

論文 トンネル覆工の破壊プロセスに関する研究

松岡 茂^{*1}・益田 彰久^{*2}・峯本 守^{*3}・梶原 雄三^{*4}

要旨：無筋コンクリートのトンネル覆工を対象に、ひび割れの進展に伴う破壊挙動を追跡できるモデルを構築することを目的として、ひび割れ面間における引張応力の軟化を考慮するという破壊力学の考え方に基づいた非線形有限要素法解析を行った。さらに解析の妥当性を確認するため無筋コンクリート円環供試体による載荷実験を行い比較を行ったが、良好な結果を得た。

キーワード：破壊力学、引張軟化曲線、非線形有限要素法解析

1. はじめに

我が国では、昭和61年度に土木学会「コンクリート標準示方書」が許容応力度設計法から限界状態設計法に改訂されており、世界的にも限界状態設計法に移行する傾向がある。トンネル覆工に限界状態設計法を適用するためには、覆工の破壊性状を把握する必要がある。

今田ら[1]は、トンネル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の一部にひび割れが生じても構造物は破壊に至らない。したがって、トンネル覆工の最終的な耐荷力および断面力を算定するためには、ひび割れが発生した後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。

そこで、本研究では無筋コンクリートのトンネル覆工を対象に、ひび割れ進展に伴う構造物の巨視的な挙動を解析するモデルを構築する目的で、円環供試体による載荷実験と破壊力学の考え方に基づいた非線形有限要素法によるシミュレーションを行った。

2. 解析方法

2.1 ひび割れのモデル化

近年、ひび割れ面における引張応力の軟化を考慮した有限要素法により、無筋コンクリートにおける曲げ強度の寸法依存性を評価すること、ひび割れ発生後の挙動を追跡することができることなどが報告されている[2][3]。そこで本研究は仮想ひび割れモデルを用いることによって引張軟化を考慮した非線形有限要素法により解析を行った。

解析では、最大主応力（引張側が正）がコンクリートの引張強度に達した時に最小主応力方向にひび割れが発生するものとした。ひび割れが発生した要素では、最大主応力方向の応力 σ —ひずみ ϵ 関係はひび割れ以外の弾性挙動と引張軟化曲線から式(1)により与えられ、最小主応力方向はひび割れ発生前の応力 σ —ひずみ ϵ 関係に従う直交異方体要素とした。

*1 鉄建建設（株）エンジニアリング本部技術研究所主任研究員（正会員）

*2 鉄建建設（株）エンジニアリング本部技術研究所（正会員）

*3 日本鉄道建設公団理事（正会員）

*4 日本鉄道建設公団設計技術室（正会員）

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E} + \frac{\omega(\sigma)}{L} \quad (1)$$

ここに、 σ_t は引張応力、 E は弾性係数、 $\omega(\sigma)$ はひび割れ開口幅、 L は要素の等価長さ、 ε は最大主応力方向のひずみである。要素の等価長さは、Dahlblom[4]らと同様に最大主応力方向に要素を投影した長さとした。なお、ひび割れが完全に閉口するまでひび割れ面におけるせん断力の伝達は無いものとする。解析に使用した要素は、平面応力条件下の4節点の四辺形アイソパラメトリック要素である。

無筋コンクリートでは、最大荷重に到達した後に変位と荷重が共に減少するスナップバックと呼ばれる現象が生じる場合があることが報告されている[5]。非線形解析の一般的な求解法である変位増分法では、スナップバックを追跡することが出来ないため、今回の解析では弧長法を用いて計算を行った。

2. 2引張軟化曲線と応力-ひずみ曲線

無筋コンクリートの引張軟化曲線については、Hordijk[6]が既往の直接引張試験結果から提案した式(2)に示す曲線を使用した。

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left\{ 1 + \left[C_1 \frac{\omega}{\omega_c} \right]^3 \right\} \exp \left[-C_2 \frac{\omega}{\omega_c} \right] - \frac{\omega}{\omega_c} \left[1 + C_1^3 \right] \exp(-C_2) \quad (2)$$

ここに $C_1=3$ 、 $C_2=6.93$ 、 ω はひび割れ開口幅、 ω_c は限界開口幅(=160 μ m)、 f_t は引張強度である。ひび割れが発生した後、開口幅が減少する方向に変形が生じる場合には、図1に示すように原点に指向する除荷経路に従うものとした。

一方、圧縮側の応力-ひずみ関係については、式(3)に示す二次曲線タイプの応力-ひずみ曲線を使用し、降伏曲面はDrucker-Pragerタイプを用いた。応力-ひずみ曲線を単軸試験結果として考え、降伏曲面の定数を決定した。

