

離散ひび割れモデルを用いたトンネル覆工の複数ひび割れ解析

NUMERICAL ANALYSIS OF MULTIPLE CRACKS IN TUNNEL LINING USING THE DISCRETE MODELING APPROACH

鈴木正樹*・師 自海**・大津政康***・日比野悦久****
Masaki SUZUKI, Zihai SHI, Masayasu OHTSU and Yoshihisa HIBINO

The discrete crack approach, which has been extensively used for analyzing single cracks, is extended for numerical analysis of multiple cracks, based on the fictitious crack model and the crack-tip-controlled numerical algorithm. Assuming each crack as an effective crack while restraining the growth of others in turn, an explicit formulation of the mode I-Type crack propagation for multiple cracks is presented, and a minimum load criterion for crack extension is proposed for its numerical implementation. The accuracy and effectiveness of this numerical method in analyzing multiple-crack problems are demonstrated through an experimental verification with fracture tests on real-size tunnel specimens.

Key Words: multiple cracks, discrete modeling, fictitious crack, minimum load criterion, tunnel lining

1. はじめに

外力あるいは経年などの要因でひび割れ損傷を受けたコンクリート構造物では、その構造健全性を示す有効な指標として、ひび割れ開口幅がよく使われる。在来工法で施工された導水路トンネルの変状現象を例にとれば、図-1 に示すとおり、覆工アーチの背面空洞に起因してアーチから側壁スプリングラインにかけて開口幅 2~5mm 程度と比較的大きな複数ひび割れの発生現象がある。このとき、覆工表面に生じている複数ひび割れの開口幅は、その構造安全性を評価する上で重要な指標となる。

一方、コンクリート構造物のひび割れ解析モデルにおいては、コンクリートの破壊力学に基づく分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルがある。前者においては、ひび割れを連続体モデルの中で表現しており、RC 部材に見られる分散した複数ひび割れの挙動を再現するのによく使われている。一方、後者においては、ひび割れを直接不連続面としてモデル化しており、局所的な一本のひび割れ挙動を再現するのによく使われている。

したがって、ひび割れ開口幅に着目して、前述した局所的な大きな複数ひび割れの進展挙動を再現するには、分布ひび割れモデルより離散ひび割れモデルの方が適していると考えられるが、既往研究では複数ひび割れの進展挙動につい

て離散ひび割れモデルを適用した事例がほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、すでに複数ひび割れが生じている既設コンクリート構造物について、ひび割れ開口幅に基づいて定量的に変状メカニズムを解明する手法として、一本のひび割れ挙動の再現によく用いられる離散ひび割れモデルを複数ひび割れの数値解析へ拡張した^{1),2)}。これは、引張軟化則に基づいて、複数ひび割れのうち任意の1本のひび割れが進展するのに必要な外力をそれ以外のひび割れを拘束する中でそれぞれ求め、それらのうち最小荷重を示すひび割れパターンが真のひび割れパターンとして選定する解析法である。そして、本数値解析モデルの有効性について、実規模のトンネル覆工破壊実験との検証により確認した。

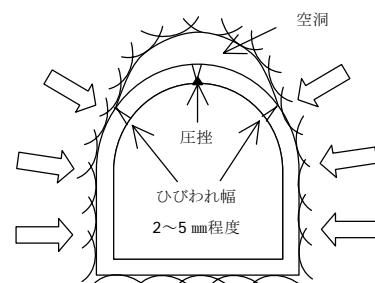


図-1 導水路トンネルの変状事例

* 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部
** 中央研究所 総合技術開発部
*** 熊本大学大学院 自然科学研究科
**** 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター

2. 離散ひび割れモデルを用いた複数ひび割れの数値解析

(1) 基本的な考え方

ひび割れ先端を制御する手法に基づいて複数ひび割れの進展パターンを決定する場合には、次のような複雑なひび割れ間の干渉問題を考慮する必要がある。それは、**図-2**に示すとおり、①主ひび割れが進展し、他のひび割れが停滞する場合、②主ひび割れが進展し、他のひび割れが同時に進展する場合、③主ひび割れが進展し、他のひび割れが閉合する場合、であり、これを複数のひび割れについて全て考慮すると非常に複雑であることが容易に推測できるであろう。

