

Ⅲ-5 トンネル覆工の設計合理化に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 12～平 16

担当チーム：基礎道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、砂金伸治、遠藤拓雄

【要旨】

山岳トンネルの覆工コンクリートの設計は実績や経験に基づき行われているが、覆工の安全性・耐久性を向上させるためには、覆工に要求される機能を明らかにし、力学的理論に基づいた合理的な設計法を確立することが必要である。本研究では、室内要素実験および実トンネルで実施した試験施工から、鋼繊維補強コンクリート（SFRC）が、温度・乾燥収縮に起因してトンネル覆工に発生するひび割れの抑制に及ぼす効果を明らかにした。また、実大規模の覆工載荷実験を行い、SFRCが覆工の耐荷力に及ぼす効果を明らかにした。さらに、ひび割れ進展を考慮した有限要素法の覆工設計法への適用性を覆工載荷実験結果を用いて検証するとともに、トンネル掘削時に発生した変位から覆工設計に用いる荷重値を算出する方法の検討を行い、ひび割れ進展を考慮した有限要素法による覆工設計法を提案した。

キーワード：覆工，載荷実験，鋼繊維補強コンクリート（SFRC），FEM 解析

1. はじめに

現在のトンネル覆工には供用性に関する機能，施工時または施工後の不確定な要素に対する機能，また外力支持などに挙げられる力学的な耐荷機能といった多岐に渡る機能が求められている。近年は覆工の剥離・剥落といった問題も発生しており，それらに対応するためには覆工の力学的な特性を明らかにすると同時に，高強度化を図ることや繊維等で補強されたコンクリートを用いた覆工を導入することで，耐久性の向上を図った一層合理的な覆工構造の提案を行う必要がある。

本研究では，まず，温度・乾燥収縮に起因するひび割れの抑制方策に関して，プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリート（SFRC）を対象に，室内実験および実トンネルでの試験施工を実施した。次に，覆工の力学的な特性，SFRCが覆工の耐荷力に及ぼす影響を把握するため，実大規模の覆工供試体を用いた載荷実験を実施した。また，その実験結果に基づき，力学的理論に基づいた覆工設計法の確立を目的として，ひび割れの進展を考慮した有限要素解析を用いて，部材断面耐力によって決定する耐荷力と構造物全体が有する耐荷力との関連性を明らかにするとともに，覆工設計に用いる荷重の算定方法の検討を行い，覆工設計法の提案を行った。

2. 温度・乾燥収縮に起因するひび割れに対する

SFRCの抑制効果

2. 1 ひび割れ抑制効果に関する室内要素実験

2. 1. 1 実験概要

乾燥収縮により発生するひび割れのメカニズムを把握するため，トンネル覆工に採用されているコンクリートを使用した供試体を用い，室内要素実験を実施した。実験は乾燥収縮の特性を把握するための型枠（拘束供試体）にコンクリートを打設し，恒温恒湿室にて一定温度（20度）と湿度（40%）に保ち，供試体に発生するひずみを測定した。計測では，ひずみに加えて，ひび割れ発生までの材齢を目視観察により記録した。

図-1に実験に用いた拘束供試体を示す。コンクリート中央部には凹部があり，両端が拘束されることに伴い，凹部ではコンクリートの収縮によりひび割れが発生しやすくなっている。コンクリート供試体には凹部中央と両端，および型枠の2箇所合計5箇所にひずみゲージを貼付した。

室内要素実験で用いた実験で用いた供試体の2種類の配合を表-1に示す。配合Aは既存のトンネル覆工コンクリートのうち，プレーンコンクリートを用いる場合に採用される配合で，配合Bは鋼繊維長が60mm，混入率が0.5%である場合に採用されることが多い配合を参考としつつ，実験での比較のために

水セメント比を配合 A と同一としたものである。実験に用いた供試体は、配合 A を用いたプレーンコンクリート、配合 B を用いたプレーンコンクリート、鋼繊維長が 60mm の場合で混入率が 0.3%・0.5%・1.0%、および鋼繊維長が 30mm の場合で混入率が 0.3%・0.5%の合計 7 種類の供試体である。

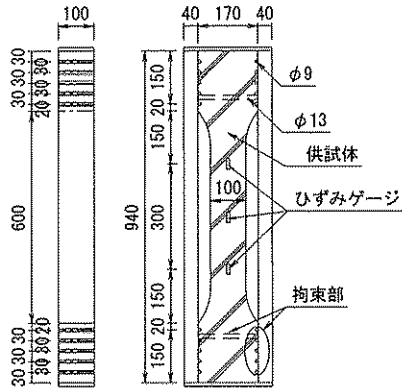


図-1 拘束供試体の概要

表-1 室内要素実験のコンクリート配合

配合名	A	B
設計基準強度	18	18
呼び強度	25.5	25.5
スランプ (cm) (プレーンコンクリートでの状態)	12	15
空気量 (%)	4.5	4.5
粗骨材の最大寸法 G_{max} (mm)	20	20
水セメント比 (%)	55	55
単位水量 (kg/m^3)	161	169
セメント (kg/m^3)	293	308
混和剤 (AE 減水剤) (kg/m^3)	3.14	3.30

