

数値解析によるトンネル覆工の耐力の評価 に関する研究

Consideration on Load -Carrying Capacity of Tunnel Lining with Numerical Analysis

真下 英人¹・砂金 伸治²・木谷 努²・遠藤 拓雄³

Hideto Mashimo, Nobuharu Isago, Tsutomu Kitani and Takuo Endo

¹正会員 博士(工学) (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

E-mail : mashimo@pwri.go.jp

²正会員 修士(工学) (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

³正会員 (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

In this study, in order to establish the numerical analysis method that is able to estimate the load-carrying capacity of tunnel lining and the effect of fiber reinforcements, numerical analysis using FEM considering the development of cracks were carried out and the results were compared with the experimental ones. The load-carrying capacity of concrete lining under assumed load conditions and the condition where fiber reinforcements is effective were also investigated through case studies using actual tunnel figures.

Key Words : tunnel lining, development of cracks, steel fiber reinforced concrete, FEM analysis

1. はじめに

従来、山岳トンネルの覆工は、経験的に定められた標準設計巻厚のプレーン（無筋）コンクリートを採用しているのが一般的である。しかし、特殊な地山条件等により覆工に力学的機能を付加するケースが増えてきており、その場合、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トンネル覆工の設計を行うことが多い。一方で、トンネル覆工の1つの断面での破壊が、直ちに構造全体の崩壊とはならないことも既往の実験や解析等で明らかになっている。

したがって、最も危険側になる部材断面で断面力と部材断面耐力を比較して諸元を決定する設計では、

覆工構造全体の耐力（構造耐力）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、地山条件によっては構造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考えられる。このことよりトンネル覆工構造の合理化が望まれている現在、部材断面耐力によって決定される耐力のみならず構造物全体の耐力を評価したトンネル覆工の設計法を確立する必要があるものと考えられる。

そこで、本研究では、覆工全体の耐力を考慮した設計法の確立を目的とし、ひび割れを考慮した数値解析手法の覆工設計への適用性の検証と部材断面耐力によって決定される耐力と構造耐力の差異について検討する。さらに、鋼繊維補強コンクリート（SFRC）等の材料が両耐力にどの程度影響を及ぼすかを検討する。

具体的には、ひび割れを考慮できる非線形有限要素法解析を用い、その数値解析手法が実大覆工載荷試験で得られた部材断面耐力によって決定される耐力、構造耐力および破壊メカニズムを再現可能かについて検証する。また、実トンネルを対象としたケーススタディを実施し、部材断面耐力によって決定される耐力と構造耐力の違い、およびそれに対する鋼繊維等の補強効果について検討する。

2. ひび割れ進展 FEM 解析の適用性検討

(1) はじめに

ここでは、ひび割れ進展が考慮できる FEM 解析（解析コード：ATENA¹⁾）より算定される耐力と、実大載荷実験で得られた、部材断面耐力によって決定される耐力、構造耐力の比較を行い、FEM 解析の適用性について検証する。この FEM 解析では、二軸強度包絡線²⁾により有効強度を評価し、二軸応力状態を等価一軸応力-ひずみ関係に近似している³⁾。また、ひび割れ開口変位は、ひび割れ帯モデル⁴⁾に基づいてひずみに置換している。

実験⁵⁾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、図-1 に示す 2 つの載荷形式を採用している。載荷形式 A は、地山に十分拘束された状態で覆工に緩荷重等が作用すると想定した場合である。載荷形式 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。ここで実施する FEM 解析は、これら実験の条件と同一とした。

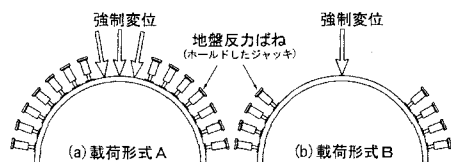


図-1 実験における載荷形式

表-1 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。

なお、部材断面耐力は、既往の設計では、圧縮側については終局圧縮ひずみ 3500μ 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で規定し、限界ひび割れ深さは、ブレンコンクリート覆工の場合、断面高さの 50%⁶⁾、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 覆工の場合、断面高さの 70%^{6), 7)} とする場合が多い。本解析での結果の整理も、この部材断面耐力の考え方に準拠することとする。