そこで、複数ひび割れの進展パターンを決定するためのルールを次のように設定した。

まず、複数ひび割れのそれぞれに対して、任意の一本のひび割れ(主ひび割れ)が進展すると仮定して、それ以外のひび割れの進展を拘束する中で、主ひび割れが進展するのに必要な外力をクラック方程式により算定する。

そして、それら複数ひび割れのそれぞれが主ひび割れとして進展するのに必要な外力のうち、最小荷重を示すひび割れパターンを真のひび割れパターンとして決定する。

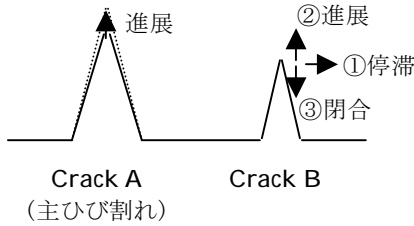


図-2 複数ひび割れ間の干渉問題(2本の場合)

(2) クラック方程式の定式化

図-3に、モード I の二本のひび割れ(Crack A、Crack B)について、ひび割れ先端制御による各ひび割れの各ひび割れ節点に作用する結合力および開口変位量、外力の関係図を示す。以下に、二本のひび割れにおけるクラック方程式の定式化について示す。

まず、Crack A が主ひび割れとして進展する場合について考える。今、Crack A の先端が引張強度に到達したと仮定し、Crack A の先端での力の釣り合い式を立てる。

$$Q_{la} = CR_a \cdot P_a + \sum_{i=1}^N CI_a^i \cdot F_a^i + \sum_{j=1}^M CI_{ab}^j \cdot F_b^j \quad (1)$$

ここで、 Q_{la} は引張強度に相当する節点力、 CR_a は外力の作用位置に単位荷重を作用させたときの Crack A の先端での節点力、 P_a は Crack A の進展に必要な外力(未知数:1個)、 CI_a^i は Crack A の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack A のひび割れ先端における節点力、 F_a^i は Crack A の各ひび割れ節点の結合力(未知数: $i=1,2,\dots,N$)、 CI_{ab}^j は Crack B の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack A のひび割れ先端の節点力、 F_b^j は Crack B の各ひび割れ節点の結合力(未知数: $j=1,2,\dots,M$)である。

次に、各ひび割れ節点における変位の釣り合い式を立てる。

$$W_a^i = BK_a^i \cdot P_a + \sum_{k=1}^N AK_a^{ik} \cdot F_a^k + \sum_{j=1}^M AK_{ab}^{ij} \cdot F_b^j \quad (2)$$

$$W_b^j = BK_b^j \cdot P_a + \sum_{i=1}^N AK_{ba}^{ji} \cdot F_a^i + \sum_{k=1}^M AK_b^{jk} \cdot F_b^k \quad (3)$$

ここで、 W_a^i は Crack A の各ひび割れ節点の変位量(未知数: $i=1,2,\dots,N$)、 BK_a^i は外力の作用位置に単位荷重を作用させたときの Crack A の各ひび割れ節点における変位量、 AK_a^{ik} は Crack A の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack A の各ひび割れ節点の変位量、 AK_{ab}^{ij} は Crack B の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack A の各ひび割れ節点の変位量である。また、 W_b^j は Crack B の各ひび割れ節点の変位量(未知数: $j=1,2,\dots,M$)、 BK_b^j は外力の作用位置に単位荷重を作用させたときの Crack B の各ひび割れ節点における変位量、 AK_{ba}^{ji} は Crack A の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack B の各ひび割れ節点の変位量、 AK_b^{jk} は Crack B の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack B の各ひび割れ節点の変位量である。

最後に、各ひび割れ節点の結合力と開口変位の関係において、**図-4**の引張軟化特性を適用し、(4)(5)式を立てる。

$$F_a^i = f(W_a^i) \quad (4)$$

$$F_b^j = f(W_b^j) \quad (5)$$

なお、 F_b^j および W_b^j にアポストロフィを付記しているのは、拘束されているひび割れを強調したものであり、主ひび割れと区別したものである。

式(1)~(5)をクラック方程式と呼び、方程式が(2N+2M+1)個で、未知数が(2N+2M+1)個であり、この連立方程式を解くことによって、初めに仮定した Crack A が進展するのに必要な外力、各ひび割れ節点での結合力および開口変位が求められるものである。