2. 1. 2 実験結果と考察

図-2 にひび割れが発生した時点でのコンクリートの材齢の平均日をまとめたものを示す。なお、ひび割れは全ケース、供試体中央部付近に供試体輪切り方向に発生した。プレーンコンクリートとして配合(A)とベースコンクリートである配合(B)を比較すると、配合(A)の方がひび割れ発生材齢が平均して高い、すなわち配合(B)よりもひび割れの発生が遅いことが分かる。また、同一の配合であるベースコンクリートである配合(B)と鋼繊維補強の各ケースを大まかに比較すると、鋼繊維を混入したケースの方が概してひび割れ発生材齢が高くなっていることが分かる。これより、鋼繊維にはひび割れの発生を遅延させる効果は認められると考えられる。ただし、ひび割れの発生を完全に抑止する効果を室内実験から議論できないことに注意を要し、どの程度の遅延させる効果や抑止する効果があるかについては実際の規模での検証が必要である。

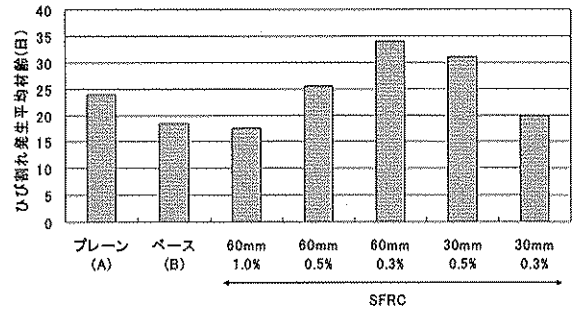


図-2 配合毎のひび割れが発生材齢の平均日

また、鋼繊維補強コンクリートどうしについて比較すると、繊維長が 60mm の場合は混入率の小さい方がひび割れ発生材齢が高く、また繊維長が 30mm の場合は混入率の大きい方がひび割れ発生材齢が高いことから、ひび割れの発生材齢に対しては、繊維長や混入率により顕著な差が現れているとは言い難い。

図-3 に拘束供試体に発生する配合毎の収縮に伴うひずみの平均の収束値を示す。全体的な傾向として、鋼繊維を混入することにより、ひずみの平均の収束値が低下する結果が得られた。さらに、繊維長が 60mm で混入率が 1.0% のケースを除けば、繊維長が長い 60mm の方が発生しているひずみは若干小さい傾向がある。また、繊維の混入率についても、混入率が高い方が発生しているひずみは若干小さい傾向があった。このことから、ひび割れ発生後においては、鋼繊維がひび割れの進展を抑制することにより供試体全体のひずみの増加が抑制されていることが推測される。

今回の室内実験結果より、SFRC を採用した場合の効果として、ひび割れ発生の遅延効果が認められたとともに、ひび割れ発生後は、ひび割れの進展を抑制する効果が期待できるものと考えられる。

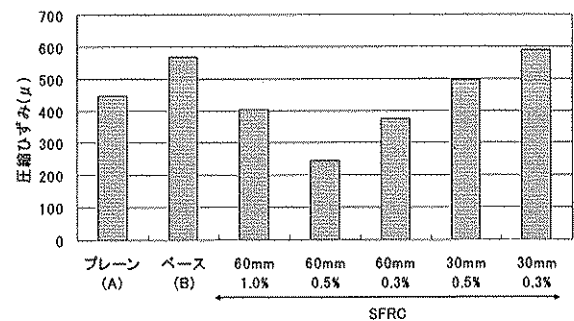


図-3 配合毎の収縮に伴うひずみの収束値の平均

2. 2 鋼繊維補強コンクリートを用いた

トンネル覆工の現地試験施工

2. 2. 1 試験施工の概要

前節における室内要素実験では、コンクリート打設規模や打設状況、周辺環境条件、境界条件が実際のトンネル覆工とは同一でないため、鋼繊維補強コンクリートの効果を確認することを目的として、実トンネルにおける試験施工を実施した。試験施工では、覆工にプレーンコンクリートを打設した区間とSFRCを打設した区間のひび割れ状況を比較した。

試験施工はAトンネルとBトンネルの2つで実施された。Aトンネルは延長約1.5kmであり、試験施工区間での支保パターンはDIパターンであった。試験施工は坑口側から59.5mからの位置で鋼繊維補強コンクリート覆工を2スパン(延長20m)、比較のために、その区間に隣接したプレーンコンクリートを用いた1スパン(延長10m)において計測および観察を行った。また、Bトンネルは延長約2kmであり、試験施工は、坑口付近のDIIIaパターン、および坑口から600m付近のDIパターンの2箇所で行われた。試験施工では、試験区間前後の一般部での材料(坑口付近では単鉄筋で補強されたコンクリート、坑口から600m付近ではプレーンコンクリート)で鋼繊維補強コンクリートとし、その前後の区間と試験施工区間のひび割れの発生状況を観察した。