表-1 解析入力値

内容	A1	A2	備考
材質	ブレン	SFRC	SF は、60mm、0.5%を混入
管理供試体強度: σ'_{ck} (MPa)	30.27	24.10	一軸圧縮試験結果
圧縮強度: f_c (MPa)	25.73	20.49	$0.85\sigma'_{ck}$
引張強度: f_t (MPa)	2.23	1.92	$0.23\sigma'_{ck}$ ⁽²³⁾
破壊エネルギー: G_f (N/m)	22.34	6617	引張応力-開口幅のグラフの面積 ⁸⁾
初期弾性係数: E (MPa)	25730	20490	応力ひずみ曲線より求めた ⁸⁾
ポアソン比: ν	0.18	0.17	一軸圧縮試験結果

内容	B1	B2	備考
材質	ブレン	SFRC	SF は、60mm、0.5%を混入
管理供試体強度: σ'_{ck} (MPa)	26.89	19.70	一軸圧縮試験結果
圧縮強度: f_c (MPa)	22.86	16.75	$0.85\sigma'_{ck}$
引張強度: f_t (MPa)	2.06	1.678	$0.23\sigma'_{ck}$ ⁽²³⁾
破壊エネルギー: G_f (N/m)	20.64	4591	引張応力-開口幅のグラフの面積 ⁸⁾
初期弾性係数: E (MPa)	22860	1675	応力ひずみ曲線より求めた ⁸⁾
ポアソン比: ν	0.22	0.11	一軸圧縮試験結果

※ブレンでは、引張強度と限界開口幅 $W_c=0.02\text{mm}$ により算定⁸⁾。SFRC では、曲げ破壊試験結果から算定された残留強度率 μ と曲げ引張応力-ひび割れ開口幅曲線勾配 β から算定した⁸⁾。
 ※※コンクリート標準示方書⁹⁾に規定された応力ひずみ関係における原点での接線の傾きとした。

(2) 解析結果

a) 天端荷重-変位関係

解析結果として、天端荷重-変位関係を実験の結果とともに図-2 に示す。

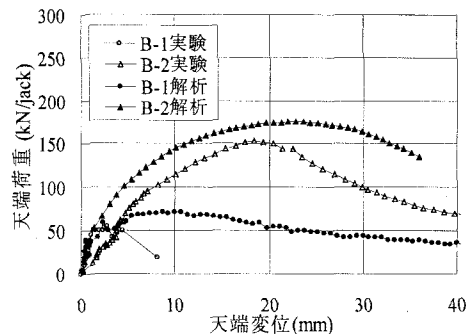
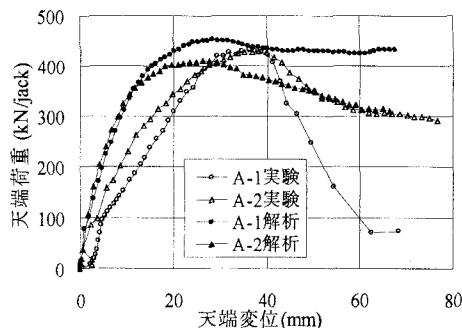
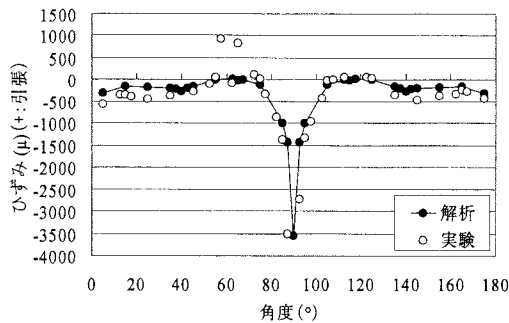


