発生後の変形挙動については、式(5)、(12)を用いて次のような手順で求めた。最初に軸力 N を定め、次にひび割れ深さ ah を仮定すると式(5a)により圧縮側の縁ひずみが決定され、よって式(5b)よりひび割れ断面における曲げモーメントが求まる。また圧縮側縁ひずみから式(12)によりひび割れ開口幅 W が、さらにひび割れ開口幅 W から式(7)によりひび割れ開口による回転角 θ が計算される。順次ひび割れ深さの割合 α を増加させることにより、軸力 N におけるひび割れ進展に伴うひび割れ断面の変形挙動を算出することができる。そして最終的に圧縮側縁ひずみが限界ひずみ量 (3500 μ)

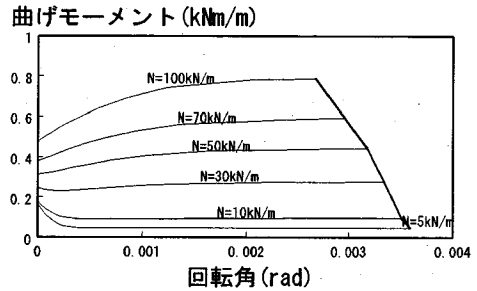


図-16 曲げモーメント-回転角関係 (2cm厚)

に達した時点または式(5)が収束しなくなった時点で計算を打ち切ることとした。図-12にひび割れ発生後の曲げモーメントと回転角の関係の概念図を示す。回転角は式(6)によりひび割れ開口幅から算出されるが、骨組解析に導入するということからひび割れ開口幅は節点で生じるものとして計算している。この図によると、ひび割れ発生後の部材は軸力の大きさにより変形特性が異なっている。軸力が小さい場合 (図中 $N_1 \sim N_3$) では、ひび割れ発生直後に曲げモーメントが急激な軟化を示し、その後は曲げモーメントはほぼ一定で回転角のみが増加している。つまり、部材の断面耐力はひび割れの初期すなわち引張応力で決定されていることになる。一方、軸力が大きい場合 (図中 $N_4 \sim N_7$) ではひび割れが発生した後も曲げモーメントは増加しており、圧縮側の縁ひずみが限界ひずみ量 (3500 μ) に到達した時点で計算を打ち切るために、その点が最大曲げモーメントとなっている。よって部材の断面耐力は圧縮応力で決定されていることになる。図中の太線はこのような圧縮側縁ひずみが限界量 (3500 μ) に到達した状態を結ぶ線であり、この太線を越えるような変形は本研究の仮定条件下では成り立たず、この時点で解析を打ち切ることとした。

(2) トンネル覆工模型実験の解析

前節のトンネル覆工破壊フローに基づき朝倉らのトン

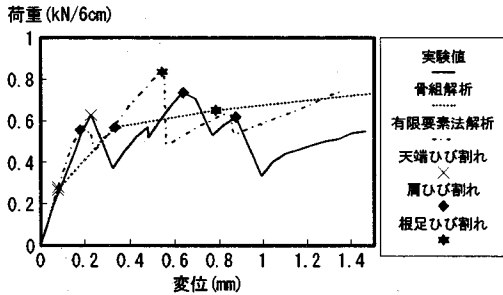


図-17 荷重-変位線図 (2cm厚)

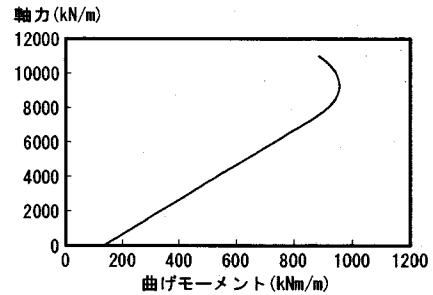


図-18 ひび割れ発生断面力 (60cm厚)

ネル覆工載荷実験²⁾を解析した。載荷実験に用いられた供試体は新幹線標準トンネル断面を想定した縮尺 1/30 (部材厚さ 2cm) のモルタル造の模型で、図-13に実験の概要図を示す。供試体は円筒ゴムを介して反力フレームにより支持されており、実際のトンネル覆工が周辺地盤により弾性支承されている状態の再現に努めている。荷重は載荷版を介してトンネル模型に変位制御で載荷されるが、解析では集中荷重として計算を行った。モルタルの物性値、円筒ゴムのバネ定数を表-1に示す。

骨組解析の解析モデルを図-14に示す。また解析で使用する諸定数はトンネル模型実験にあわせるため表-1の値を使用した。これらの値により求めたひび割れ発生断面力の計算結果を図-15に、ひび割れ断面における曲げモーメントと回転角との関係の計算結果を図-16に示す。