2. 2. 2 試験施工の結果

図-4にAトンネルにおけるひび割れのスケッチ図を示す。これより覆工にSFRCを用いた区間のほうがプレーンコンクリートを用いた区間よりも先にひび割れが発生したが、打設後15ヶ月のひび割れ幅を見ると、プレーンコンクリートを用いた覆工のひび割れ幅は0.5mm程度であったのに対し、SFRCを用いた覆工は大半が0.2mm程度以下となっていた。これより、プレーンコンクリートと比較してSFRCを覆工に使用した場合は、ひび割れはより若材令で発生するが、その後のひび割れ幅の進展は小さい傾向にあることが分かった。また、打設後20ヶ月後では、全体的にひび割れ幅の拡大が見られたが、プレーンコンクリート部でのひび割れ幅の拡大が著しいのに対し、SFRC部では局所的なひび割れ幅の拡大にとどまり、新たなひび割れの進展は見受けられなかった。

また、図-5(a)および(b)にBトンネルにおけるひび割れのスケッチ図を示す。坑口付近のDIIIaパタ

ーンではプレーンコンクリートを用いた区間で幅が1.0mmを越えるひび割れが発生したのに対し、SFRCを用いた試験施工部ではひび割れの発生がなかった。また、坑口から600m付近では、プレーンコンクリートを用いた一般部が幅0.1mm程度のクラックや亀甲状のヘアクラックが発生したのに対し、SFRCを用いた試験施工区間は、天端部近くのヘアクラックのみであった。

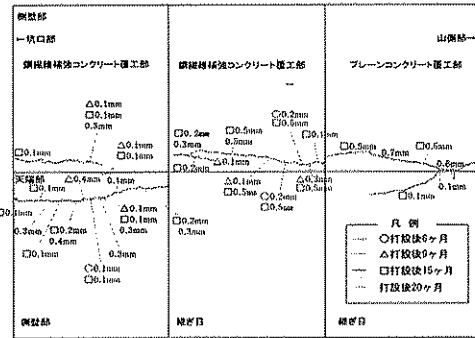
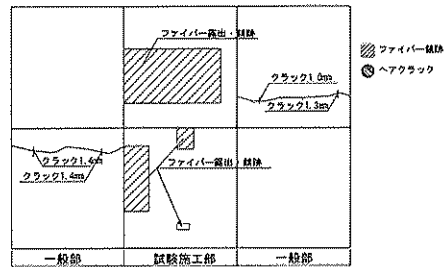
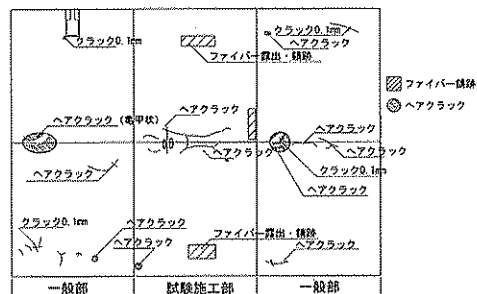


図-4 Aトンネルの覆工でのひび割れの発生状況



(a)DIIIa部(坑口付近)



(b)DI部(坑口から600m付近)

図-5 Bトンネルの覆工でのひび割れの発生状況

以上の結果より、SFRCを用いることにより、ひび割れ発生後のひび割れの進展が抑制され、場合によっては発生自体も抑制されることが分かる。

3. 覆工材料が覆工の耐荷力に及ぼす効果

3. 1 実大覆工載荷実験の概要

覆工材料が覆工の耐荷力に及ぼす効果を明らかに

することを目的として、実大規模の覆工载荷実験を実施した。

実験では、覆工を模擬した外径9.7m、厚さ30cmの半円形の供試体を用いた。実験で採用した2つの载荷形式を図-6に示す。载荷形式Aは、地山に十分拘束された状態で覆工に緩み荷重等が作用すると想定した場合である。载荷形式Bは覆工の天端背面付近および肩部背面に空洞が生じている状態で覆工上部に何らかの荷重が作用し、肩部で曲げモーメントが卓越すると想定した場合である。

表-2に実験ケースを示す。なお、ケースA-3およびケースB-3ではプレーンコンクリートを単鉄筋(主筋SD345(D19)@20cm、覆工内側からの芯かぶり7cm、配力筋SD295a(D16)@30cm)で補強した。