図-2 実験と解析の天端荷重-変位関係

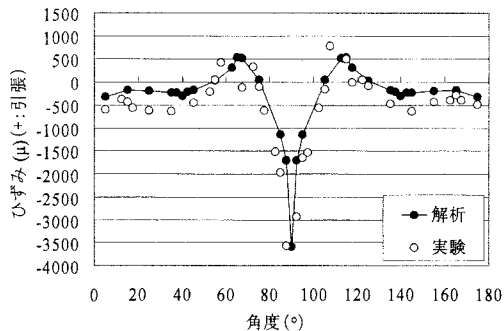
図-2によると、解析では、実験で得られた構造耐力後（ポストピーク）の急激な荷重低下を明確に再現できているとは認められないものの、それ以前の非線形挙動および最大荷重についてはおおそ再現できていることが分かる。

b) ひずみ分布

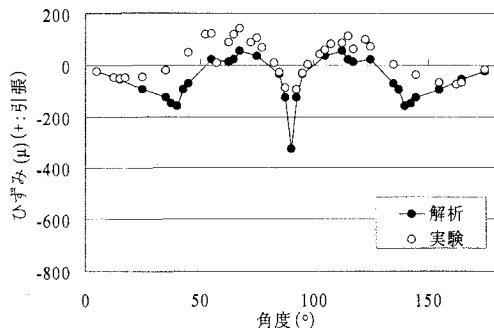
次に、トンネル外周上ひずみ分布を図-3に示す。ひずみ分布は、A载荷形式では卓越して発生する天端外側ひずみが終局圧縮ひずみ 3500μ に最も近くなった時、B载荷形式では最大荷重時について示す。



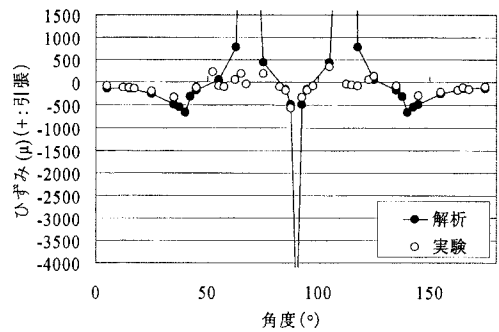
(a) A-1



(b) A-2



(c) B-1



(d) B-2

図-3 実験と解析のひずみ分布図

図-3によると、解析では、ケースB-2の解析において最もひび割れが深く入る天端で局所的に大きなひずみが発生している以外、実験でのひずみ分布をよくシミュレートできていることが分かる。

c) 構造耐力決定メカニズム

筆者らは実験でのトンネル全体の構造耐力が決まる力学的なメカニズムを以下の①、②のように考え、報告した⁵⁾。

- ① 曲げと圧縮が作用し、曲げ圧縮破壊が生じる荷重条件（载荷形式A）では、ひび割れ深さで規定される部材断面耐力に達しても構造の不安定は生じず、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で構造耐力に達する。
- ② 曲げが卓越する荷重条件（载荷形式B）では、圧縮限界に達する断面が存在しなくても、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、構造が不安定となることで構造耐力に達する。

そこで、本解析手法が、これら実験での構造耐力の決定メカニズムを再現でき、構造耐力に着目した覆工設計法の一つの方法として適用できるかどうかを検証する。

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、構造耐力について、実験結果との比較を図-4に示す。これによると、解析と実験は、各ひび割れ発生荷重や部材断面耐力に達する荷重、構造耐力に達する荷重が概ね一致している。

