

鋼繊維補強コンクリートトンネル覆工体の設計法試案

Mechanical properties and a design method for steel fiber reinforced concrete linings.

* ** *** **** *****
木村 定雄, 笹尾 春夫, 石田 智朗, 末永 充弘, 小泉 淳

Sadao KIMURA, Haruo SASAO, Tomoaki ISHIDA, Mitsuhiro SUENAGA, Atsushi KOIZUMI

The objective of this paper is to present a new limit state design method for a concrete tunnel lining reinforced by steel fiber under the condition acting both bending moment and compressive force at the cross section. The basic concept of this method is similar to that for a reinforced concrete. However, the current definition of limit state is not available for such a structure due to the difference of loading condition and material. Three limit states characterized by serviceability, strength considering toughness and the deformation around the failure respectively were defined. Note that these limit state doesn't specify the whole failure of the lining but the failure of the member. The opening width of crack is appropriate to specify each limit state. The value for each limit state is proposed based upon the results obtained by flexural loading test for the specimen.

Keyword : steel fiber reinforced concrete, tunnel lining, limit state design method

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート(SFRC)は無筋コンクリートの脆性を改善することにより, 曲げ, せん断, 引張に対する抵抗性能を向上させた複合材料である. このSFRCの特性をトンネル支保・覆工(覆工体)の設計に適切に利用すれば, トンネル周辺の地盤が比較的軟弱で覆工体に大きな耐力や剛性を期待したい場合, 内空の確保が困難で二次覆工等の厚さを減じたい場合, またはトンネル周辺の地山に大きな塑性変形が発生する場合等には無筋コンクリートと異なりSFRCの有する強度特性や高い靱性を有効に活用することができ, 合理的な覆工体の設計が可能となる. さらに, SFRCは鉄筋コンクリートと比べて鋼材腐食の進行も遅い¹⁾等の特徴もあわせもつため, これを覆工体の構造材料として用いれば, 完成後の覆工体の品質や長年にわたる耐久性の向上も期待できるものと考えられる.

しかしながら, 従来の覆工体の設計は構造材料の圧縮強度に主眼をおいた許容応力度設計法によってい

* 正会員 工修 佐藤工業(株) 中央技術研究所

** 正会員 鉄建建設(株) エンジニアリング本部

*** 正会員 工修 日本国土開発(株) エンジニアリング本部

**** 正会員 日本鉄道建設公団 設計室

***** 正会員 工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科

るため、無筋コンクリートと比べた耐力の向上または地山変形に対する追従特性等、SFRCの有する特性を有効に設計に反映することが困難であった。

本論文は覆工体としてのSFRCの有する構造材料特性を部材試験により評価する手法を検討するとともに、軸圧縮力と曲げモーメントとを受けるSFRC覆工体を対象に、SFRCのもつ優れた引張抵抗力および変形性能を効果的に評価できる新しい設計法についてその概念を述べたものである。なお、この設計法は基本的理念として限界状態設計法を採用している。

2. 支保・覆工（覆工体）の限界状態

トンネル覆工体の破壊は周辺地山の過大な土圧や変形、または偏土圧を受け、覆工体の一部に発生した微細なひびわれが、複数箇所の大ひびわれに進展することにより崩壊に至るものと考えられる。地中に於いて閉合された環状覆工体は地山が覆工体の変形を拘束することから、崩壊に至る極限耐力は地上におけるそれと比べ、はるかに大きいと考えられる。すなわち、地中の覆工体に作用する断面力は軸圧縮力と曲げモーメントとが組合わされ曲げにともなう変形が生じるが、この変形を拘束する地山の抵抗土圧により覆工体は軸圧縮応力状態に近づくため、覆工体が耐え得る曲げモーメントは見かけ上大きくなる。一方、山岳トンネル工法等において覆工体の環状構造が形成されていない構築段階では、支保工先端部の拘束条件にもよるが一般的には覆工体の変形を拘束する効果を地山に期待することはできない。このような場合、覆工体には地山の変形に追従し、かつ地山変形をある程度抑制できるような変形性能が求められる。

覆工体の崩壊に至る極限状態を見極めるためには、それに作用する外荷重または強制変位等を明確にすることが重要となるが、覆工体に作用する荷重は地山状況、施工法等により多種多様に異なり、これを統一的に評価することは現在のところ困難である。したがって、覆工体のどの位置に、どの程度のひびわれが生じれば覆工体が崩壊に至るのかを定めるのは現状では難しいと言わざるを得ない。