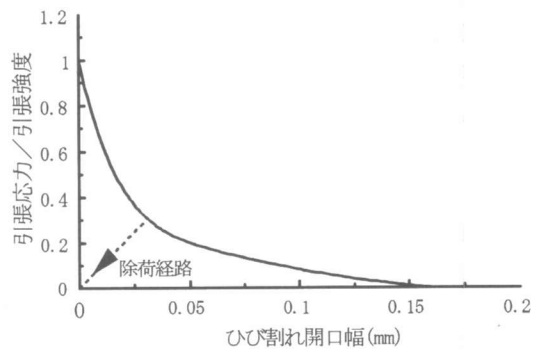


図-1 引張軟化曲線

$$\sigma = f_{cd} \frac{\varepsilon}{0.002} \left[2 - \frac{\varepsilon}{0.002} \right] \quad (3)$$

ただし、 $0 \leq \varepsilon \leq 0.002$, f_{cd} : 圧縮強度

$$\sigma = f_{cd}$$

ただし、 $0.002 < \varepsilon \leq 0.0035$, f_{cd} : 圧縮強度

無筋コンクリートは等方硬化則に従うものとして解析を行い、最小主ひずみ(引張側が正)が3500 μ に到達した時点で最大主ひずみの値に関係なく圧縮限界に達したものとして計算を打ち切

った。また、ひび割れが発生するまでの引張側の応力-ひずみ曲線には、式(4)の弾性係数を用いた。

$$E_t = f_{cd} / 0.001 \quad (4)$$

E_t : 引張側の弾性係数

2. 3 解析モデルの妥当性

前記の解析モデルの精度を検証する目的で、土木学会標準「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」で規定されている4点曲げ試験を解析した結果から求めた曲げ強度と部材高さとの関係を図2に示す。図2には、過去に行われた実験結果[7][8]も合わせて記入した。

なお、実験ではコンクリート強度が一定でないため、曲げ強度については部材高さ10cmの曲げ強度で無次元化した。解析結果は部材高さが大きくなるのに従って、曲げ強度は低下しており、その低下の割合及び曲げ強度は実験結果とほぼ一致している。このことから、解析に用いた軟化曲線等のひび割れモデルにより無筋コンクリート部材の最大曲げ荷重を求めることが妥当であると考えられる。

解析結果における荷重と載荷点変位との関係を図3に示す。最大荷重以降で、荷重と変位が共に減少するスナップバックの現象が見られている。曲げ試験におけるスナップバック現象は、内田らによる実験において観測されており、無筋コンクリートの破壊性状における特徴的な現象であるが、本研究で用いたモデルと解析手法により、スナップバックの挙動を追跡することが出来る。したがって、今回用いた有限要素法の解析モデルは、無筋コンクリートの破壊性状を表現する事が出来ると考えられる。

3. 円環載荷実験

3. 1 供試体および載荷方法

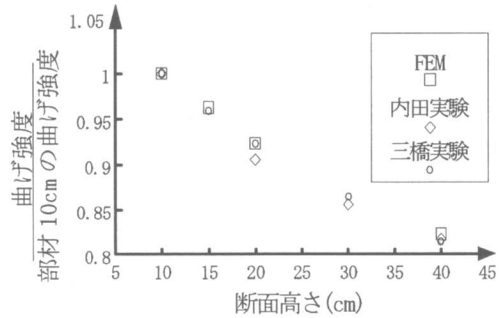


図-2 曲げ強度と断面高さ

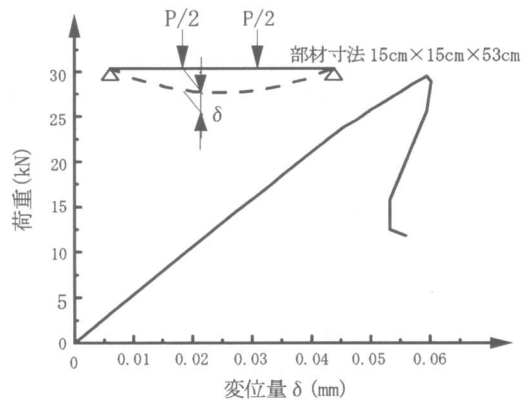


図-3 荷重-変位曲線

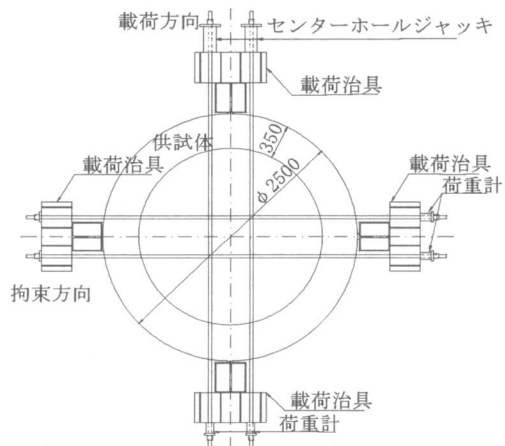


図-4 円環載荷実験

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kgf/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	18±2	4±1	50.3	60.0	196	390	998	666

