

鋼纖維補強コンクリートを用いた 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)

優れたじん性能を持つ鋼纖維補強コンクリートを使用したトンネル覆工を対象に、ひび割れの発生・進展を考慮した解析を現在一般的に設計で用いられている骨組解析により行うことができるよう、引張軟化曲線を考慮した鋼纖維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回転ばねで表現することにより、ひび割れを考慮した骨組解析を行うことができた。また、曲げ試験・トンネル模型載荷実験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, steel-fiber-reinforced concrete, crack tension-softening relationship, frame analysis

1. はじめに

トンネル覆工のような円環構造物では、断面力が局所的に部材の断面耐力を越えてひび割れが発生しても直ちに構造物が破壊に至らないことが朝倉ら¹⁾などにより実験的に確認されている。このようなトンネル覆工の特徴に着目して、限界状態設計法に基づくトンネル覆工設計方法が峯本ら²⁾と Nanakorn ら³⁾により提案された。峯本らの設計方法は無筋コンクリートを対象としており、トンネル覆工体の一部にひび割れが発生しても構造体は破壊に至らないことから、設計上の終局状態を覆工部材に生じる断面力が部材の断面耐力に達した時点として設計するものとしている。Nanakorn らの設計方法は鋼纖維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete: S F R C) を対象としたものであり、S F R C の引張特性を考慮して部材の断面耐力を算定している。また、設計上の終局状態は峯本らと同様に部材の断面力が断面耐力に達した時点としている。

S F R C ではひび割れ面で鋼纖維の架橋作用により引張応力が伝達されるために、無筋コンクリートに較べて断面耐力が大きくなり、かつ最大断面耐力以降も荷重を保持するために優れたじん性があることが筆者ら⁴⁾の実験で確認されている。しかし Nanakorn らの設計方法では、S F R C の大きな特徴の 1 つであるじん性を評価することができない。トンネル覆工のような円環構造物では、

断面力が局所的に部材の断面耐力を越えてひび割れが発生しても、ひび割れ断面で断面力を保持することができるならばひび割れ発生後においても構造体は破壊に至らず、さらに大きな荷重に耐えることができるものと考えられる。

そこで、本研究では S F R C を用いて施工されたトンネル覆工について S F R C のじん性能を評価した設計手法を確立することを目的に、ひび割れ発生・進展を考慮した S F R C 部材の断面力および変形挙動を解析するモデルを構築し、さらにこのモデルの妥当性の検証を行った。

2. S F R C トンネル覆工の変形特性

S F R C の大きな特徴の 1 つはひび割れ面で鋼纖維により引張応力が伝達されることであり、引張軟化曲線はひび割れ開口幅と引張応力との関係を表したものである。この引張軟化曲線を考慮した有限要素法解析により S F R C の変形挙動を精度良く追跡することができるところが鬼頭ら⁵⁾により報告されている。鬼頭らは円環載荷実験を対象として引張軟化曲線を考慮した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。ここで鬼頭らが行った円環載荷実験を図-1 に示す。円環供試体の直径方向を P C 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ている。円環供試体には鋼纖維

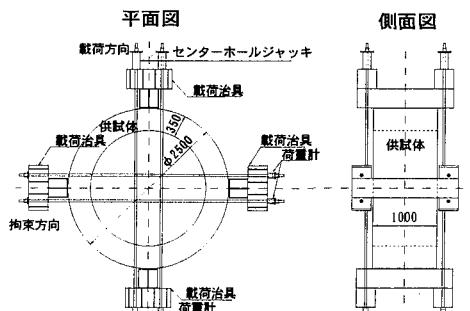


図-1 円環載荷実験

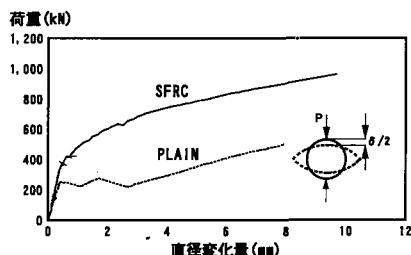


図-2 円環載荷実験の荷重-変位曲線

を 1.0% (体積百分率) 混入した S F R C を用いている。図-2 に実験結果として載荷荷重と載荷方向直径変位量との関係を示すが、同様な方法でプレーンコンクリートを用いて実験を行った峯本ら²⁾の実験結果も併せて示す。プレーンコンクリートではひび割れ発生直後に荷重が一時的に低下するが、S F R C ではそのような荷重の低下は見られない。しかし両者とも最終的には荷重・変位とも増加する傾向を示している。鬼頭らはコンクリートの破壊力学に基づいた有限要素法解析によってこれらの変形挙動を追跡することができると報告しているが、これらの解析におけるプレーンコンクリートと S F R C の解析条件の違いは、引張軟化曲線の考慮の有無のみである。つまり、プレーンコンクリートと S F R C とでは、ひび割れ断面における応力分布が異なることになる。

筆者ら⁶⁾は、プレーンコンクリートを覆工材料としたトンネル覆工を対象として、ひび割れ発生を考慮した計算モデルを提案している。このモデルによりひび割れ断面における断面力および変形性能を算定し、それを骨組解析に応用することによってひび割れ発生後のトンネル覆工の変形挙動を近似できることを報告している。