供試体に対しては、各種試験を実施し、表-3のように物性値を把握した。

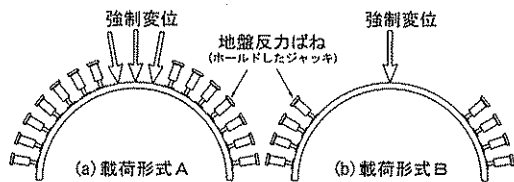


図-6 実験における载荷形式

表-2 実験ケース一覧

载荷形式	ケース名	掘工材料	繊維長、混入率
A	A-1	プレーン	
	A-2	SFRC	60mm, 0.5%
	A-3	単鉄筋補強	
	A-4	SFRC	30mm, 0.3%
B	B-1	プレーン	
	B-2	SFRC	60mm, 0.5%
	B-3	単鉄筋補強	
	B-4	SFRC	30mm, 0.3%
	B-5	樹脂繊維補強	50mm, 0.5%

表-3 供試体物性値

ケース番号	管理供試体-軸圧縮試験				曲げ試験			供試体			
	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢	曲げ強度	曲げ変位	材齢	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比	材齢
	N/mm ²	kN/mm ²		日	N/mm ²	N/mm ²	日	N/mm ²	kN/mm ²		日
A-1	30.27	23.47	0.18	15	-	-	-	20.21	-	-	16
A-2	24.10	15.83	0.05	15	5.36	3.27	15	19.97	14.77	0.08	18
A-3	23.62	19.33	0.17	18	-	-	-	18.01	-	-	19
A-4	19.90	18.22	0.17	14	-	-	-	13.34	16.42	0.19	15
B-1	26.89	21.57	0.22	13	-	-	-	25.70	-	-	14
B-2	19.70	19.60	0.11	14	5.40	8.86	16	21.90	-	-	14
B-3	29.11	19.92	0.20	14	-	-	-	17.68	-	-	14
B-4	19.26	17.01	0.16	28	-	-	-	19.07	-	-	18
B-5	28.33	20.50	-	14	5.29	4.55	28	20.54	18.87	-	21

3. 2 実大载荷実験の結果と

SFRCの耐荷力向上効果

実大载荷実験で得られた荷重-変位曲線を図-7, 8, 9に示す。これによると、図-7に示すように载荷形式Aでは、SFRCおよび単鉄筋の最大荷重に与える影響は小さいことが分かる。一方、载荷形式Bでは図-6に示すように補強材料によって最大荷重が異なり、単鉄筋、鋼繊維補強の効果がよく現れている。

また、図-8と図-9を比較すれば、繊維補強であっても混入度合いが小さい鋼繊維補強、樹脂繊維補強は、混入度合いが大きい鋼繊維補強より最大荷重が小さいことが分かる。

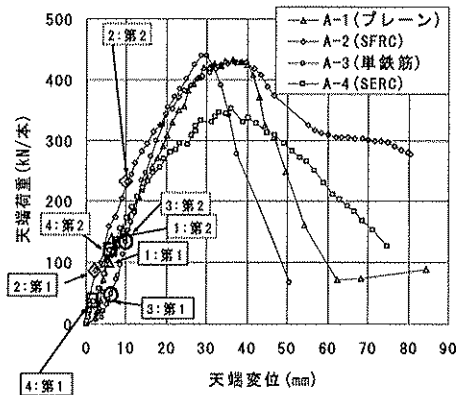


図-7 载荷形式Aの荷重-変位曲線とひび割れ

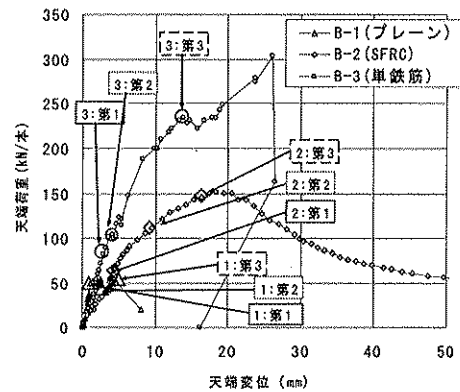


図-8 载荷形式Bの荷重-変位曲線とひび割れ(1)

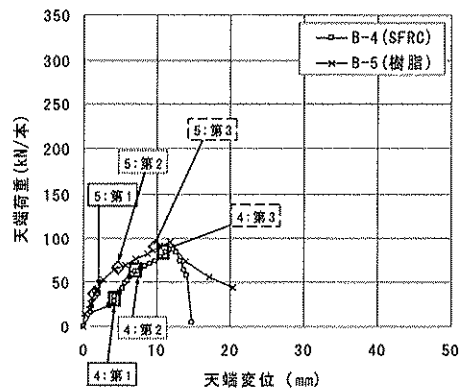


図-9 载荷形式Bの荷重-変位曲線とひび割れ(2)

さらに、図-7, 8, 9にひび割れが発生した荷重を示した。なお、第1ひび割れは天端部に、第2ひび割れは肩部に、第3ひび割れは側部に発生した。図-7, 8, 9によると、载荷形式Aでは、それぞれ第2ひび割れまで発生しているものの、最大荷重に比べてひび割れ発生荷重は小さい。一方、载荷形式Bについては、第3ひび割れまで発生しており、単鉄筋