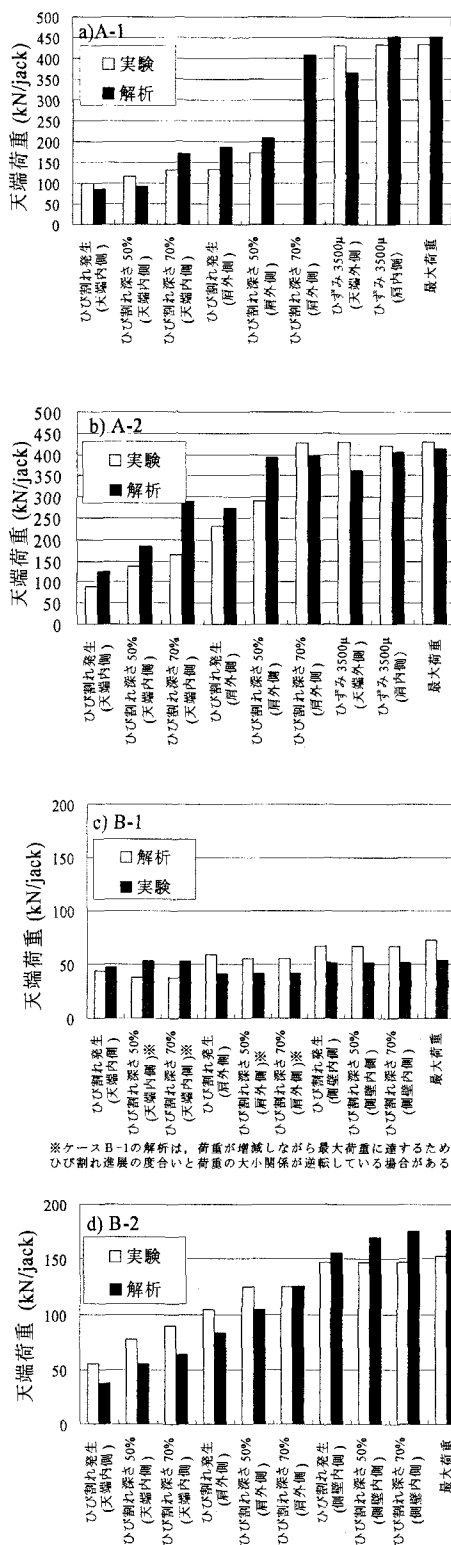


図-4 FEM解析と実験の比較 (部材断面・構造耐力)

すなわち、載荷形式Aの場合では、ひび割れ深さから決まる部材断面耐力に複数の断面で達した後、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して構造耐力に至っており、解析は実験の構造耐力決定メカニズムをよく再現している。

また、載荷形式Bの場合では、複数の断面(左右合計 5 箇所)でひび割れ深さから決まる部材断面耐力に達し、構造が不安定となることで構造耐力に至っており、解析は実験の構造耐力決定メカニズムをよく再現している。

さらに、解析では、実験と同様に、B-1 のケースを除いて 1 つの断面がひび割れ深さから決まる部材断面耐力に達したとしても、最大荷重まではかなりの余裕があり、構造耐力に達することにはなっていない。

このように、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される耐力、構造耐力まで概ね再現できていることが分かる。

(3)まとめ

ここでは、覆工全体の耐荷力を考慮した設計法の確立を目的とし、その設計法に対する一つの方法として考えられるひび割れを考慮できる非線形有限要素法解析について、覆工破壊メカニズム等の再現可能性について検証した。

その結果、この解析手法は、トンネル覆工の非線形挙動やひずみ発生状況および部材断面耐力に達する荷重や構造耐力に達する荷重、構造耐力の決定メカニズムを概ね再現できることが分かった。

これらの結果から、本解析は、部材断面耐力によって決定される耐力だけではなく構造耐力に着目した設計手法に対してもある程度有用であると考えられる。

3. 解析手法による実トンネルのケーススタディ

(1)はじめに

前節で検証したひび割れ進展 FEM 解析を用いて実トンネルを対象としたケーススタディを実施し、実トンネルにおける部材断面耐力によって決定される耐力および構造耐力のおおよその目安を得る。ま

た、高強度コンクリートと鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の補強効果がどのような場合に顕著に現れるかを検討する。

今回試算するトンネルは、図-5 に示すような内空幅 11.4m の 2 車線道路トンネル相当規模である。解析では、厚さ 30cm の覆工を対象とし、支保工は考慮しない。また、地盤ばねをトンネル周上および覆工脚部に配置した。なお、地盤条件は B 級地山相当 (地山変形係数 $D=5000\text{MPa}$) を基本とし、後に地盤条件に対するパラメータスタディを実施した。