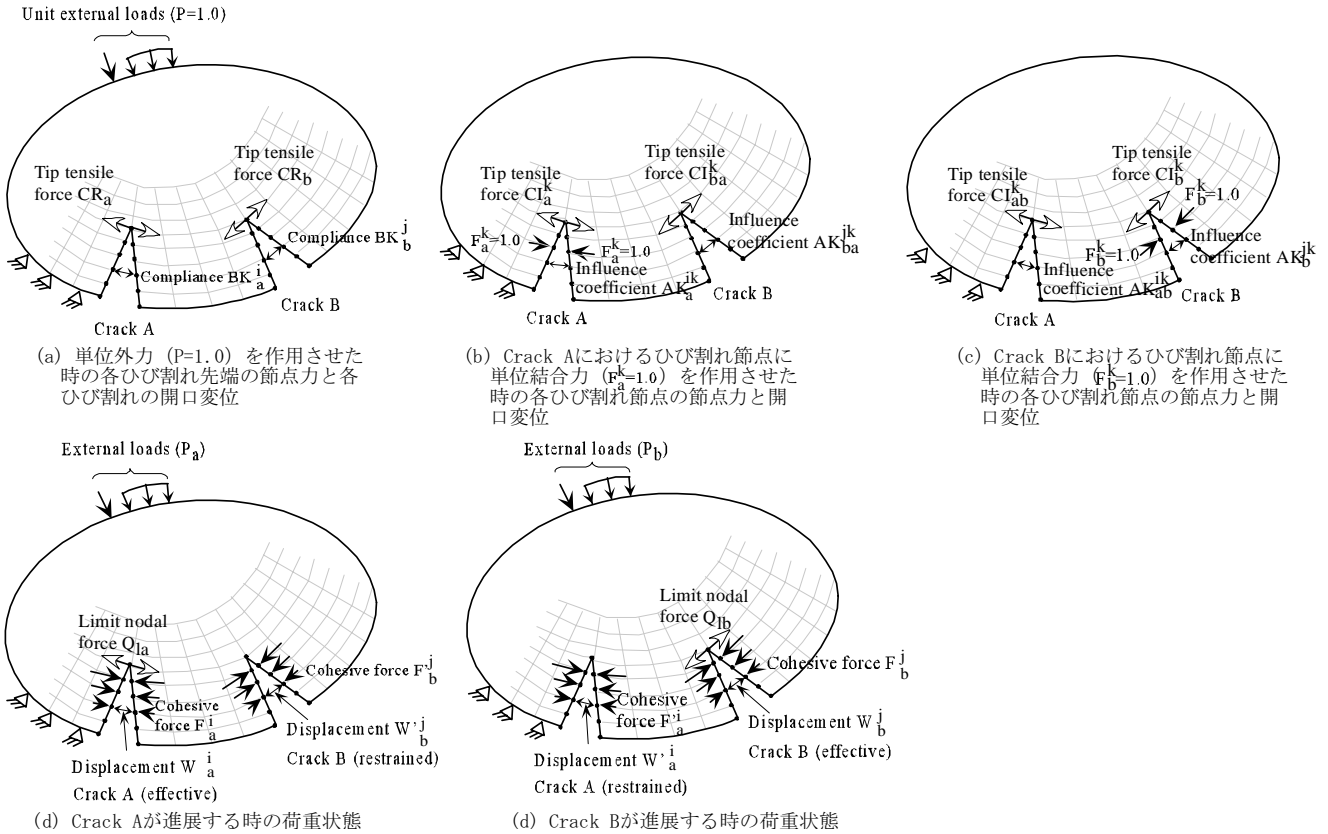


図-3 複数ひび割れの先端制御手法の概念図

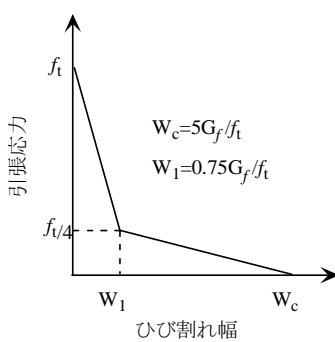


図-4 引張軟化特性

同様に、Crack B が主ひび割れとして進展する場合のクラック方程式が(6)～(10)式のとおり得られる。

$$Q_{lb} = CR_b \cdot P_b + \sum_{i=1}^N CI_{ba}^i \cdot F_a^i + \sum_{j=1}^M CI_b^j \cdot F_b^j \quad (6)$$