円環載荷実験に用いた供試体の寸法は、図4に示すように外径2500mm、部材厚350mm、高さ1000mmとした。供試体は、コンクリート打設した後、試験前日まで散水養生を行った。表1に使用したコンクリート配合を示す。コンクリートの強度は、円環供試体と同じ条件で養生したテストピースによると圧縮強度19.4MPaであった。

実験は、図4に示すように直径方向をPC鋼棒で拘束した後、拘束した方向に直交した直径方向から変位制御により載荷を行った。載荷手順は、最初に拘束しているPC鋼棒に軸力49kNを導入した後、変位制御の油圧ジャッキ（載速荷重0.1mm/sec）により490kNまで載荷を行った。

3. 2 実験結果概要

載荷方向における直径の変化量と載荷荷重との関係を図5に示す。直径変化量と荷重との関係は、載荷点の内側にひび割れ発生が目視により確認される（245kN載荷した時点）までは、ほぼ線形関係を保っている。載荷点付近にひび割れが確認されると荷重は一時的に低下するが、さらに実験を継続すると荷重は増加に転じ、荷重が274kN付近で載荷点と拘束点との間の拘束点寄りの位置に新たなひび割れが目視により確認された。新たなひび割れが生じると荷重は再度低下するが、載荷を継続すると再び荷重は増加に転じる。その後は、ひび割れの発生は確認されず、荷重の増加に伴って直径の変化量は増加している。

供試体のひび割れ発生状況を図6に示す。荷重が245kNに到達した時点で載荷点の内

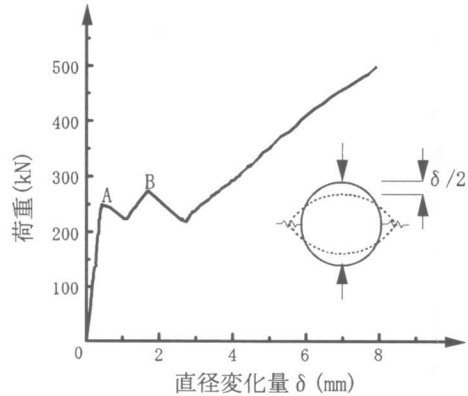


図-5 荷重-直径変位量

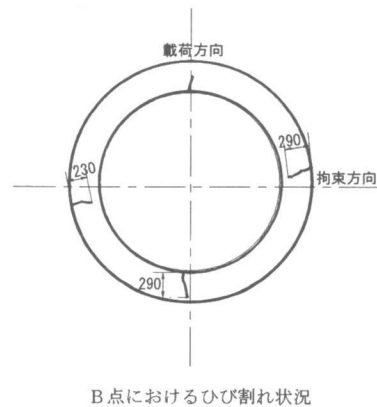
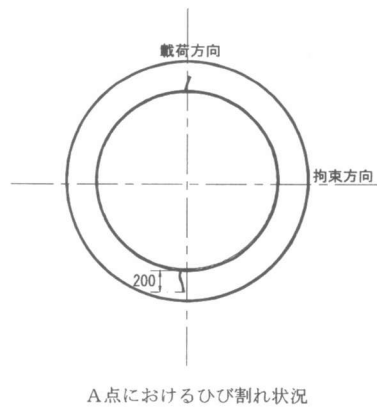


図-6 ひび割れ発生状況

側より第一ひび割れが2カ所生じていることが確認された。荷重が274kN付近に達した時点で、載荷点と拘束点との間の拘束点寄りの位置に第二のひび割れが供試体直径に対して対称に2カ所発生していることが確認された。その後は、新しいひび割れの発生は確認されず、第一・二ひび割れの開口幅とひび割れ深さが拡大したのみであった。なお、490kN載荷した状態では、ひび割れ開口幅は約3mmであった。

3. 3 円環載荷実験の解析

有限要素法により、円環載荷実験の挙動を解析した。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た。コンクリートの圧縮強度についてはテストピースによる圧縮試験結果値 ($f_{cd}=19.4\text{MPa}$) とした。引張強度についてはKoenigら [9] が提案している式 (5) により圧縮強度から求めた。

$$\begin{aligned}
 f_{ct} &= 2.12 \times \ln(1 + f_{cd}/10) & (5) \\
 &= 2.12 \times \ln(1 + 19.4/10) \\
 &= 2.28\text{MPa} \\
 f_{ct} &: \text{引張強度} \\
 f_{cd} &: \text{圧縮強度}
 \end{aligned}$$