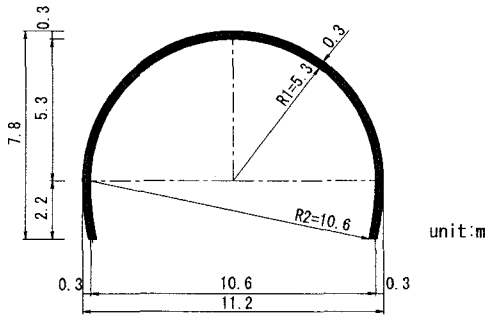


図-5 解析対象の概要

本検討では設計基準強度 $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$ のプレーン (無筋) コンクリートを基本として、SFRC および高強度コンクリート ($\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$) について比較検討した。プレーンコンクリートと SFRC の引張特性の差異を破壊エネルギーの差で表している。表-2 には、本検討で試算する覆工材料の入力値を示す。この入力値は、現状の設計で用いられている値^{8), 9)}とし、SFRC の破壊エネルギー算定に用いる定数は、実験で用いた管理供試体の曲げ破壊試験から求めた値とした。

表-2 解析入力値

内容	プレーン	高強度	SFRC	備考
設計基準強度: σ_{ck} (MPa)	18	30	18	
設計圧縮強度: f_{cd} (MPa)	13.85	23.08	13.85	$\sigma_{ck}/\gamma_m (=1.3)$
圧縮強度: f_c (MPa)	11.77	19.62	11.77	$0.85f_{cd}$
引張強度: f_t (MPa)	1.215	1.708	1.215	$0.23\sigma_{ck}^{(2/3)}/\gamma_m (=1.3)$
残留強度率	—	—	0.7	引張応力-開口幅のグラフの面積 ⁸⁾
破壊エネルギー: G_f (N/m)	12.15	17.08	1268	応力ひずみ曲線より求めた ^{8), 9)}
初期弾性係数: E (MPa)	11770	19620	11770	$2 \times f_c / 0.02$
ポアソン比:	0.2	0.2	0.2	

※プレーンでは、引張強度と限界開口幅 $W_e=0.02\text{mm}$ により算定⁸⁾。SFRC では、曲げ破壊試験結果から算定された残留強度率 μ と曲げ引張応力-ひび割れ開口幅曲線勾配 β から算定した⁹⁾。

※※コンクリート標準示方書⁹⁾に規定された応力ひずみ関係における原点での接線の傾きとした。

荷重形態としては、図-6 に示した 4 つのパターンについて解析した。図-6(a) は、SL より 45° から 135°

の範囲に地盤ばねが設置されない状態で天端に部分的な荷重が作用する場合である。覆工背面に空洞が存在する状態で天端付近に岩塊の落下のような部分的な荷重が作用する場合等を想定している。(b) は、トンネル全周に地盤ばねが設置された状態で覆工に等方的な土圧が作用する場合である。また、同じくトンネル全周に地盤ばねが設置された状態で、(c) は、上方のみから、(d) は側方のみから土圧が作用する場合である。