そこでプレーンコンクリートと S F R C との大きな相違点である引張軟化曲線を考慮することにより、S F R C におけるひび割れ断面の断面力のモデル化を行った。さらに、鋼纖維の混入がひび割れ断面の変形挙動にも大きな影響を与えると考えられることから、変形性能を算定するモデルについても検討した。これらのモデル

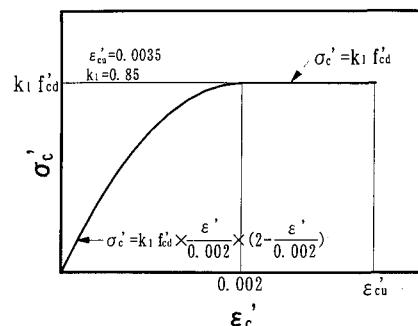


図-3 コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線

を構築することにより、筆者らが提案したプレーンコンクリートの計算手法と同様な骨組解析によってひび割れが発生した S F R C のトンネル覆工の変形挙動を求め、その妥当性について検討を行った。

3. ひび割れ断面モデル

(1) プレーンコンクリートのひび割れ断面モデル

プレーンコンクリートのひび割れ断面モデルを参考にして S F R C のひび割れ断面モデルを検討した。プレーンコンクリートのひび割れ断面モデルの概要をまとめると以下のようになる。

ひび割れ断面における断面力を算定するためのモデルとして次のような仮定を行う。

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ひび割れ面間には、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 に示す土木学会「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。

コンクリートの破壊力学においては、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を与えていると考えられている⁷⁾。しかしフラクチャープロセスゾーンによる影響は、一般的なトンネル覆工の部材断面高さ (30cm 以上) では小さいため、ここではフラクチャープロセスゾーンで伝達される引張応力を無視している。よって、ひび割れ面では引張応力の伝達が無いものとした。

以上の仮定に従うと、ひび割れ断面の応力・ひずみ分布は図-4 に示すようになる。ここで f_t : 引張強度, ϵ_t :

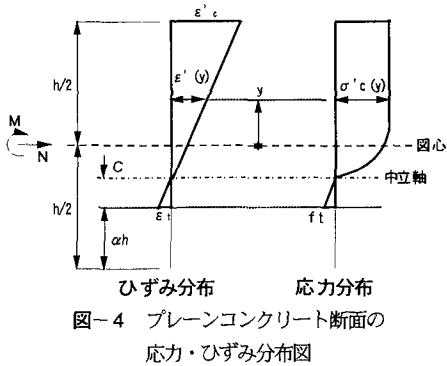


図-4 プレーンコンクリート断面の応力・ひずみ分布図

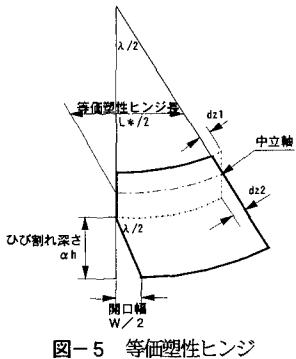


図-5 等価塑性ヒンジ

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, $\sigma'_c(y)$: 距離 y における圧縮応力, 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先端から圧縮側へ線型分布となり、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。

$$N = \int_{-\frac{h}{2} + \alpha h + C}^{\frac{h}{2}} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot C \cdot b \quad (1) \text{ a}$$

$$M = \int_{-\frac{h}{2} + \alpha h + C}^{\frac{h}{2}} \sigma'_c(y) \cdot y \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot C \cdot \left(\alpha h - \frac{h}{2} + \frac{C}{3} \right) \cdot b \quad (1) \text{ b}$$

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変形性能のモデル化については鉄筋コンクリート部材で用いられている、等価塑性ヒンジ長 (equivalent plastic hinge length) を導入している⁸⁾。これは図-5に示すように、等価塑性ヒンジ長間における部材のたわみ角はひび割れ開口により生じるひび割れ面の回転角と同じになる、とする概念である。なお、等価塑性ヒンジ長は中立軸における長さであり、等

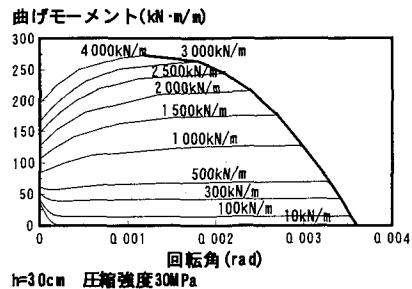


図-6 プレーンコンクリートひび割れ断面の曲げモーメント-回転変位関係

価塑性ヒンジ長両端では平面保持が成り立つものとしている。等価塑性ヒンジ長区間で発生するたわみ角は式(2)のように表せられる。

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

ここで λ : 部材たわみ角, dz_1 : 圧縮側の縁変形量, dz_2 : 引張側の縁変形量である。仮定によりひび割れ開口によるひび割れ面の回転角は λ と等しくなり、式(3)に示すように表せる。

$$\lambda = \frac{W}{\alpha \cdot h} \quad (3)$$

ここで W : ひび割れ開口幅である。一方、縁変形量は等価塑性ヒンジ長から式(4)で表せられる。

$$dz_1 = \epsilon'_c \cdot \frac{L^*}{2}, \quad dz_2 = \epsilon_t \cdot \frac{L^*}{2} \quad (4)$$