$$W_a^i = BK_a^i \cdot P_b + \sum_{k=1}^N AK_a^{ik} \cdot F_a^k + \sum_{j=1}^M AK_{ab}^{ij} \cdot F_b^j \quad (7)$$

$$W_b^j = BK_b^j \cdot P_b + \sum_{i=1}^N AK_{ba}^{ji} \cdot F_a^i + \sum_{k=1}^M AK_b^{jk} \cdot F_b^k \quad (8)$$

$$F_a^i = f(W_a^i) \quad (9)$$

$$F_b^j = f(W_b^j) \quad (10)$$

ここで、 P_b は Crack B の進展に必要な外力、 Q_{lb} は引張強度に相当する節点力、 CR_b は外力の作用位置に単位荷重を作用させたときの Crack B の先端での節点力、 CI_{ba}^i は Crack A の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack B のひび割れ先端における節点力、 CI_b^j は Crack B の各ひび割れ節点に単位荷重を作用させたときの Crack B のひび割れ先端の節点力を示す。

(3) 解析フロー

図-5 に解析フローを示すとおり、まずあらかじめ設定した複数のひび割れ ($I=1,2,\dots,N$) に対して、それぞれのひび割れが主ひび割れとして進展するのに必要な外力をクラック方程式より求める。そして、最小荷重のルールに従って真のひび割れパターンを決定する。次に、そのひび割れパターンに基づく境界条件の下で応力解析を行い、このとき主ひび割れ以外のひび割れの先端で引張強度を超過するような場合には、その節点を解放し再度境界条件を設定し、クラック方程式を解き直して応力解析を行う。

解の有効性判定では、以下のような二種類の境界条件の修正を行うものとした。

- ① クラック方程式の解において、ひび割れ節点での開口

変位がマイナス($W < 0$)となる場合(つまり、ひび割れが閉合する場合には、該当するひび割れの先端を一節点分閉合させる方向に移動させ、境界条件を再設定する。

- ② クラック方程式の解において、可逆現象(ひび割れ節点での結合力が前ステップでの結合力より大きくなるような状態)が生じた場合には、該当するひび割れ節点での結合力を前ステップでの結合力レベルに保持する。

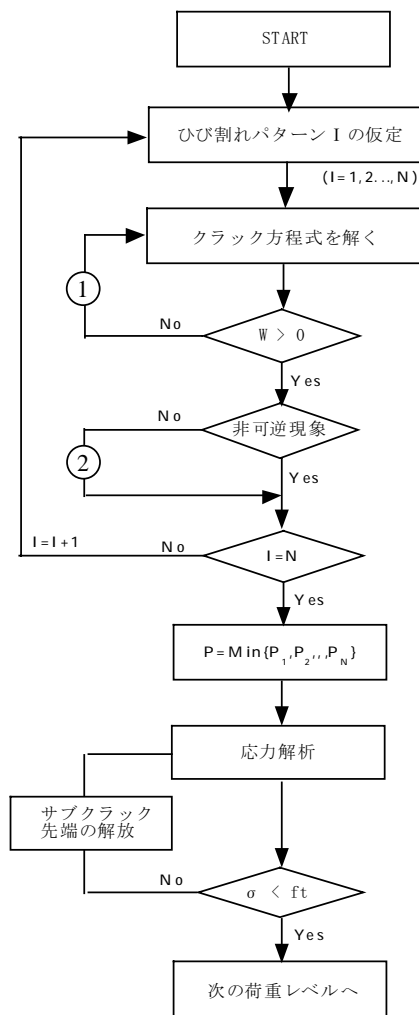


図-5 解析フロー

3. 実規模のトンネル覆工破壊実験による本手法の検証

(1) 実験概要

図-6 に実験モデルを示す。トンネル覆工試験体は、直径 2.5m、覆工コンクリート厚 25cm の実規模の導水路トンネル標準馬蹄形としてコンクリートで製作され、載荷条件はアーチ覆工の背面空洞を想定して、その空洞域以外の側壁に等圧載荷されたものである。実験目的はひび割れ進展パターンおよび覆工耐荷力の把握である。なお、載荷は荷重制御によって実施され、計測は載荷荷重、ひずみ量、内空変位量となっており、ひび割れ開口幅は計測されていない。