これらの条件により骨組解析を行うと一次ひび割れが発生する際に覆工に作用する軸力は 5kN/m 程度となり、その後解析を進めても大きな軸力の増加はない。図-16からわかるように、この程度の軸力においてはひび割れ断面ではひび割れ発生直後の曲げモーメントの軟化領域を除いては曲げモーメントは大きな変化をせず回転角のみが増加している。そこでこの条件下における骨組解析では、ひび割れ初期に見られる曲げモーメントの軟化を無視しひび割れ発生時の断面力が保持されると仮定した上で、ひび割れの発生した断面をピン結合の節点として表現することとした。

解析結果を載荷重と載荷点である天端部分の沈下量との関係で表したものを図-17に示す。また実験結果と破壊力学に基づく有限要素法による解析結果もあわせて図示した。朝倉らによるとこの有限要素法解析により実験におけるひび割れの発生・進展および荷重-変位関係などを表現できることが報告されている¹⁰⁾。

図によるとひび割れ発生荷重が解析値と実験値との間で差があることが認められる。これは解析では引張縁応力が引張強度に達した時点をおひび割れ発生としているのに対し、実験ではひび割れの発生を目視により確認して

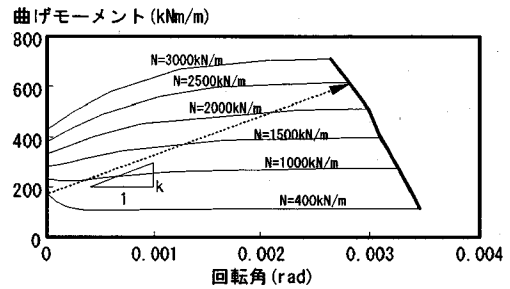


図-19 曲げモーメント-回転角関係 (60cm厚)

いるため、実際にひび割れが観測された時には微視的なひび割れはすでにかなり進行してしまっていることに起因すると考えられる。

荷重と変位の関係については、骨組解析結果と有限要素法解析結果では初期の段階で比較的近い値を示しているものの、骨組解析ではひび割れ発生後の荷重低下が見られない。これは前述のように骨組解析のひび割れモデルではひび割れ発生直後の断面力の軟化を考慮していないからである。また、トンネル模型のように部材寸法が小さい場合には寸法効果の影響は大きくなるが、本研究では骨組解析に使用するひび割れ断面のモデルには引張軟化曲線が考慮されていないため、骨組解析では初期ひび割れ発生荷重が有限要素法解析に比べ若干小さくなっている。破壊力学に基づく有限要素法解析では寸法効果およびひび割れ進展に伴う変形挙動を考慮することができるため、実験結果を精度良く追跡していると考えられる。しかし骨組解析においても有限要素法解析と同様なひび割れ発生順序および位置が得られており、最終的にスプリングライン付近にひび割れが発生した時点で構造体が不安定となり計算を打ち切っている。このように巨視的に見れば荷重と変位の関係の傾向は骨組解析によっても表現されていると考えられる。

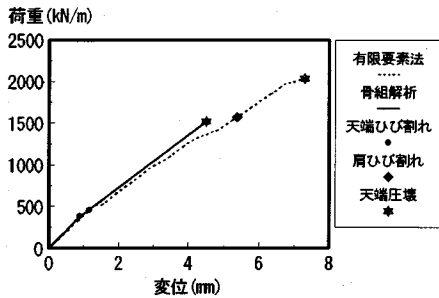


図-20 荷重-変位線図 (60cm)

(3) 実物大トンネル覆工の解析

前節と同様の手順により、トンネル模型実験が想定した新幹線断面のトンネル覆工（覆工厚 60cm）を対象として解析を行った。解析モデル・条件はトンネル模型実験と同じとし、縮尺分を補正して使用した。前節の解析においては覆工に作用する軸力が小さく、解析結果として覆工に圧縮破壊が発生することはなかった。そこで今解析では圧縮破壊が生じる状態を得るために覆工に作用する軸力が大きくなるよう、地盤ばね係数の値を模型実験の場合より 10 倍割増すこととした。

ひび割れ発生断面力を図-18 に、ひび割れ断面における曲げモーメントと回転角の関係図を図-19 に示す。この解析条件では一次ひび割れの発生した時点でのひび割れ断面における軸力は約 400kN/m であり、ひび割れが発生した後も載荷の進行によりひび割れ断面の軸力はさらに増加をする。そこで限界値に達するまでの軸力増加量を仮定して節点に与える回転ばね定数を定め、解析結果による軸力増加量と仮定した軸力増加量が一致するまで繰り返し計算を行った。その結果、軸力は約 2500kN/m まで増加するという結果を得、よって図-19 の破線に示すような回転ばね係数 k を定めた。また、解析結果の比較対象として実物大試験結果がないことから、朝倉らが解析に用いた破壊力学に基づく有限要素法解析を行った。