以上のことから、本設計法ではSFRC覆工体の限界状態はSFRC部材の部材としての限界状態と同一であるとして評価した。すなわち、覆工体の任意の位置(1箇所)に発生する曲げひびわれの程度を基にSFRC覆工体の限界状態を定義したものである。

表－1 試験ケースと供試体数

試験ケース		1		2		3		4	
SF混入率(%)		0		0.5		1.0		1.5	
試験種類		曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮
供試体数	打込SFRC	4	4	4	4	4	4	4	4
	吹付SFRC	6	6×2	6	6×2	6	6×2	6	6×2

注) 吹付SFRCの圧縮試験は吹付面に垂直な方向(吹付け1)、吹付面に平行な方向(吹付け2)の2方向について試験している。

3. SFRC覆工体の部材試験

3.1 部材試験の概要

SFRC覆工体の部材試験は、SFRCが有する部材耐力や高い靱性等の構造材料特性を評価するものである。ここでは、SFRC覆工体の部材試験として基本的な材料強度を把握するための圧縮試験および曲げに対する抵抗力や靱性を評価するための曲げ試験を考えている。また、SFRC覆工体の構造材料特性は、覆工体を構築する方法によって大きく異なることが想定される。すなわち、ポンプ等により打設されるSFRCと吹付けによって構築されるSFRCとはその構造材料特性が異なると考えられる。

そこで、本試験では大別して型枠に打設して作成したSFRC（打込SFRC）および吹付けによって作成したSFRC（吹付SFRC）の供試体を用いて部材試験を実施した。試験ケースおよび供試体数は表-1に示すとおりである。試験ケースは打込SFRCと吹付SFRCの構造材料特性とを比較するとともに、鋼繊維混入量の影響についても把握することを目的として選定した。また、SFRCの基本配合は表-2に示す吹付SFRCの一般的な配合

表－2 基本配合

SF混入率(%)	W/C(%)	C	W	S	G	混和剤 (靱性増進剤) (消泡剤)
0.0.5.1.0.1.5	55	390	215	1293	337	適宜

(単位: kg/m³)

とした。なお、試験に用いた鋼繊維（SF）は長さ25mmのインデント型とした。試験に用いた供試体は、山岳トンネルを施工中の現場において、工事用のパッチャープラントを用いて各試験ケースごとに別々のパッチでSFRCを混練し、アジテータカーで坑内に搬入した後、切羽付近で供試体作成用型枠への打込みおよび供試体採取箱への吹付けを同時に行い作成した。供試体の養生は坑内において現場雰囲気温度（5℃程度）で3週間行った。また、吹付供試体は現場養生の後、コアリングおよびワイヤーソーによるカッティングにより圧縮試験用供試体および曲げ試験用供試体を成形した。なお、圧縮試験および曲げ試験の材令は28日とした。

(1) 圧縮試験方法

圧縮試験用供試体の形状寸法は直径 100mm、高さ 200mmの円柱である。吹付SFRCの供試体はSFの配向性状が圧縮強度へ及ぼす影響の程度を確認するため、吹付面に対して直角（吹付け 1）および吹付面と平行（吹付け 2）の 2 方向についてコアリングしている。なお、圧縮試験方法は JIS A 1108 に準拠した。

(2) 曲げ試験方法

曲げ試験用供試体の形状寸法は150×150×530mmの角柱供試体である。曲げ試験方法は『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（JSCE-1983）』に準拠し図-1に示す 2 点载荷とした。SFRCの靱性を詳細に確認するために、はり部材の中央点および载荷点の鉛直方向変位量測定他に、図-1中に示すパイゲージおよびひずみゲージによりひびわれ幅および純曲げ区間の圧縮縁ひずみについても測定している。ひびわれ幅の測定はひびわれ幅と载荷点間の水平方向変位量とがほぼ一致する²⁾ことから、载荷点間を標点とした水平方向変位量の測定とした。また、図-1に示すように供試体側面の上下 2 段に設置したパイゲージによりひびわれ幅を測定することで、ひびわれ深さも確認できるようにした。载荷はひびわれ発生後の破壊進展に追従した各種測定を可能とするため、図-2に示す変位制御としている。また、SFRCの最終的な変形追従特性を確認するために供試体が破断する寸前まで変位制御を行い、鉛直方向変位量、ひびわれ幅およびひずみを測定した。