等価塑性ヒンジ長は、部材断面高さに対するひび割れ深さの割合の影響を受けるものと考えられる。そこで式(5)に示すように、ひび割れ深さが大きくなるに従い等価塑性ヒンジ長が小さくなるよう両者の関係を仮定している。

$$L^* = (1-\alpha) \cdot h \quad (5)$$

以上のようにひび割れ断面での断面力の釣り合い式(1)からひび割れ深さと断面力の関係が決定され、式(2)～(5)によりひび割れ断面の変形挙動が決定される。これらのひび割れ断面モデルを用いて計算したひび割れ発生後の断面の変形挙動を曲げモーメントと回転変位の関係に整理し図-6に示す。軸力が低い場合にはひび割れ発生直後に曲げモーメントが急激に低下する領域があり、その後は曲げモーメントがほぼ一定で回転変位のみが増

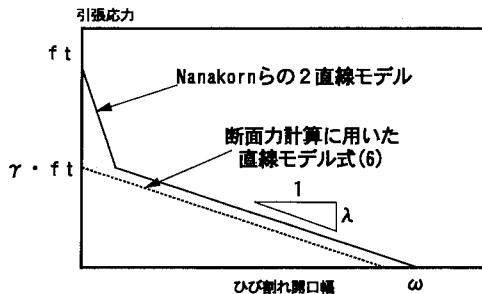


図-7 SFRCの引張軟化曲線

加している。一方、軸力が高い場合にはひび割れ発生直後に曲げモーメントが大きくなる領域があり、その後は軸力が低い場合と同様に曲げモーメントがほぼ一定で回転変位のみが増加する傾向を示す。図中の太線は、各軸力において圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ（ 3500μ ）に達した状態を結んだものである。「コンクリート標準示方書」に準拠すると、コンクリートの圧縮ひずみが限界圧縮ひずみを越えた場合については設計の範囲外となるため、筆者らは図中の太線を越えるようなひび割れ断面の回転変位はひび割れ断面モデルの適用外としている。そこで圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみに達する回転変位を限界回転角と定め、等価塑性ヒンジ長間における部材のたわみ角が限界回転角に達した時点でコンクリートに圧縮破壊が生じるものとした。

(2) SFRCのひび割れ断面モデル

SFRCの断面力算定に関しては、鋼織維の架橋作用のためひび割れ面間に伝達される引張応力を考慮し、それ以外についてはプレーンコンクリートのひび割れ断面での断面力モデルと同じ仮定を用いた。SFRCのひび割れ面における応力伝達は、引張軟化曲線によってひび割れ開口幅と関係付けられる。Nanakorn⁹⁾はSFRCの引張軟化曲線について研究しており、SFRCの引張軟化曲線は図-7に示すように2直線により近似することができ、ひび割れが発生した後に引張応力が急激に低下する領域と、その後緩やかに応力が低下する領域に分けることができるとしている。筆者ら⁴⁾は、直接引張試験と曲げ試験を行い、SFRCの引張軟化曲線がNanakornが指摘しているように2直線で近似することができることを実験により確認し、ひび割れ開口幅の増加に伴って緩やかに応力が低下する領域が鋼織維の形状・混入率等により変化することを指摘した。さらに、鋼織維の混入率が2%以下では、ひび割れ発生応力であるSFRCの引張強度はプレーンコンクリートとほぼ同等であることも確認している。またNanakorn⁹⁾は、SFRCの

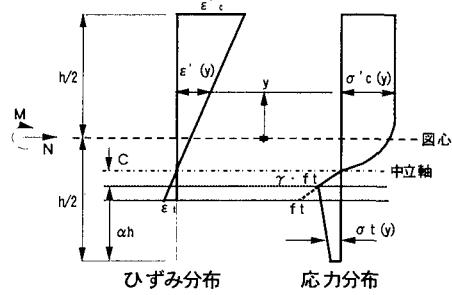


図-8 SFRCひび割れ断面の応力・ひずみ分布

引張軟化曲線を緩やかに応力が低下する領域のみをモデル化した1直線モデルを用いることにより、SFRCの断面力および変形挙動を良く近似することができるることを報告している。そしてSFRCの引張特性をひび割れ幅が増大するに従い引張応力が減少するものとして、SFRC部材の断面耐力算定方法を提案している。

これらのことから、本研究における断面力算定に用いる引張軟化曲線は式(6)で示される1直線モデルとした。

$$\sigma_t = \gamma \cdot f_t - \lambda \cdot W \quad (6)$$

ここで γ ：残留強度率、 λ ：引張軟化曲線の勾配、 W ：ひび割れ開口幅である。残留強度率は図-7に示すように引張強度と応力が急激に低下した時点の引張応力との比率で定義される。筆者ら¹⁰⁾はこれらSFRCの引張軟化曲線の特性値である γ および λ を算定するための曲げ試験方法と算定方法について提案している。この方法によれば、SFRCの引張特性である引張軟化曲線を直接引張試験によらずに、より簡便な曲げ試験から算定することができる。