図-20 に載荷重と載荷点である天端部の変位量の関係を示す。有限要素法解析では、天端部にひび割れが発生した（図-20 中●点）後、アーチ肩部に新たなひび割れが生じ（同◆点）、さらに荷重を載荷すると天端のコンクリートが圧縮限界ひずみに達した（同★点）。一方、骨組解析では天端部にひび割れが発生した後、新たなひび割れは発生せず天端の節点の回転角が限界回転角に達したため計算を打ち切った。なお、天端の節点が到達した限界回転角は、コンクリートの縁ひずみが圧縮限界ひずみ（ 3500μ ）に達した状態のものであり、有限要素法解析と同様に天端のひび割れ断面で圧縮破壊が生じたものと考えられる。荷重と変位の関係については、有限要

素法解析と骨組解析で計算の打ち切り時点の最終変位が異なるが、骨組解析の最終変位に至るまでの挙動はほぼ一致している。

これらのことから、提案した骨組解析フローによりひび割れを考慮したトンネル覆工の挙動を追跡することができるものと判断された。

6. まとめ

本研究では、トンネル覆工の設計に多く用いられている骨組解析により、ひび割れの発生・進展を考慮した覆工の解析を行うことを目的として、ひび割れが生じた無筋コンクリート部材のモデル化を行った。このモデルの妥当性を確認するため軸力を作用させた部材の曲げ試験を行い、その挙動を表現できることを確認した。さらにトンネル覆工を解析するフローを提案し、トンネル覆工模型載荷実験および破壊力学に基づく有限要素法解析と比較することにより、解析フローの妥当性を検証した。本研究の成果をまとめると次のようになる。

- ①軸力と曲げモーメントが作用する無筋コンクリート部材の最大断面力は、ひび割れ進展により圧縮側の応力が増加するため、コンクリートの圧縮特性により決定される場合がある。
- ②ひび割れ断面において、等価塑性ヒンジ長間のたわみ角とひび割れ開口によるひび割れ面の回転角が等価であると仮定することにより、ひび割れ断面における断面力と回転角の関係が定まる。
- ③骨組解析において、ひび割れが発生したと判断される節点をピンまたは回転ばねとすることにより、ひび割れを考慮したトンネル覆工の計算をすることができる。

謝辞：本研究を行うにあたり実験データを提供していただいた鉄道総合技術研究所の朝倉俊弘氏および関係各氏に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今田 徹, 石橋 正穂, 平江 哲: トンネルコンクリート覆工の強度に関する実験報告(1), 建設省土木研究所資料, No. 921, 1974.
- 2) 朝倉 俊弘, 小島 芳之, 安東 豊弘, 佐藤 豊, 松浦 章夫: トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 493/III-27, pp. 79~88, 1994. 6.
- 3) 峯本 守, 鬼頭 誠, 梶原 雄三, 松岡 茂: トンネル覆工の限界状態設計に関する研究, 土木学会論文集, No. 523/III-32, pp. 141-149, 1995. 9.
- 4) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: コンクリートの曲げ寸法に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No. 442/V-16,

- pp. 101-107, 1992. 2.
- 5) Liang, R. Y. and Li, Y. N. : Study of Size Effect in Concrete Using Fictitious Crack Model, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.117, No.7, pp.1631-1651, 1991.
- 6) 堀井 秀之: フラクチャープロセスゾーン問題とコンクリート・岩石・セラミックスに対する破壊力学の体系化, 構造工学論文集, Vol. 35A, 1989.
- 7) 松岡 茂, 益田 彰久, 峯本 守, 梶原 雄三: トンネル覆工の破壊プロセスに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 1317-1322, 1995. 6.
- 8) Riva, P. and Cohn, M. Z. : Rotation capacity of structural concrete members, *Magazine of Concrete Research*, 46, No.168, pp.223-234, 1994.
- 9) Koenig, G., Grimm, R. and Rimmel, G. : Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, *JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, pp.63-74, 1993.
- 10) 朝倉 俊弘, 小島 芳之, 中田 雅博, 若菜 和之, 松岡 茂: トンネル覆工の力学挙動評価への有限要素法解析の適用性に関する研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol. 5, pp25-30, 1995. 11.
- (1995. 12. 7 受付)

A STUDY ON SIMULATION OF TUNNEL LINING WHICH INVOLVES CRACK

Sigeru MATSUOKA ,Akihisa MASUDA ,Shoji MATSUO and Hirobumi YANAGI

The frame analysis is extensively used in designing of tunnel lining. In order to enable frame analysis of lining which involves cracking and its development, this paper proposes modeling and analytical procedures of plain concrete members. The proposed model and analytical scheme allowed us to conduct frame analysis capable of including cracking behavior, by assuming pin connection or rotating spring at nodes where a crack occurs. In addition, the effectiveness of proposed technique was verified by comparison with results of experiments using tunnel models and those of finite-element analysis based on the failure mechanics of concrete.