3.2 部材試験結果

(1) 鋼繊維の配向と混入状況

まず、X線撮影によりSFの配向性を定性的に確認した。写真-1～写真-4はSF混入率1.0%の例を示したものである。X線撮影は曲げ試験用供試体の試験後の折片から切り出した薄片（厚さ

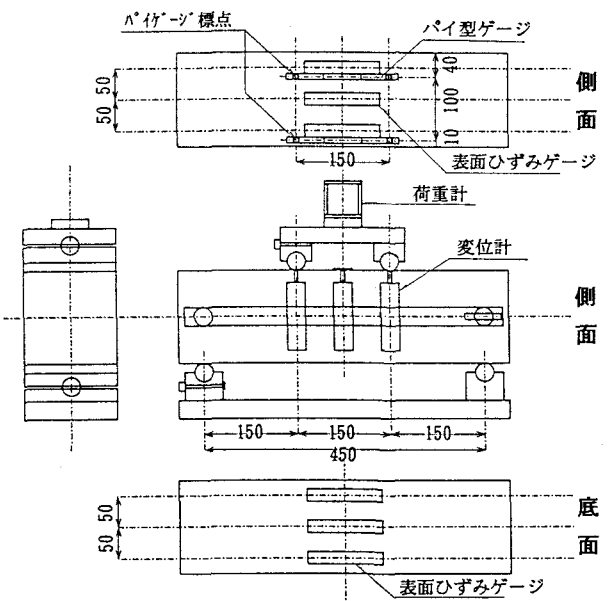


図-1 曲げ試験の概要

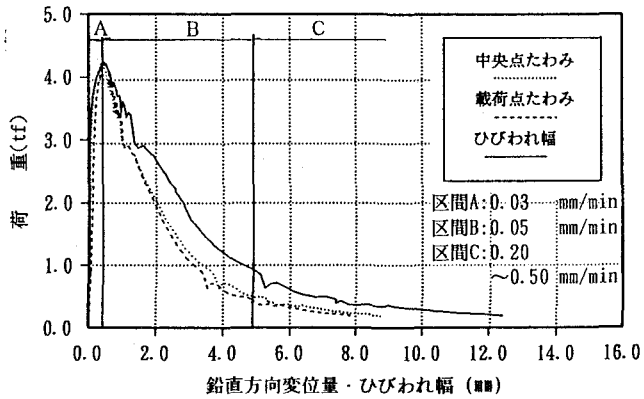


図-2 曲げ载荷時の変位制御

10mm)を用いて行った。図-3は薄片の切り出し方向を示したものである。これらの写真を見ると、SFは打込み方向または吹付け方向に直交する方向に主に配向するようである。このことは覆工体に発生する曲げモーメントの方向を考えると、SFの効果が有効に働く方向に配向していることになる。

次に、曲げ強度や曲げ靱性係数に直接的に影響すると考えられるSFの本数を破断面と非破断面について測定した。表-3がその結果である。曲げ試験において破断面を横断するSF本数は非破断面の6割程度となっている。また、吹付SFRCと打込SFRCとのSF本数比は破断面および非破断面ともに約6割となっている。なお、SF本数はすべての曲げ供試体について測定しており、各々の試験ケースにおけるSF本数の変動係数はSF混入率が1.5%の吹付SFRCの破断面だけが18%と若干変動が見られたものの、その他は4～9%であった。

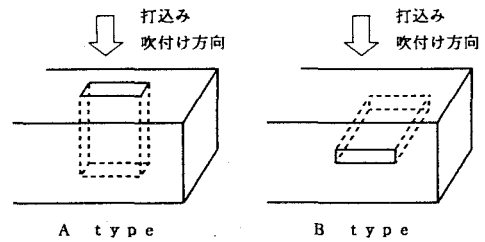


図-3 X線撮影用薄片の切り出し

(2)圧縮試験結果

SF混入率と圧縮強度との関係を図-4に示す。SF混入率が1.0%の場合に若干高いものの、SF混入率にかかわらず打込SFRCの強度はほぼ同じとみなせる。また、吹付SFRCの強度もSF混入率とあまり関係がないようである。一方、吹付2の強度は吹付1のそれより若干低くなる傾向にある。これはSFの配向性などの影響であると考えられる。供試体作成方法の違いによる強度への影響を見ると吹付SFRCの強度は打込SFRCの5～7割程度となっている。