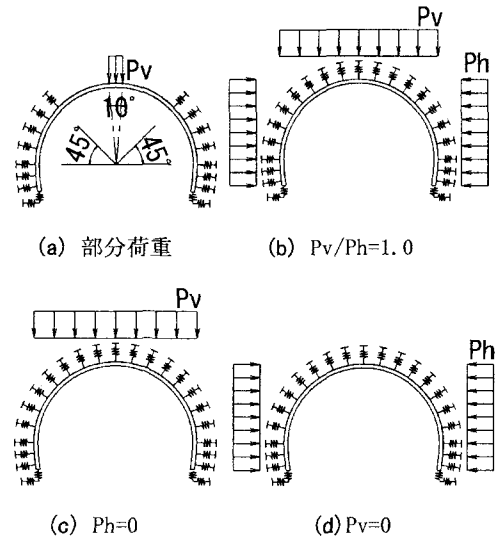


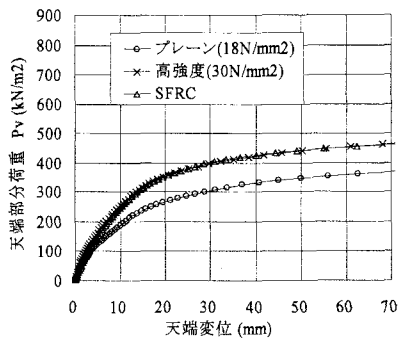
図-6 検討ケース

(2) 解析結果

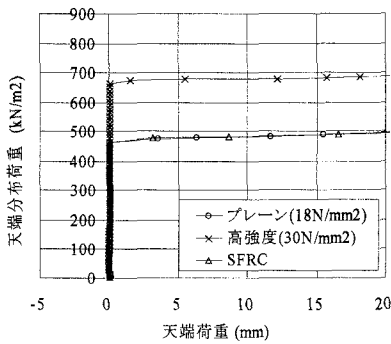
a) 天端荷重-変位関係

図-7 にそれぞれの荷重形態における天端荷重-変位関係を示す。これによると、荷重形態によって天端荷重-変位関係が大きく異なっていることが分かる。さらに、ひび割れ進展等の覆工の力学挙動の非線形性が解析結果によく表れていることが分かる。

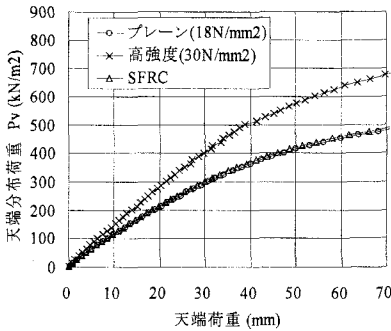
また、材料別の天端荷重-変位関係は、図-7(a) の部分的な荷重が作用した場合についてのみは SFRC と高強度コンクリートが同程度となっているが、その他のケースについては鋼繊維補強の効果がほとんど見られず、プレーンと同程度となっていることが分かる。一方で、高強度コンクリートの効果は各荷重形態においてある程度認められる。



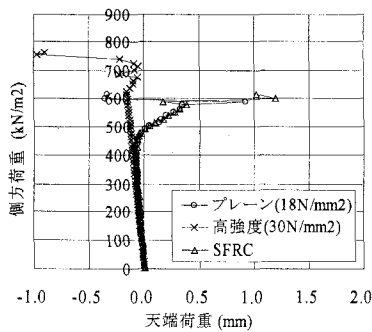
(a) 部分荷重



(b) $P_v/Ph=1.0$



(c) $Ph=0$

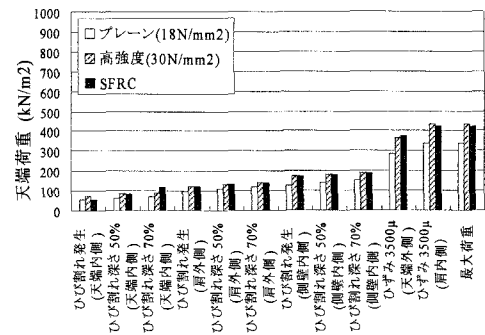


(d) $P_v=0$

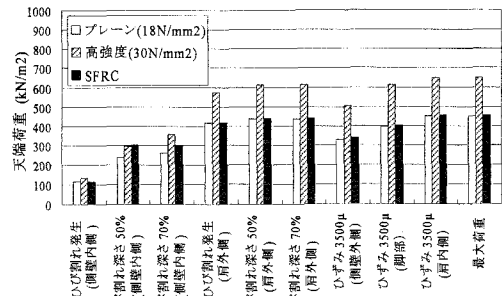
図-7 実トンネル解析の天端荷重-変位結果

b) 部材断面耐力によって決定される耐力，構造耐力と覆工材料の関係

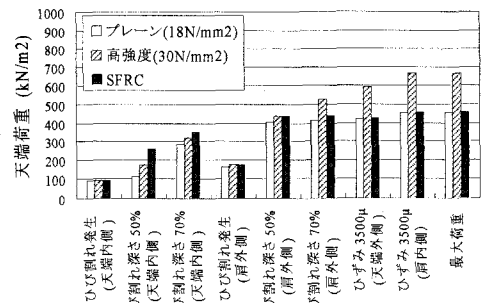
図-8にはそれぞれの荷重形態における，ひび割れ発生時，部材断面耐力到達時および構造耐力到達時のそれぞれの荷重値を示す。これによると，それぞれのケースにおいて，第一ひび割れが限界ひび割れ深さとなり部材断面耐力に達したとしても，構造耐力にはかなりの余裕があることが見られることから，構造耐力まで考慮した設計を行った場合はかなり経済的な断面となることが分かる。