のケースを除いて、第3ひび割れ発生荷重と最大荷重はほぼ等しい。

トンネル覆工に対する既往の設計では、部材断面耐力を、圧縮側については終局圧縮ひずみ 3500 μ 以下、引張側についてはひび割れが断面高さに対して一定の割合の限界ひび割れ深さ以下となることとしており、限界ひび割れ深さは、プレーンコンクリートおよび単鉄筋補強覆工の場合、断面高さの50%、SFRC覆工の場合、断面高さの70%とする場合が多い。

そこで、実験結果として、断面耐力決定要因となる限界ひび割れ深さに到達荷重、終局圧縮ひずみ 3500 μ 到達荷重、さらには、構造全体の耐力となる最大荷重について整理したものを図-10 および図-11に示す。

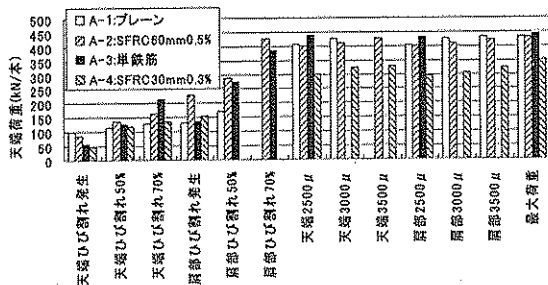


図-10 荷形式Aの耐力

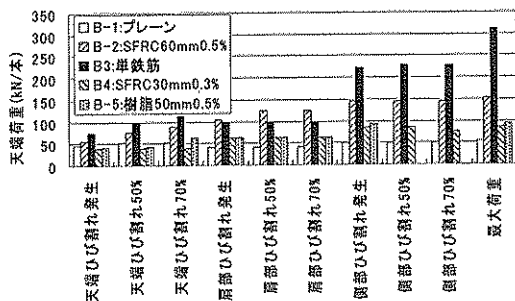


図-11 荷形式Bの耐力

これによると、SFRCが覆工の耐力に及ぼす効果としては、軸力が卓越する荷形式Aに対しては、最大荷重、すなわち構造全体の耐力に対するSFRCおよび単鉄筋の向上効果はさほど認められないものの、限界ひび割れ深さに達する時の荷重、すなわち限界ひび割れ深さに対する部材断面耐力によって決定される耐力に対しては、SFRCおよび単鉄筋の向上効果が十分認められる。一方、曲げが卓越する荷形式Bでは、両者の耐力に対してSFRCおよび単鉄筋の向上効果が求められる。なお、ここでは詳細は省略するが、荷形式Aの場合に見られる覆工の剥落に対しては、混入度合いが高い

SFRCはその防止効果が顕著であった。

4. 力学的理論に基づいた覆工設計法

4.1 実大覆工載荷実験における

トンネル覆工耐力決定メカニズム

現在、一般的に用いられているトンネル覆工の設計は、骨組み構造解析により求まる断面力がトンネル覆工のすべての箇所において部材断面耐力内にあることを確認することで行われている。しかし、この設計法では、構造全体の耐力に対しては、かなり余裕を持った設計となっている可能性が高く、地山によっては構造全体の耐力を考慮することによりさらに合理的な設計が可能になるものと思われる。

ここでは、前述の実大覆工載荷実験より得られた図-10、11を用いて、覆工の構造全体の耐力が決定される力学的なメカニズムの解明を試みた。

荷形式Aの場合、ある断面がひび割れ限界深さに達し部材断面耐力を超えても、構造物全体としては最大荷重には達しておらず（今回の実験の場合、最大荷重の26~39%程度の荷重）、十分構造全体の耐力内にあることが分かる。一方、圧縮ひずみについては、本載荷形式の場合、最大荷重が得られる直前に、左右対称の断面を含めて合計3断面で終局圧縮ひずみとされる3500 μ に達している場合が多かった。このことから、本載荷形式の場合、複数の断面が圧縮の限界に達することで構造全体の耐力に達したと考えられる。

荷形式Bの場合は、圧縮ひずみが3500 μ に達する断面はなく、ケースB-1の場合は第1、第2、第3ひび割れの発生荷重がほぼ構造全体の耐力に等しいことが分かる。また、その他のケースでは限界ひび割れ深さに1断面で達して構造全体の耐力に即座に達するわけではなく、複数の断面で限界ひび割れに達することにより構造全体の耐力に達していることが分かる。このように、地山の拘束が乏しく、曲げが卓越する本載荷形式の場合は、多断面でひび割れが限界ひび割れ深さに達し、構造不安定になることで構造全体の耐力が決定しているものと考えられる。

4.2 ひび割れ進展FEM解析の適用性

ここでは、ひび割れ進展が考慮できるFEM解析（解析コード：ATENA）より算定される耐力と実験で得られた耐力の比較を行い、FEM解析の適用性検討について考察する。このFEM解析では、2軸強度包絡線により破壊基準を評価し、2軸応力状態