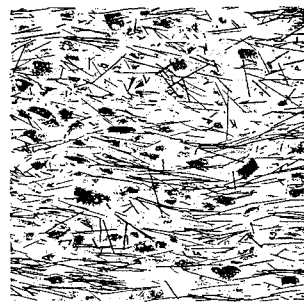


写真-1 SFの配向状況
(打込SFRC, A type, SF1.0%)

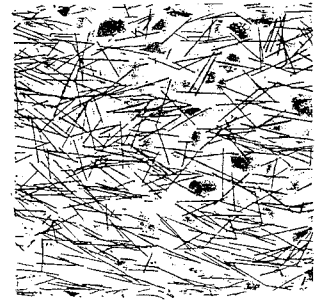


写真-2 SFの配向状況
(打込SFRC, B type, SF1.0%)

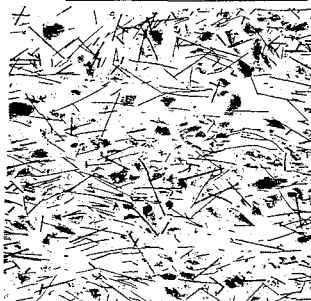


写真-3 SFの配向状況
(吹付SFRC, A type, SF1.0%)

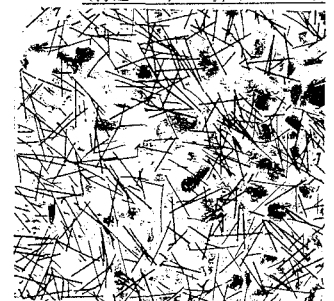


写真-4 SFの配向状況
(吹付SFRC, B type, SF1.0%)

(3)曲げ試験結果

SF混入率と曲げ強度との関係を図-5に示す。打込SFRCの強度はSF混入率の増大にともなって著しく高くなり、SF混入率1.5%の強度は無筋に対して2倍以上となっている。また、吹付SFRCの強度は打込SFRCと比較してSF混入率の増大にともなう強度増進の割合が小さい。図-6はSF混入率と曲げ靱性係数との関係を示したものである。打込SFRCおよび吹付SFRCともにSF混入率が大きくなると靱性係数が増大することがわかる。このことは供試体の作成方法によらず、SFRCは最大荷重に達した後も主としてSFとコンクリートとの付着によりある程度の引張抵抗力を保持で

表-3 SF本数測定結果

SF混入率(%)	0.5		1.0		1.5		平均	
	打	吹	打	吹	打	吹	打	吹
破断面のSF本数(F)	157	98	317	176	366	277	—	—
非破断面のSF本数(H)	289	183	490	294	619	430	—	—
(F)/(H)	0.54	0.54	0.65	0.60	0.59	0.64	0.59	0.59
数(F)/数(F)	0.62		0.56		0.76		0.65	
数(H)/数(H)	0.63		0.60		0.69		0.64	