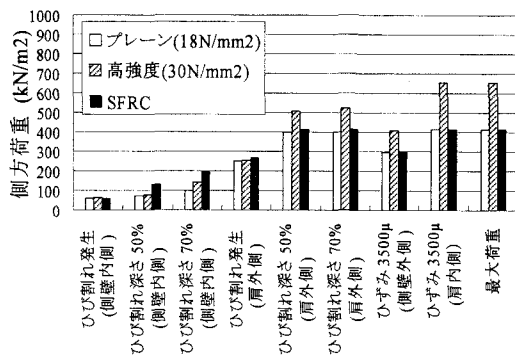
(a) 部分荷重



(b) $P_v/Ph=1.0$



(c) $Ph=0$



(d) $P_v=0$

図-8 実トンネル解析の断面・構造耐力

なお、部材断面耐力によって決定される耐力に対する鋼繊維の補強効果は、 $P_v/Ph=1.0$ の場合を除いて十分認められることが分かる。また、構造耐力に対する鋼繊維の補強効果は、(a) の部分荷重の場合について顕著に認められる。

すなわち鋼繊維の補強効果は、部材断面耐力のように、ある断面におけるひび割れ進展抑制について顕著であるが、トンネル全体の構造耐力に対して、多くの場合、その効果は顕著ではない。しかし、地盤の拘束が不十分であったり、荷重が部分的に作用したりする等、曲げモーメントが卓越する場合については、構造耐力に対しても鋼繊維の補強効果はある程度期待できることが分かる。

一方、高強度コンクリートは、圧縮強度および引張強度とも増加しているため、荷重形態によらず部材断面耐力によって決定される耐力や構造耐力両者についてある程度補強効果が期待できる。ただし、部材断面耐力によって決定される耐力に対する効果は、SFRC よりは顕著ではない。

(3) 地盤条件の違いによるパラメータスタディ

本解析手法において、地盤条件（地山の変形係数）が変化した場合、部材断面耐力によって決定される耐力および構造耐力がどのように変化するかを検討する。解析条件は、前節までのものと同様であり、地盤条件のみをこれまで考慮していた B 級地山相当（地山の変形係数 $D=5000\text{MPa}$ ）から、C II 級地山相当（地山の変形係数 $D=1000\text{MPa}$ ）、都市部地山相当（地山の変形係数 $D=100\text{MPa}$ ）と変化させる。

図-9 に地山の変形係数と、それぞれの材料における部材断面耐力によって決定される耐力および構造耐力の関係を示す。これによると、図-9(a) の部分荷重は、ばね設置範囲が部分的であるため、地盤の変形係数の耐力に及ぼす影響が他の荷重形態に比べて小さくなっている。一方、他の荷重形態では、地盤の変形係数が小さくなると、耐力は減少しており、その割合は地盤の変形係数が小さくなればなるほど大きい。

なお、各荷重形態において、部材断面耐力によって決定される耐力に対して、鋼繊維の補強効果が高いということは、変形係数が小さくなくても同様である。さらに、(a) の部分的な荷重の場合には、鋼繊維の補強効果が構造耐力に対しても認められるということも変形係数が小さくなくても同様であることが分かる。