以上のようにSFRCのひび割れ面での引張応力は式(6)に示すようにひび割れ開口幅の増加に比例して減少するものとし、また圧縮応力-ひずみ関係はプレーンコンクリートと同様にコンクリート標準示方書に示される二次曲線タイプで表されるとして、ひび割れ断面における応力・ひずみ分布は図-8に示すようになる。よってひび割れ断面における断面力は、式(7)で表すことができる。

$$N = \int_{-\frac{h}{2}+\alpha h+C}^{\frac{h}{2}} \sigma_c'(y) \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot f_t \cdot C \cdot b \\ - \int_{-\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}+\alpha h} \sigma_t(y) \cdot b \cdot dy \quad (7a)$$

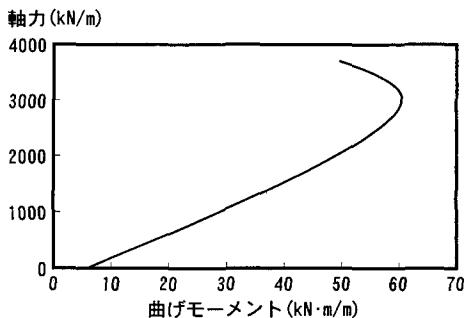


図-9 S F R C のひび割れ発生断面力

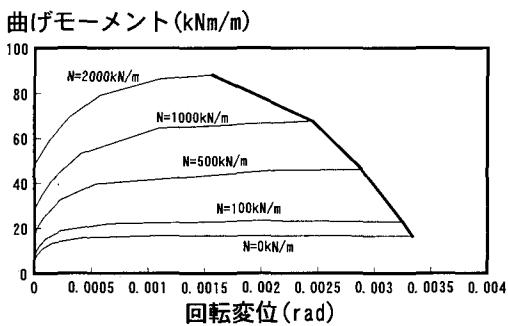


図-10 S F R C ひび割れ断面の変形性能

$$M = \int_{\frac{h}{2}+ah+C}^{\frac{h}{2}} \sigma_c'(y) \cdot y \cdot b \cdot dy - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot f_c \cdot C \left(ah - \frac{h}{2} + \frac{C}{3} \right) \cdot b - \int_{-\frac{h}{2}}^{-\frac{h}{2}+ah} \sigma_t(y) \cdot y \cdot b \cdot dy \quad (7b)$$

ここで $\sigma_t(y)$: 距離 y における引張応力である。S F R C のひび割れ断面における変形挙動のモデルについては、プレーンコンクリートと全く同様に図-5に示す等価塑性ヒンジ長の概念を導入した。この仮定により式(2)～(5)からひずみ分布とひび割れ開口幅が関係付けられ、よってひび割れ断面内の圧縮ひずみと引張軟化曲線から応力分布が決定されている。

(3) S F R C のひび割れ発生断面力と変形挙動

S F R C の引張特性の一例 ($h=15cm$, $\lambda=0.28N/mm^3$, $\gamma \cdot f_c=1.6MPa$) を用いてひび割れ発生断面力とひび割れ断面の変形挙動を算出した。その結果を図-9および図-10に示す。S F R C の引張軟化曲線として直線モデルを用いているために引張側の縁応力が残留強度に達した時点でひび割れが発生することになり、よって S F R C ではプレーンコンクリートに較べてひび割れ発生断面力が小さくなる。ひび割れ断面の変形性能については、

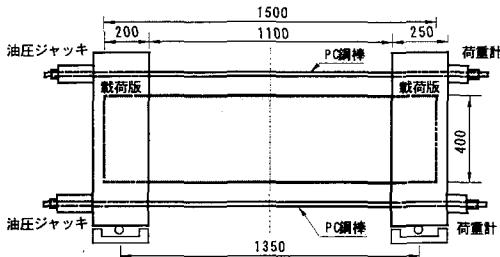


図-11 40cm 角直方体供試体曲げ試験

表-1 コンクリート配合

繊維の混入量 V/F(%)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)				
			繊維F	水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G
0.0	50.3	52.9	0.0	192	382	900	802
1.0	50.3	60.9	78.5	202	402	992	638

プレーンコンクリートでは軸力が小さい場合には曲げモーメントがひび割れ発生直後に軟化するのに対して、S F R C では曲げモーメントが軟化することは無く、軸力の大きさに関わらずひび割れ発生後に最大曲げモーメントが発生している。S F R C の曲げ試験ではひび割れが発生した後、最大断面力を示すことが報告されており⁹⁾、提案したひび割れ断面モデルの変形挙動は実際の部材の挙動に近いものと考えられる。図-10中の太線はひび割れ断面の圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ (3500 μ) に達した回転変位を結んだものであり、プレーンコンクリートの場合と同様にこの太線に回転変位が達した時点でコンクリートの縁応力が圧縮限界に達したものとする。なお、この図中の太線を越えるような回転変位は仮定条件を満たさないため、限界回転角と呼ぶ。