注) SF本数は各々の試験ケースの平均値

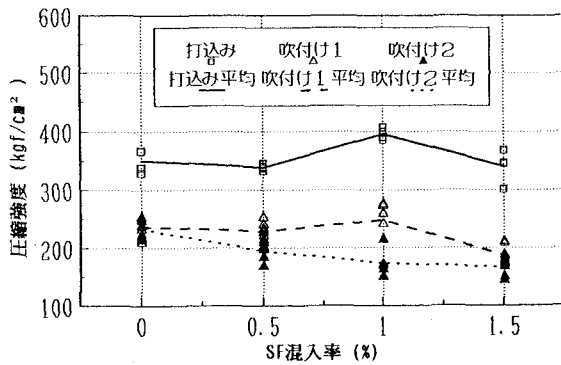


図-4 SF混入率と圧縮強度

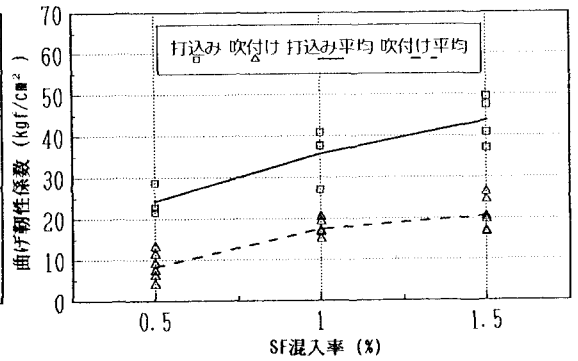


図-6 SF混入率と曲げ靱性係数

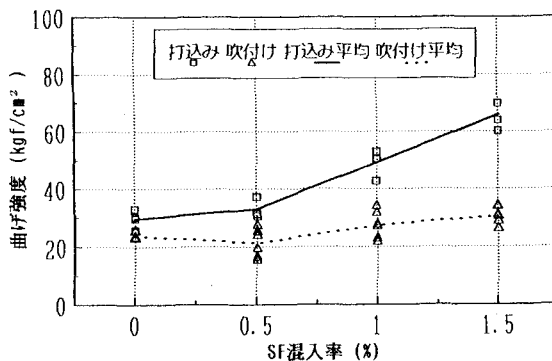


図-5 SF混入率と曲げ強度

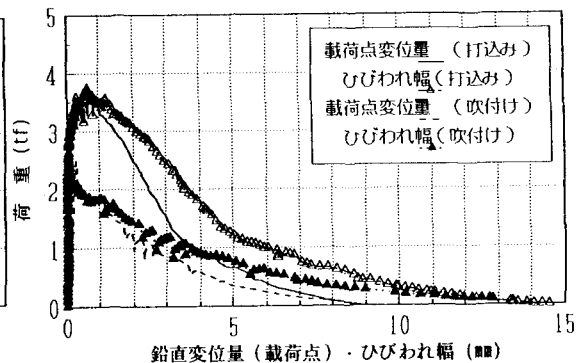


図-7 荷重と荷重点の鉛直方向変位量、ひびわれ幅

きること意味している。これを説明する測定結果が図-7である。SFRCは無筋に比較して当然高い靱性を有するが、ひびわれ幅が引張縁で10mm（鉛直方向変位量5mm程度）を越えても供試体は破断していない。曲げ破壊の進行にともなうひびわれ進展の状況を打込SFRCおよび

表-4 曲げ破壊の進行に伴うひびわれ深度

試験ケース	最大荷重手前（ひびわれ幅1.2mmと同荷重時）			最大荷重時			ひびわれ幅1.2mm時		
	荷重 tf	ひびわれ幅mm	ひびわれ深さ	荷重 tf	ひびわれ幅mm	ひびわれ深さ	荷重 tf	ひびわれ幅mm	ひびわれ深さ
打込 0.5%-1	2.52	0.05	0.60	2.75	0.94	0.86	2.52	1.2	0.88
打込 0.5%-2	1.68	0.02	0.62	2.23	0.14	0.76	1.68	1.2	1.00
打込 1.0%-1	2.72	0.07	0.69	3.67	0.36	0.85	2.72	1.2	1.00
打込 1.0%-2	3.26	0.17	0.73	3.69	0.41	0.80	3.26	1.2	0.90
打込 1.5%-1	3.40	0.09	0.64	4.24	0.44	0.73	3.40	1.2	0.87
打込 1.5%-2	3.89	0.10	0.63	5.11	0.48	0.78	3.89	1.2	0.87
打込SFRC平均	—	—	0.65	—	—	0.80	—	—	0.92
吹付 0.5%-1	0.33	0.01	0.59	1.11	0.10	0.72	0.33	1.2	0.82
吹付 0.5%-2	1.00	0.01	0.63	1.81	0.04	0.63	1.00	1.2	0.93
吹付 1.0%-1	1.68	0.02	0.54	2.49	0.05	0.60	1.68	1.2	0.87
吹付 1.0%-2	1.25	0.02	0.62	1.70	0.11	0.70	1.25	1.2	0.96
吹付 1.5%-1	2.51	0.04	0.58	2.81	0.06	0.62	2.51	1.2	0.86
吹付SFRC平均	—	—	0.59	—	—	0.65	—	—	0.89

注）表中の試験結果は代表的な結果である。

ひ吹付SFRCの各々についてまとめたのが表-4である。打込SFRCおよび吹付SFRCの曲げ最大荷重時におけるひびわれ深度（ひびわれ深さ／部材高さ）は各々 0.8および0.65程度であり、引張縁におけるひびわれ幅