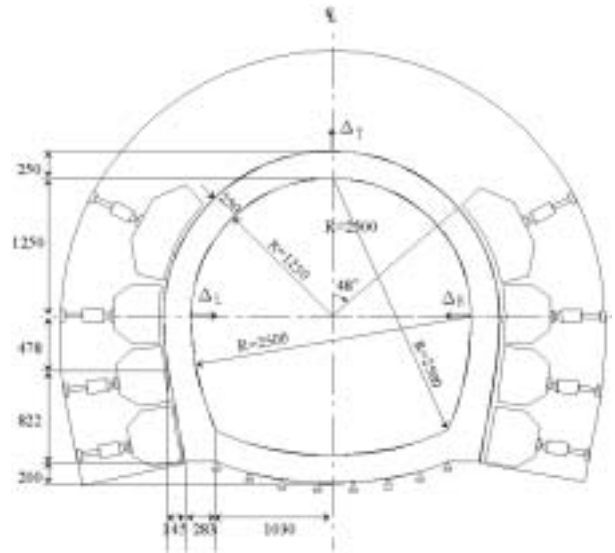


図-6 実験モデル

(2) 数値解析モデル

数値解析モデルは、図-7 に示すとおり、実験結果でのひび割れ状況から、Crack A:天端 CL 部、Crack B:右側壁 SL 部、Crack C:右底版部、Crack D:左底版部、Crack E:左側壁 SL 部にそれぞれひび割れ経路を設定し、初期ノッチを各ひび割れに対して 2.5cm (1/10H、H:覆工巻厚)と設定した。

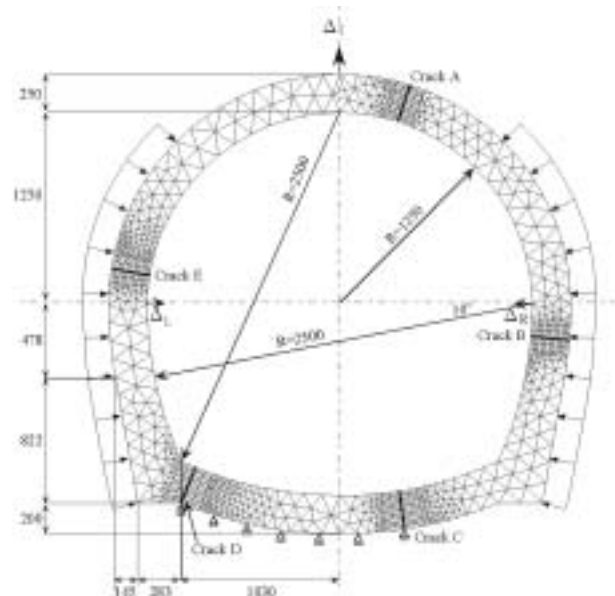


図-7 数値解析モデル

また、覆工コンクリートの材料物性値は表-1 に示すとおりであり、数値解析に用いるコンクリートの引張軟化特性は図-4 に示す非線形モデルで近似した。

表-1 覆工コンクリート物性値

E (GPa)	ν	f_c (MPa)	f_t (MPa)	G_f (N/mm)	$W_c(=5G_f/f_t)$ (mm)
20.00	0.20	20.00	2.00	0.10	0.25

(3) 検証結果

図-8、9 に実験および解析結果に基づく破壊直前のひび割れ進展状況を示す。なお、図中の○数字は解析ステップにおける各ひび割れ先端位置を示したものである。

実験では、右側壁部でのひび割れが最も卓越して発生・進展し、ついで底版部のひび割れとなり、天端部および左側壁部ではあまりひび割れは進展せず、ピーク荷重以降は脆性的な破壊挙動を示した。左右非対称なひび割れ発生状況となったのは、等圧载荷を十分に制御できなかったためと考えられる。これに対して、数値解析結果は実験をよく再現できており、