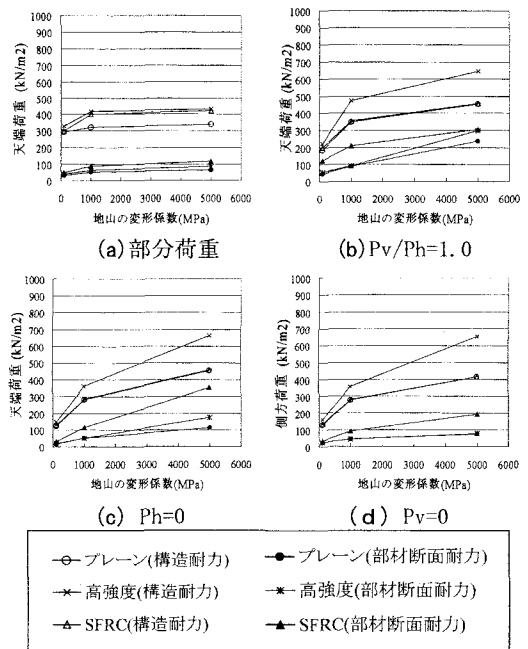


図-9 地山の変形係数と断面・構造耐力の関係

(4) まとめ

ここでは、前章にて有用性を検証したひび割れ進展 FEM 解析を用いて、実トンネルを対象にしたケーススタディを実施した。

この結果、地盤の拘束が小さく荷重が部分的であるような曲げが卓越する場合以外、通常の設計で考えられる荷重形態においては、構造耐力に対する鋼

繊維の補強効果は必ずしも大きくはなかった。しかし、部材断面耐力によって決定される耐力に対しては、鋼繊維の補強効果はかなり期待できることが分かった。

一方、高強度コンクリートは、部材断面耐力によって決定される耐力および構造耐力両者に対して、荷重形態によらず、その補強効果が認められた。ただし、部材断面耐力によって決定される耐力に対する効果は、SFRC よりは顕著ではなかった。

さらに、地盤条件と各荷重形態における部材断面耐力によって決定される耐力と構造耐力の関係を検討した。これによると、地山の変形係数が小さくなると、耐力は減少しており、その割合は地山の変形係数が小さくなればなるほど大きいことが分かった。

4. 結論と今後の課題

本研究では、ひび割れを考慮できる非線形有限要素法解析を用い、その数値解析手法が実大覆工載荷試験で得られた部材断面耐力によって決定される耐力、構造耐力および破壊メカニズムを再現可能かについて検証した。また、実トンネルを対象としたケーススタディを実施し、部材断面耐力によって決定される耐力と構造耐力の違い、およびそれに対する鋼繊維等の補強効果について検討した。

得られた知見は以下の通りである。

①ひび割れ進展 FEM 解析を用いれば、ひび割れ進展というコンクリートの非線形性を再現できるだけでなく、構造耐力決定メカニズムをも再現できた。したがって、この解析手法は、部材断面耐力だけでなく構造耐力に着目した設計手法に対してもある程度有用であると考えられる。

②ひび割れ進展 FEM 解析によれば、通常の設計で考えられる荷重形態では、構造耐力に対する鋼繊維の補強効果は必ずしも大きくはないが、部材断面耐力によって決定される耐力に対しては、鋼繊維の補強効果がかなり期待できる。

今後は、設計に用いる荷重モデルの検討を進め、地山条件に応じた覆工設計法を提案する。

参考文献

- 1) Cervenka Consulting : ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structure, Program Documentation, Prague, 2001.6.
- 2) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., Rusch, H. : Behavior of Concrete under Biaxial stress, ACI Journal, V.66, No.8, pp.656-666, 1969.8
- 3) Chen, W.F., Saleeb, A.F.: Constitutive Equations for Engineering Materials, John Wiley & Sons, 1982
- 4) Bazant, Z.P. and Oh, B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, RILEM, vol.16, pp.155-177, 1983
- 5) 砂金伸治, 真下英人, 木谷努, 遠藤拓雄: トンネル覆工の構造耐力の決定メカニズムに関する実験的考察, トンネル工学研究発表報告集第13巻, pp.297-302, 2003.11
- 6) 併進工法設計施工研究委員会: 併進工法設計施工法(都市トンネル編), pp.68-77, 1992.8
- 7) 日本鉄鋼連盟: 鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編), pp.38-48, 2002.11
- 8) 土木学会: 繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), コンクリートライブラリー97, 1999.11
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3