が 1.2mm 程度であれば最大荷重前のひびわれ深度が 0.65 および 0.59 の荷重時と同等の曲げに対する抵抗力を有していることがわかる。また図-8 は鉛直方向変位量とひびわれ幅との関係を示したものである。載荷点における鉛直方向変位量とひびわれ幅とは強い相関を示している。これは、曲げによる SFRC の弾性変形量が破断部の影響による変形量と比較して非常に小さいことを意味している。したがって、SFRC の曲げ試験において直接ひびわれ幅を測定する代わりに鉛直方向変位量を測定すれば、ひびわれ幅を推定できることがわかる。

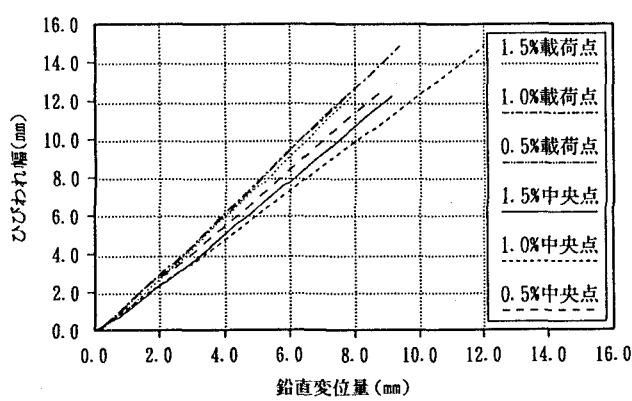


図-8 鉛直方向変位量とひびわれ幅

4. SFRC 覆工体の設計法試案

SFRC 覆工体の限界状態の種類として図-9 に示す SFRC 部材の曲げ試験から得られる荷重とひびわれ幅との関係から定義づけた I, II, III の 3 種類を考えた。表-5 はこれらの限界状態の原則的な適用を覆工体の構築方法および構築部位から分類される構造種別ごとに示したものである。

限界状態 I は対象となる覆工体の長期にわたる耐久性を確保する観点から定めた限界状態であり、覆工厚に関係なくひびわれ幅 0.25mm を限界ひびわれ幅として定めたものである。

限界状態 II は SFRC 部材の有する引張抵抗力を曲げ試験から求めて部材耐力を確保すると同時に、無筋コンクリートと異なりひびわれ発生後も変形に耐え得る SFRC の変形特性を評価する観点から定めた限界状態である²⁾。すなわち、図-9 中の A 点における応力状態 (図-10) で耐力を定めるとともに図-9 中の B 点におけるひびわれ幅で変形に対する限界値を定めている。図-10 に示す中立軸の位置は曲げ試験から得られたひびわれ深度から決定した。すなわち、純曲げ状態における最大荷重時におけるひびわれ深度は

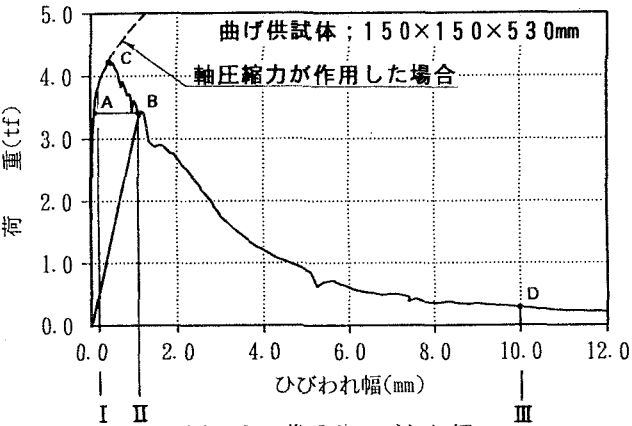


図-9 荷重とひびわれ幅

0.8 まで達することから設計に用いる応力分布はひびわれ深度が 0.7 の状態とした。このことは SFRC 部材の引張特性を剛性一様と考え、その荷重-変形特性を荷重が零から B 点までの線形として評価することを意味する。限界状態 II における引張抵抗力 (f_t) は断面の平面保持を仮定し、圧縮縁の限界ひずみを

表-5 SFRC 覆工体の構造種別と限界状態

構築方法	構築部位または種類	構造種別		
		非構造部材	構造部材の一部	構造部材
打込 SFRC	一次覆工 *1	III	II	I
	二次覆工	I	I	I
吹付 SFRC	一次覆工 *2	III	II	I
	二次覆工	I	I	I
プレキャスト SFRC	覆工板、化粧板 その他	I	I	I