解析ステップ④(Crack B 先端が 1/2H に到達した時点、H: 覆工巻厚)においてピーク荷重に到達する結果が得られている。また、数値解析では Crack B が全解析ステップにおいて最も卓越するひび割れ(主ひび割れ)として進展して行き、他のひび割れがそれに追従して同時進展、停滞、閉合を繰り返しながら推移して行く状況が詳細に得られることが分かる。

図-10 に荷重-変位関係を示すとおり、実験と数値解析は良い一致を示している。また、同図に数値解析による荷重-ひび割れ開口幅関係を示すとおり、最大ひび割れ開口幅は、Crack B において、ひび割れ貫通直前で 0.2mm 程度となっている。

以上より、本研究で開発した離散ひび割れモデルを用いた複数ひび割れの数値解析手法は、実験を良い精度で再現しており、有効な手法であることが確認できたものと考えられる。

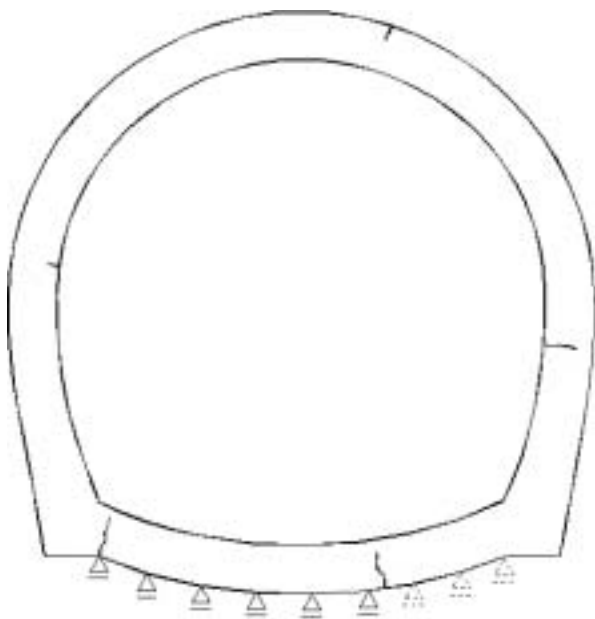


図-8 実験による破壊直前のひび割れ進展状況

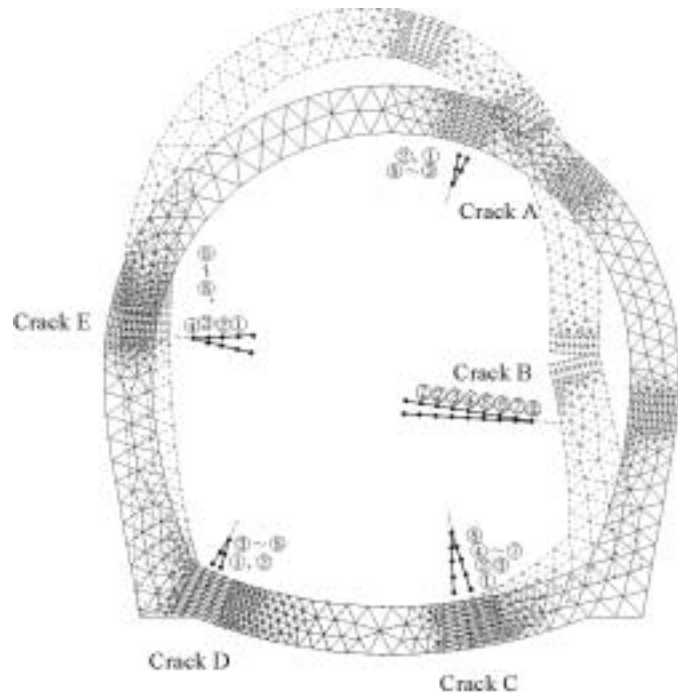


図-9 解析による破壊直前のひび割れ進展状況

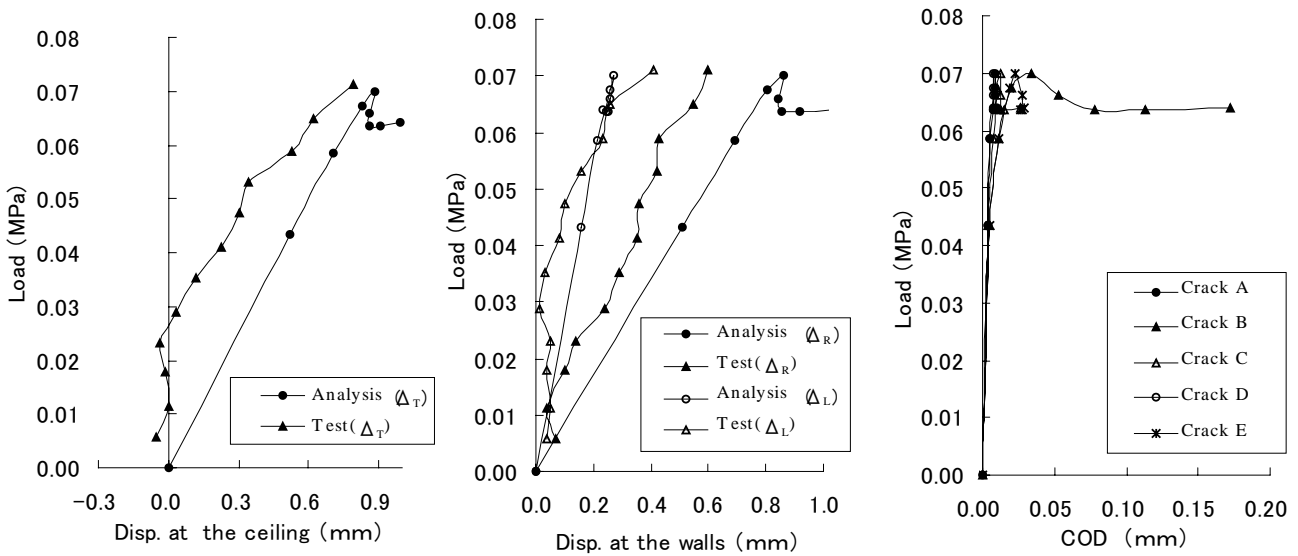


図-10 荷重-変位、荷重-開口幅関係

4. 結論

コンクリート構造物に生じる複数ひび割れの進展挙動解析として、一般的には離散ひび割れモデルの適用が困難なため、分布ひび割れモデルの適用がなされてきた。しかし、本手法の提案によって、複数の局所的なひび割れの発生現象についても、離散ひび割れモデルを適用することが可能となることを示すことができた。

一方、本研究の最終目標は、トンネル構造体において、覆工に発生しているひび割れ開口幅から作用外力を推定することとしている。先のトンネル覆工ひび割れ解析結果の知見に基づけば、地山の支持条件を考慮せず覆工単体として求められる最大ひび割れ開口幅は、ひび割れが覆工を貫通する直前で0.2mm程度となっている。したがって、実際の現場で生じている2~5mm程度の大きなひび割れ開口幅を再現するには、ひび割れが覆工を貫通した以降について、地山の支持条件を何らかしらか考慮する必要がある。そこで、ひび割れが覆工を貫通した以降も解析可能となる、覆工背面の地山の支持条件を考慮した離散ひび割れモデルを用いた数値解析手法の開発を今後の課題としている。