を等価1軸応力-ひずみ関係に変換している。また、ひび割れ開口変位は、ひび割れ帯モデルに基づいてひずみに置換している。

表-4に解析入力値を示す。これは、実験での管理供試体における一軸圧縮試験および曲げ破壊試験の結果に基づき設定したものである。

表-4 解析入力値

内容	A1	A2	B1	B2	備考
管理供試体強度: σ'_{ck} (MPa)	30.27	24.10	26.89	19.70	※1
圧縮強度: f_c (MPa)	25.73	20.49	22.86	16.75	※2
引張強度: f_t (MPa)	2.23	1.92	2.06	1.678	※3
破壊エネルギー: G_f (N/m)	22.34	6617	20.64	4591	※4
弾性係数: E (MPa)	25730	20490	22860	1675	※5
ポアソン比: ν	0.18	0.05	0.22	0.11	※6

※1: 管理供試体一軸圧縮試験結果
 ※2: $0.85 \sigma'_{ck}$ により算出
 ※3: $0.23 \sigma'_{ck}$ により算出
 ※4: 引張応力-ひび割れ開口のグラフの面積
 ※5: 応力ひずみ関係の原点での接線の傾きで $2 \times f_c / 0.002$ により算出
 ※6: 管理供試体一軸圧縮試験結果

図-12, 13は、天端荷重-天端変位を実験と解析について示したものである。これによると本解析手法は、ポストピーク後の急激な荷重低下は再現できないが、実験の非線形挙動を十分再現できている。

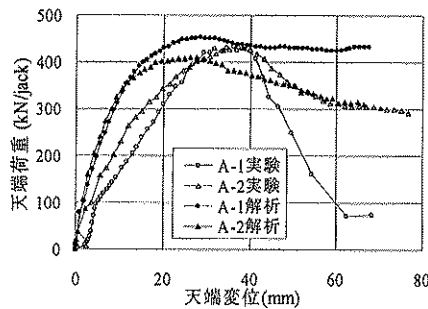


図-12 実験とFEM解析の比較(载荷形式A)

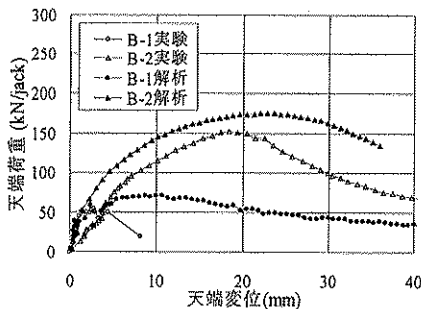


図-13 実験とFEM解析の比較(载荷形式B)

次に、解析で得られたひび割れ発生荷重や各断面の部材断面耐力によって決定する耐荷力、構造全体の耐荷力について、実験結果との比較を図-14~17に示す。これによれば、本解析はひび割れ発生およびその進展、さらには部材断面耐力によって決定する耐荷力、構造全体の耐荷力まで概ね再現できていることが分かる。

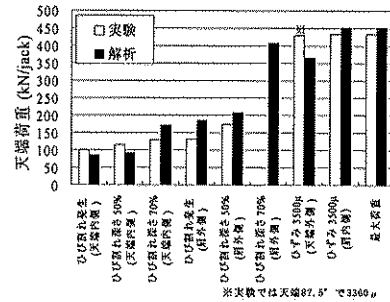


図-14 実験とFEM解析の比較(A-1 プレーン)

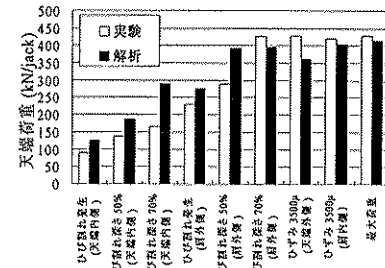


図-15 実験とFEM解析の比較(A-2 SFRC)

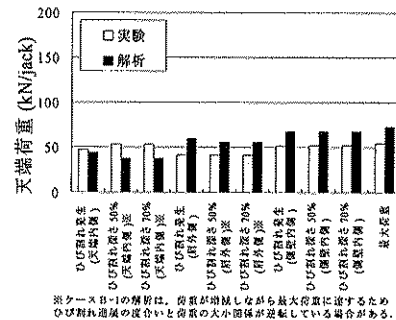


図-16 実験とFEM解析の比較(B-1 プレーン)

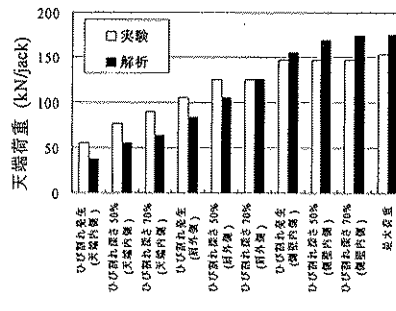


図-17 実験とFEM解析の比較(B-2 SFRC)