*1 原則として ECL を想定

*2 原則として支保を想定

$$M = \int_0^h \sigma x \cdot x \, dx \quad \dots\dots (1)$$

$$N = \int_0^h \sigma x \, dx \quad \dots\dots (2)$$

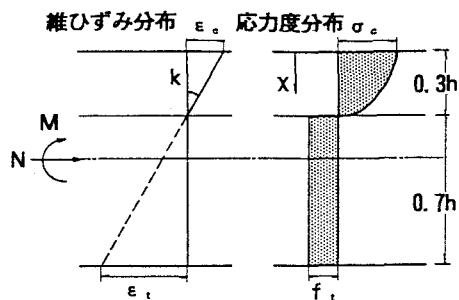


図-10 限界状態Ⅱにおけるひずみ、応力度分布

3500 μ として、曲げ試験から得られる曲げ荷重を式(1)および式(2)に代入することにより求められる。また、式(1)および式(2)に得られた f_t を代入することにより軸圧縮力と曲げモーメントの性能曲線が導かれ、耐力の評価が可能となる。なお、この時の部材回転角 k を限界状態Ⅱにおける限界部材回転角 ϕ_{II} とすれば、部材厚が150mmと異なる場合のB点は部材厚比から計算することが可能である。このように、純曲げ試験から引張抵抗力を評価することは、実際のSFRC覆工体には軸圧縮力が作用することを考えると、設計上安全側の限界値を設定していることになる。

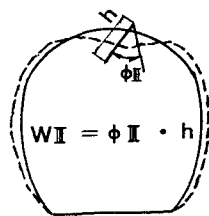


図-11 部材回転角とひびわれ幅

限界状態Ⅲは覆工体に耐力を期待せずに地山の大変形に追従するといったSFRC部材の変形特性を評価する観点から定めた限界状態であり、150mmの覆工厚において限界ひびわれ幅を10mm(D点)と定めたものである。また、この状態におけるひびわれ深さはほぼ部材厚に相当(ひびわれ深度1.0)するため、部材厚150mmの場合のひびわれ幅10mmに対応する部材回転角を限界状態Ⅲにおける限界部材回転角 ϕ_{III} とすれば、部材厚が異なる場合においても限界部材回転角 ϕ_{III} に部材厚を乗じることにより限界ひびわれ幅の目安は計算できるものとする。図-11はその概念を示したものである。Ⅲの限界状態は曲げに対する抵抗力がほとんどないため、断面の最終的な破断に対しては用いるSFの形状寸法の影響が大きいと考えられる。したがって、150mmを越える部材厚に対してその限界ひびわれ幅を定める場合にはこのことを十分に考慮する必要がある。

5. 結 論

打込SFRCおよび吹付SFRCの構造材料特性を評価するための部材試験およびその結果を用いた覆工体の設計法の概念について検討した結果、以下の結論を得た。

- ①トンネル覆工体の構造材料として用いる打込SFRCおよび吹付SFRCは、ともにSFを1%程度混入すれば無筋コンクリートの曲げ強度および曲げ靱性を大幅に改善できる。
- ②長さ25mmのSFを用いたSFRC部材(150×150×530mm)の曲げ試験において、引張縁のひびわれ幅が10mmとなると耐荷力はほとんどなくなるが、部材は破断せず変形追従性能は十分に確保できる。
- ③打込SFRCと吹付SFRCとの圧縮強度比は0.5～0.7であり、曲げ強度比は0.5～0.8であった。
- ④軸圧縮力と曲げモーメントとを受けるSFRC覆工体の限界状態を部材の限界状態として位置づけ、曲げによるひびわれ幅で限界状態を定義づけることにより、SFRCの有する構造材料特性を生かした覆工体の設計が可能となる。

5. おわりに

本論文は各種の部材試験を行い、その挙動に考察を加えるとともに、これらの結果に基づいて限界状態を定義することにより、SFRC覆工体の設計概念を提案した。今後、曲げ試験に用いる部材寸法と実際の覆工厚とが異なる場合において、SFの受持つ引張抵抗力に対する覆工厚の寸法効果およびSFの形状寸法が引張抵抗力に与える影響等を適切に評価する方法について検討を加えてゆくつもりである。なお、本報告は（社）鋼材倶楽部SFRC構造設計施工研究会の研究成果の一部であることを付記する。

【参考文献】

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート，オーム社，昭和56年，pp.101～104
- 2) 鬼頭，坂井，末永，梶原：直打ちコンクリートライニングの耐力算定方法，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第2巻，1992.10，pp.11～18