以上のことから、提案した S F R C のひび割れ断面モデルではひび割れ発生断面力が実際の部材に較べて小さめになるが、ひび割れ発生による挙動はほぼ近似することができるものと考えられる。

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目的で、40cm × 40cm × 150cm の直方体供試体を用いて筆者ら⁴⁾が実施した曲げ実験結果を解析した。

実験の概要を図-11に示す。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台づ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、最初に4台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軸方向圧縮力 (約490kN) 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純曲げのモーメントを載荷した。この載荷条件ではせん断力は作用しないため、曲げひび割れについてのみ検討すればよい。なお、曲げモーメント載荷

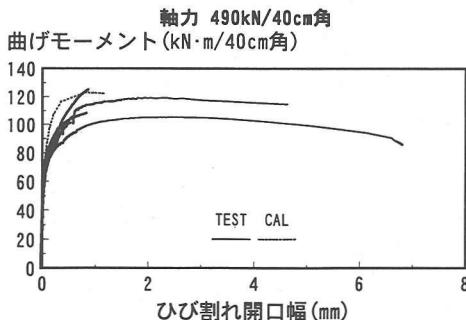


図-12 曲げモーメント-開口幅関係

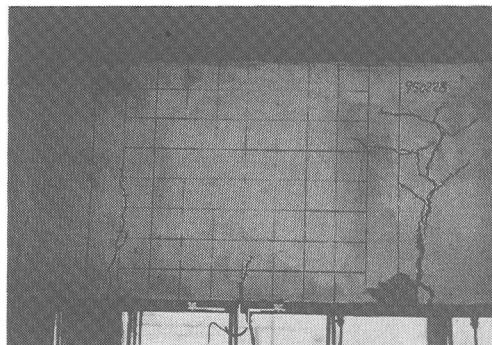


写真-1 曲げ試験最終状態

中は上下ジャッキの総荷重を一定にすることにより供試体に作用する軸力を一定に保持した。

S F R C の配合を表-1 に示す。鋼纖維は表面にインデント加工した長さ 30mm・アスペクト比 50 のものを使用し、混入率は 1.0%（体積百分率）である。コンクリートの粗骨材の最大寸法は鋼纖維長を考慮し 20mm とした。載荷条件により供試体全体には均一の曲げモーメントが作用することから、ひび割れ発生位置を限定する目的で供試体中央の引張側に深さ 10mm の切り欠きをコンクリートカッタにより設けている。この箇所を跨ぐように Q 型変位計を取り付けひび割れ開口幅を測定した。

図-12 に 6 供試体を実験して得られた曲げモーメントとひび割れ開口幅の関係を示す。いずれの実験も最大曲げモーメントはひび割れが発生した後に発現している。その後曲げモーメントの増加はほとんどなくなり、ひび割れ開口幅のみが増加するようになる。最終状態近くまで計測できた 2 供試体については曲げモーメントの軟化も認められる。最終状態の状況を写真-1 に示す。

この供試体と同一の材料で作成した 15cm 角供試体の曲げ試験結果から筆者らが提案している方法¹⁰⁾により算出した S F R C の特性値を表-2 に示す。これらの特性値を使用して前述のひび割れ断面モデルにより曲げモーメントとひび割れ開口幅の関係を計算した結果を図-12 に点線で示す。両者を比較すると最大荷重値は実験・計

表-2 引張軟化曲線の特性値

供試体番号	圧縮強度(MPa)	λ (N/mm ³)	γ ft(MPa)
1	34.2	0.28	1.6
2		0.23	1.3
3		0.27	1.3
4	38.3	0.26	1.7
5		0.28	1.7
6	平均	0.37	2.2
		0.28	1.6

軸力 490kN/40cm角
曲げモーメント (kN·m/40cm角)

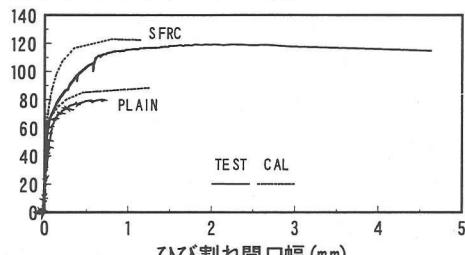


図-13 プレーンコンクリートと S F R C の曲げモーメント-開口幅関係

算とも近い値を示しているが、最終変位量については計算がひび割れ開口幅 1mm 付近で終了しているのに対し、実験値はさらに変位の増加が見られる。写真-1 から、実験ではひび割れ断面における圧縮側のコンクリートに斜め方向へ延びるひび割れが生じることにより荷重を保持することができなくなっている様子を窺うことができる。ひび割れ断面モデルでは圧縮側の縁ひびきが限界ひびき (3500 μ) に達した時点で仮定条件を満たさなくなるため計算を打ち切っているが、実際のコンクリートにおける圧縮応力は最大値以降は軟化をするものの限界ひびきを越えた状態でも保持されており、最終的に斜めひび割れが発生して耐力が失われると考えられる。このように計算モデルでは斜めひび割れ等の圧縮に関する現象を考慮していないため、実験と計算の最終変位量に差が生じてしまったと考えられる。