以上の結果から、本解析は、部材断面耐力によって決定する耐荷力だけではなく構造全体の耐荷力に着目した場合の設計手法に対しても十分有用であると言える。したがって、実際のトンネルの覆工を対象として、本解析手法による解析を図-16に示すようなモデルで行えば、構造全体の耐荷力に着目した合理的な設計が可能であると考えられる。

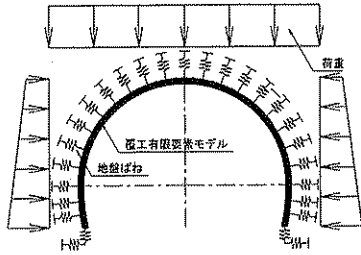


図-18 覆工設計モデルの例

4. 3 覆工に作用する荷重の算出

4. 3. 1 荷重算出における設計モデル

通常の山岳トンネルの覆工は、支保工により地山変位を収束させてから打設されることから、力学的な機能は付与されず、標準巻厚のプレーン（無筋）コンクリートで打設されている。したがって、支保工にある程度の健全度が保たれていれば、将来的に覆工に作用する荷重としては、支保工に作用している荷重以下であるとも考えられる。このため、本研究では、膨張性地山等の覆工に力学的機能を付与する場合を除けば覆工設計に用いる荷重としては支保工に作用している荷重を見込んでおけば十分と考え、支保工に作用する荷重の算出方法の検討を行う。荷重の算出を行う際、その荷重を用いるモデルを設定しなければならない。本研究では、覆工での設計で一般的に用いられる骨組み構造解析を適用し、解析モデルを図-19、表-6に示したものとす。

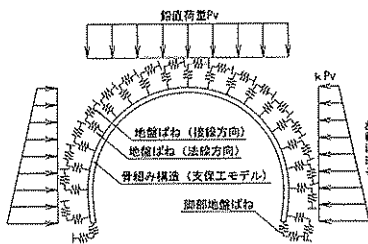


図-19 骨組み構造解析モデルの概要図

表-6 モデル化の概要

項目	モデル化
支保工	梁とし、剛性は吹付け、鋼アーチ支保工の合成値とした。 (吹付けの弾性係数は着床時のものとした。)
地盤	地盤ばねとし、地盤反力係数は道路橋示方書の算定式を用いた。 地盤ばねは、支保工の法線と接線両方向に設置した。 (法線方向地盤ばね値は、法線方向の1/2とした。)
	※法線方向の地盤ばねは、都市部山岳トンネル覆工、シールドトンネルセグメントを参考に内空変位に無効な非線形ばねとした。 ※接線方向の地盤ばねは、覆工と異なり防水シート等による接線方向の縁切り効果がないことを考慮し有効とした。法線方向地盤ばねとの比は、開削トンネルでの考え方を参考とした。
支持条件	脚部を地盤ばね支点とした。 ※表下がり現象の再現性を考慮した。
荷重形状	鉛直荷重を等分布 P_v 、水平荷重を等分布荷重 P_h とした。 (天端高さで $P_h = k \cdot P_v$ 、 k は側圧係数とした。) ※側圧係数をシールドトンネルでの考え方を参考とした。

解析モデルを図-19 のように決定すれば、施工時に計測された変位量を用いて支保工に作用する荷重が

トライアル計算により算定することができる。

図-20は、図-19の解析モデルを用いて現場計測により得られた変位量と解析により得られる変位量が一致するような荷重を求め、その時の支保工に発生する応力を解析と実測と比較した例である。これによると、変位の小さい時の吹付けコンクリートについては解析と実測ではよく一致している。さらに、変位が大きい時の吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工では解析と実測では差異が認められるものの、解析の方がいずれも大きく安全側にある傾向にある。このように図-13の解析モデルによって算定される支保工作用荷重は、実現現象を良好に再現するか、もしくは安全側の値を与えていることが分かる。

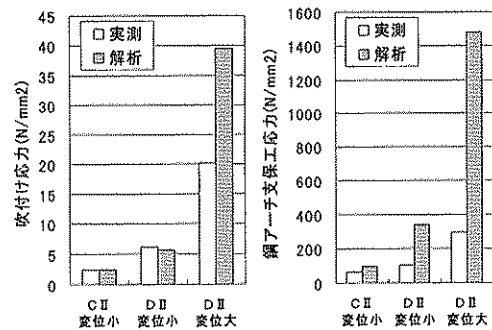
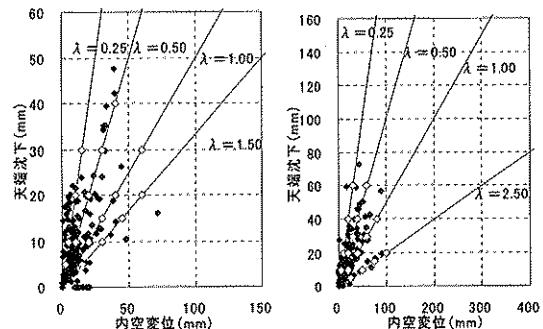