応力-ひずみ関係、引張軟化曲線等の解析モデルは、4点曲げ試験解析と同様とした。解析結果の荷重と載荷方向の直径変化量との関係を図7に示す。実験結果と同様に変化量が1mm付近 (図中のA点) と2mm付近 (図中のB点) で荷重が一時的に低下しており、荷重と直径変化量との関係は実験結果の傾向とほぼ一致している。ひび割れは、図中に示すように荷重が最初に低下するA点より小さい荷重で発生している。

解析結果より得られたひび割れ発生要素の分布を図8に示す。(a) は最初に荷重が低下した直後 (図7のA点) における分布状況を、(b) は荷重が再び増加している状態 (図7のB点直前) の分布状況を示している。また、(c) は荷重が490kNに達した時点の分布状況を示している。このひび割れの発生状況は、図6に示す実験における現象とほぼ一致している。図8 (a) では、ひび割れは載荷点に発生しており、この時のひび割れ開口幅は0.02mm以上になっている。荷重が増加している状態の(b) では、

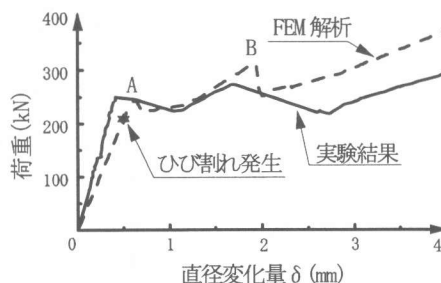
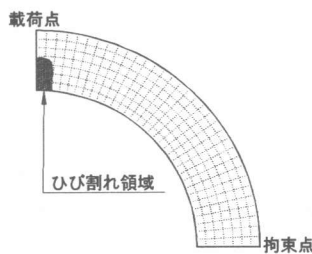
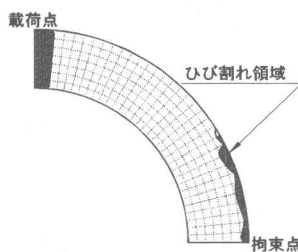


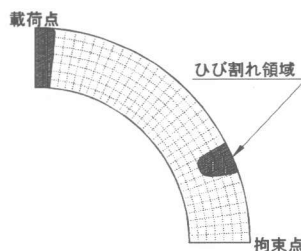
図-7 実験結果と解析結果



(a) A点における分布図



(b) B点における分布図



(c) 最終状態

図-8 ひび割れ発生要素分布

載荷点の他に供試体外面に広い範囲で微細なひび割れが生じている。この供試体外面のひび割れ開口幅は、解析結果によると0.01mm以下のものである。(c)では、ひび割れは載荷点と拘束点付近の2カ所のみとなっており、(b)の状態で見られた供試体外周の広いひび割れ領域は無くなっている。これは、ひび割れが進展することにより、ひび割れ周辺領域の要素では除荷経路となりひび割れの局所化が生じるためである。実験結果の最終的なひび割れの発生位置と解析結果とは、ほぼ一致しており、引張軟化曲線を考慮した解析によりトンネル覆工の最終的な耐荷力および変形挙動を追跡することが出来るものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、無筋コンクリートのトンネル覆工を対象にひび割れ進展に伴う構造物の破壊挙動を表現することを目的として、円環供試体の載荷実験とその解析を行った。解析においては、破壊力学の考え方に基づいた解析手法を構築し、その妥当性を検証した。その結果、ひび割れ面における引張応力と開口幅との関係である引張軟化曲線を考慮した非線形有限要素法解析により、無筋コンクリートのひび割れ発生後の挙動を追跡できることが確認された。

謝辞：本研究を遂行するにあたって堀井秀之東京大学助教授から終始有益なご指導を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

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) 内田裕市・六郷恵哲・小柳 洽：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、Vol.442/V-16、pp.101-107、1992.2
- 3) 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
- 4) Dahlblom, O. and Ottosen, N. S.: Smearred Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.116, No.1, pp.55-76, 1990
- 5) 栗原哲彦・安藤貴宏・内田裕市・六郷恵哲：曲げを受けるコンクリートはりの複数ひび割れ、コンクリート工学論文集、Vol.16、No.2、pp.27-32、1994
- 6) Hordijk, P. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 1991
- 7) 内田裕市・六郷恵哲・小柳 洽：無筋コンクリートの曲げ破壊の実験結果、破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.346-347、1993
- 8) 三橋博三・野村希晶：無筋コンクリートの曲げ破壊の実験結果、破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.377-381、1993
- 9) Koenig, G., et al.: Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, pp.63-74, 1993