筆者らは同様の方法によりプレーンコンクリートについても曲げ試験を行っている。図-13 に荷重-ひび割れ開口幅関係の実験値とひび割れ断面モデルによる計算値を示す。また S F R C と比較できるよう、S F R C の代表例も併せて示している。プレーンコンクリートの曲げ試験では、試験が最終段階に近づくと所定の軸力を保持させることができ非常に困難であり、この傾向は導入される軸力が高くなるほど顕著となる。図-13 に示す実験例でも実際の軸力は 500~800kN の範囲で変動しており、最終変位量を精度よく計測することはできなかった。

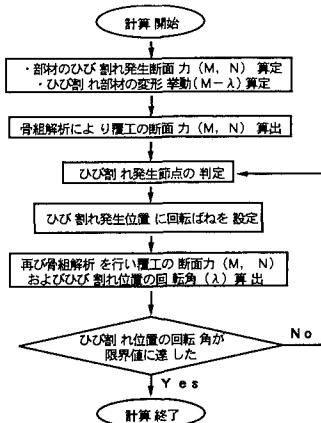


図-1 4 トンネル覆工解析フロー

図からはプレーンコンクリートとS F R C両者の挙動に大きな差は見られないが、最大曲げモーメントの値は約40kN·mの差が認められる。コンクリート圧縮強度はプレーンコンクリートが37.6MPa、S F R Cが35.3MPaと大きな差がないことから、ひび割れ面に作用する引張応力の有無が、曲げ耐力に影響を与えていたものと考えられる。また、ひび割れ断面モデルで計算した最終ひび割れ開口幅は、プレーンコンクリート・S F R C共に約1mmになっていることから、最終ひび割れ幅は両者とも圧縮限界ひずみにより決定されていることがわかる。

以上のように本研究で提案したひび割れ断面モデルは、曲げ耐力およびひび割れ断面の変形挙動を良好に近似できることが確認された。しかし曲げ試験の最終状態はコンクリートの圧縮特性に依存しており、本研究では「コンクリート標準示方書」に示される圧縮応力-ひずみ曲線に準拠しているため最終ひび割れ開口幅を正確に近似することはできなかった。

5. 実構造物解析への適用

(1) 骨組解析

筆者ら⁶⁾が提案しているひび割れを考慮したプレーンコンクリート覆工解析手法をS F R Cにも適用した。この解析モデルは、一般的なトンネル覆工の設計で用いられている骨組解析によりひび割れ発生およびひび割れ発生後の変形挙動を近似する目的で構築されたものである。このトンネル解析モデルの特徴は、覆工部材に発生したひび割れ断面の変形性能を図-1 4の解析フローに示すように節点における変形性能として評価することである。したがって、このトンネル解析モデルをS F R Cに適用するためには、解析フロー中のひび割れ発生断面力とひび割れ断面の変形性能の評価部分のみを、前述のS F R

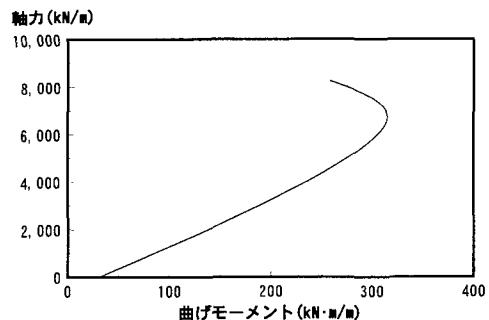


図-1 5 円環載荷実験供試体のひび割れ発生断面力

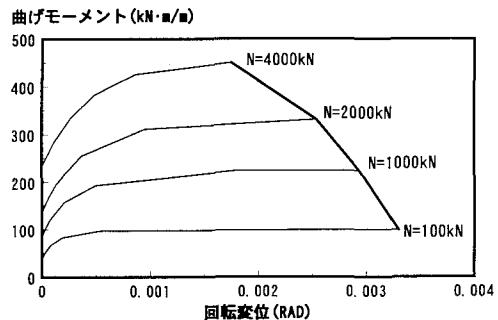


図-1 6 円環載荷実験供試体のひび割れ断面変形性能

Cのひび割れ断面算定方法により変更すればよい。よって解析はプレーンコンクリートと同様、S F R C覆工部材のひび割れ発生断面力とひび割れ断面の変形性能をひび割れ断面モデルにより定めた後、弾性骨組解析により覆工部材に発生する断面力およびひび割れ位置における部材の変形量を求めるという手順になる。計算された全節点における断面力のうち、最初にひび割れ発生断面力に達した節点を判定し、その節点をひび割れ発生とする。その節点にひび割れが発生したことを表現するために結合条件を回転ばねに変更し次の解析へ進む。回転ばね係数はひび割れ断面モデルから算定されるひび割れ断面変形性能図の回転変形と曲げモーメントの関係から定める。