近年、我が国の既設コンクリート構造物の老朽化あるいは外的環境の変化などにより構造的なひび割れが発生している変状事例が少なくない。また、これから2025年までの四半世紀はストックメンテナンスの世紀として位置づけられており、すでにひび割れが生じている既設コンクリート構造物を合理的に維持補修・補強していくことが望まれている。このような背景の下、すでにひび割れが生じているコンクリート構造物の定量的な構造健全度評価ならびに合理的な補修・補強設計において、現状を定量的な指標をもって評価することが非常に重要であると考えられる。このような見地から、本研究で開発した手法はひび割れ開口幅に基づいて、複数ひび割れの挙動および作用外力など現変状メカニズムを定量的に評価できることから、非常に有効な一手法となりえるであろう。

参考文献

- 1) Zihai SHI, Masayasu OHTSU, Masaki SUZUKI, Yoshihisa HIBINO : NUMERICAL ANALYSIS OF MULTIPLE CRACKS IN CONCRETE USING THE DISCRETE MODELING APPROACH、第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.219-224、2001.3
- 2) Z. Shi, M. Ohtsu, M. Suzuki and Y. Hibino : Numerical analysis of multiple cracks in concrete using the discrete approach, Journal of Structural Engineering , ASCE ,127(9), pp.1085-1091, 2001