図-20 発生応力の実測と解析の比較

4. 3. 2 支保工作用荷重の算定結果

図-21は、国土交通省によって施工されたトンネル105本について、天端沈下と内空変位を調査したものを例として支保パターンCII、DIについて示したものである。



(a) CII (b) DI
図-21 計測データの整理

これによると、天端沈下が増大すれば内空変位も増大し、それらは扇状の範囲に分布していることが分かる。また、地山分類によって、分布領域は変化し、地山分類が悪くなると変位が増大していること

が分かる。これらの計測データ（図中◆でプロット）は、内空変位の 1/2 と天端沈下の比である見かけの側圧係数 λ を傾きとする直線に近似でき、かつその直線上のいくつかの点（図中◇でプロット）に代表させることができる。

一方、ある天端沈下と内空変位が測定されたと仮定すれば、その変位が発生する時の荷重は図-19 の解析モデルを用いて算定することができる。そこで、現場計測結果の変位の代表点を基にその時の変位が生じる荷重を算定した。その結果を図-22, 23 に示す。

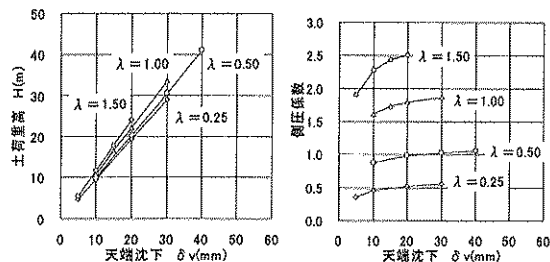


図-22 計測変位と支保工荷重 (C II)

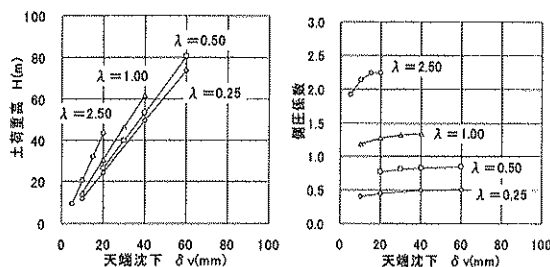


図-23 計測変位と支保工荷重 (D I)

図-22, 23 から、実現場において日常的に計測される天端沈下および内空変位によって解析を行うことなしに、支保工作用荷重が分かることとなる。

そして、その荷重を参考に、覆工設計時の作用荷重を設定すれば、図-16 に用いた設計モデルおよび 4.2 節で有用性を確認した解析手法を用いて合理的な覆工設計が可能になるものと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

覆工の温度・乾燥収縮ひび割れに対する鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の抑制効果に関する検討からは、

- ①室内実験結果より、SFRC を採用することにより、ひび割れ発生が遅延効果が認められ、また、ひび割れ発生後はひび割れ進展を抑制する効果が期待

できることが分かった。

- ②現場計測結果より、SFRC を覆工に使用した場合は、温度・乾燥収縮に起因するひび割れを完全に抑制することはできないが、プレーンコンクリートと比較してひび割れ発生後のひび割れ幅の進展を抑制する効果があることが確認された。

SFRC が覆工の耐荷力に及ぼす効果に関する検討からは、

- ③軸力が卓越する場合には、構造全体の耐荷力に対する SFRC の向上効果は顕著ではないが、曲げが卓越する場合には、効果が顕著であることが分かった。
- ④軸力が卓越する場合、曲げが卓越する場合ともに、SFRC はひび割れ深さに対する部材断面耐力によって決定される耐荷力の向上効果を有することが認められた。さらに、軸力が卓越する場合に発生する覆工の剥落に対しては、混入度合いが高い SFRC はその防止効果が顕著であることが分かった。

力学的理論に基づいた覆工設計法に関する検討からは、

- ⑤トンネル構造全体の耐荷力決定メカニズムとしては、(1)軸力卓越時に複数の断面でひずみの圧縮限界から決まる部材断面耐力に達すること、(2)曲げ卓越時に複数の断面でひび割れ深さから決まる部材断面耐力に達し、構造全体の耐荷力不安定となることの 2つが考えられることが分かった。
- ⑥ひび割れ進展 FEM 解析を用いれば、覆工コンクリートのひび割れ発生に伴う非線形挙動を再現できるだけでなく、部材断面耐力によって決定する耐荷力および構造全体の耐荷力も評価することができ、覆工設計法への適用性が高いことが分かった。
- ⑦覆工設計に用いる荷重値として考えられる支保工に作用している荷重の概略値を、天端沈下や内空変位の現場計測結果を用いて、骨組み構造解析モデルにより算定する方法を提案した。