(2) 円環載荷実験

鬼頭ら⁵⁾が行った円環載荷試験を対象に、ひび割れ断面モデルを用いて解析を行った。鬼頭らはコンクリートの破壊力学に基づいた有限要素法により円環供試体の破壊挙動を解析している。その際実験のS F R Cの引張特性を式(8)に示すように定めている。

$$\sigma = 0.5 f_c - 0.2 \omega \quad (8)$$

そこで本研究においてもS F R Cの引張特性を式(8)のにより表せられるものとし、覆工部材のひび割れ発生断

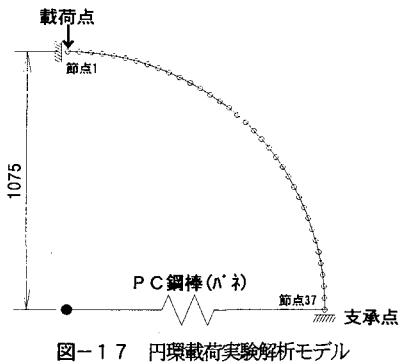


図-17 円環載荷実験解析モデル

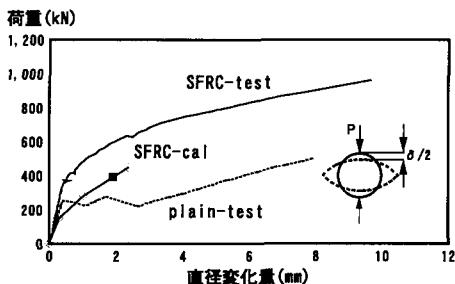


図-18 円環載荷実験の荷重-変位関係

面力および変形性能を算定した。なお、実験時におけるコンクリート圧縮強度は 34.7MPa であった。またコンクリートの引張強度は鋼纖維を混入しても変わらないと考え、Koenig ら¹¹⁾が提案している式(9)により算定した。

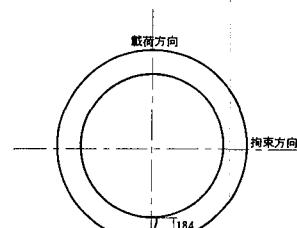
$$f_t = 2.12 \times \ln\left(1 + \frac{f_c}{10}\right) \quad (9)$$

これらの条件より算出された S F R C のひび割れ発生断面力を図-15 に、ひび割れ断面の変形性能を図-16 に示す。

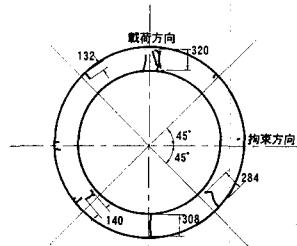
(3) 円環供試体の解析

円環供試体を対象とした骨組解析モデルを図-17 に示す。このモデルでは節点のピッチが約 5cm となっている。本研究のひび割れ断面モデルでは、ひび割れは塑性ヒンジ長間に 1 本のみ発生するようモデル化されている。塑性ヒンジ長は式(5)よりひび割れ発生直後 ($\alpha=0$) ではほぼ部材高さ ($h=35\text{cm}$) になるため、この解析の場合 35cm ピッチ以下で複数のひび割れが発生することは仮定上ありえない。このためひび割れが発生されたと判定された節点の近傍に新たにひび割れ発生の判定がされるような場合には、ひび割れの間隔が塑性ヒンジ長以下にならないようにした。

ひび割れ発生点に設定する回転ばね定数は図-16 よ



(a) ひび割れ発生時



(b) 試験終了時

図-19 円環供試体のひび割れ発生状況

り算定する。回転ばね定数はひび割れ発生初期の段階では一意的に求められないが、とりあえずひび割れ発生節点におけるひび割れ発生時点の断面力と次段階における断面力および回転変形の増加とを推定して仮の回転ばね定数を決定する。そして次段階の解析による断面力および回転変形の増加と、推定した増加量が一致するまで繰り返し計算を行い、最終的な回転ばね定数を決定した。

実験では油圧ジャッキによる載荷方向に対して直交する方向から、プレロードとして 49kN の初期載荷を行っている。解析においても同様に P C 鋼棒をモデル化したバネの配置してある方向に 49kN の載荷をし、各部材の断面力を算出した。次にジャッキ方向から載荷して生じる断面力を算出し先のプレロードによる断面力とを足し合わせ、その断面力により一次ひび割れの判定を行った。次に一次ひび割れ位置に上記方法で算定した回転ばねを設定したモデルを解析し、二次ひび割れの発生を判定した。このように順次新たなひび割れの発生を判定して解析を続けていけばよいのであるが、いずれかのひび割れ節点における回転変形量が図-16 に示す限界値に達した時点で解析を終了する。

(4) 解析結果

実験結果および解析結果について、載荷重と載荷点における直角方向変位量の関係を図-18 に、また実験によるひび割れ発生状況を図-19 に示す。実験では 392kN 付近で載荷点内側に 1 次ひび割れが目視により確認され、

その後の載荷により載荷点と拘束点の中間部分に複数のひび割れが発生、試験終了時の荷重は980kNに達したと報告されている。

解析では、載荷点に一次ひび割れが発生し、その時の荷重は約150kNであった。これは実験値に比べ半分以下の値となっているが、SFRC特性値の強度保持率 γ を0.5にしている影響である。ひび割れ点における回転ばね定数を842kN/radと設定し解析を続行すると、節点番号25（載荷点から約60度の位置）において2次ひび割れの発生が判定された。同様に適切な回転ばねを設定し次の解析を行うと2次ひび割れ点の載荷点側近傍（節点番号18）に3次ひび割れの発生が判定されたが、その経過途中で1次ひび割れ点の回転変形が限界値に達した（図-18中■点）ため、解析を打ち切った。

このようにひび割れ発生位置については、実験結果で見られたような載荷点と拘束点の間にひび割れが分布している現象が解析により再現されている。解析打ち切りについては回転変形量が限界値に達した、つまり縁圧縮ひびみが限界値の3500μに達したことによるが、前章で述べたように実際には圧縮ひびみが3500μ以上に達しても応力伝達は存在しているため、よって実験による最終変位量は解析値より大きくなるものと考えられる。またプレーンコンクリート実験結果と比較すると、SFRCの引張特性によるじん性の効果が發揮され耐力が向上している現象が、解析により表現されていることがわかる。

骨組解析による手法は弾性計算の重ね合わせになり、その結果得られる解析結果は実験結果と比較すると耐力がかかなり小さく、安全側の傾向を示すようになってしまっているが、ひび割れ発生位置・進展の様子など定性的な挙動は追跡することができていると判断される。

6.まとめ

本研究ではSFRCを用いて施工されるトンネル覆工を対象とした設計手法を確立するために、トンネル覆工の解析に一般的に設計等で用いられる手法である骨組解析によってひび割れ発生・進展を考慮した解析ができるよう、SFRC部材のひび割れ断面のモデルを提案した。このモデルはプレーンコンクリートにおけるひび割れ断面モデル化と同様な概念に、SFRCの引張特性を附加することにより構築されている。その妥当性を確認するために曲げ試験、またトンネル覆工を想定した円環供試体載荷実験について解析を行い、良好な結果を得た。本研究の成果をまとめると次のようになる。

①本研究で提案したひび割れ断面モデルを用いることにより、SFRCの引張特性を考慮した解析をすることことができた。さらにこのモデルによりひび割れ発生後の変形特性を近似することができるることを、実験と比較

することにより確認した。

- ②SFRC部材の曲げ試験における最終状態は、ひび割れの進展に伴い圧縮側のひびみが限界値に達することで決定されるため、母材コンクリートの圧縮特性に影響される。
- ③本研究で提案したひび割れ断面モデルから求められたひび割れ発生断面力・変形特性を骨組解析に応用することにより、ひび割れの発生・進展を考慮したSFRC覆工コンクリートの解析を行うことができる。

参考文献

- 朝倉俊宏、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.
- 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.
- Nanakorn, P., Horii, H. and Matsuoka, S. : A Fracture Mechanics-Based Design Method for SFRC Tunnel Linings, *J. Materials, Conc. Struct., Pavements*, No.532/V-30, pp.221-233, 1996.
- 松岡茂、松尾庄二、益田彰久、柳博文：鋼纖維補強コンクリートの引張特性試験法に関する研究。土木学会論文集、No.564/V-35, pp.145-153, 1997.5.
- 鬼頭誠、峯本守、梶原雄三、松岡茂：鋼纖維補強コンクリートの特性を考慮したトンネル覆工の設計。土木学会論文集、No.554/III-37, pp.81-88, 1996.12.
- 松岡茂、松尾庄二、益田彰久、柳博文：ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する研究。土木学会論文集、No.554/III-37, pp.147-155, 1996.12.
- 堀井秀之：フランチャーブ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.
- Riva, P. and Cohn, M. Z. : Rotation Capacity of Structural Concrete Members, *Magazine of Concrete Research*, No.168, pp.223-234, 1994.
- Nanakorn, P. : *Fracture Mechanics Based Design Method of SFRC Tunnel Lining*, Department of Civil Engineering The University of Tokyo, 1993.
- 松尾庄二、松岡茂、益田彰久、柳博文：SFRCの引張軟化曲線の推定法に関する一研究。コンクリート工学会年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.457-462, 1995.
- Koenig, G., Grimm, R. and Remmel, G. : Shear Behavior of Longitudinally Reinforced Concrete Members of HSC, *JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, pp.63-74, 1993.

(1997.6.9受付)

ANALYTICAL STUDY ON TUNNEL LINING OF STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE

Shigeru MATSUOKA, Akihisa MASUDA, Shoji MATSUO and Hirofumi YANAGI

The frame analysis is extensively used in the design of tunnel lining. In order to apply the frame analysis to steel-fiber-reinforced concrete (SFRC) lining with cracking and its growth, this paper proposes modeling and analytical procedures taking account of tension-softening relationship of SFRC. The proposed model and analytical scheme show the applicability of the frame analysis which could analyze cracking behaviors, by assuming rotating spring at nodes where a crack occurs. In addition, the effectiveness of proposed technique was verified by comparison with both results of bending tests and experiments by tunnel models.