

S F R Cによるトンネルインバートの設計と施工

DESIGN AND BUILD OF A STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE TUNNEL INVERT LINING

春山 和彦¹⁾・寺本 哲²⁾・大島 基義²⁾・須藤 敏明³⁾・○加藤 隆³⁾

Kazuhiko HARUYAMA, Satoshi TERAMOTO, Motoyoshi OHSHIMA, Toshiaki SUDO and Takashi KATO

In this paper, a shallow large tunnel with 90cm thick steel fiber reinforced concrete (SFRC) invert lining is discussed. Because the scale, i.e. the thickness, of SFRC is known to influence its bending strength/toughness, a large-scale bending test using 90cm thick specimens was carried out before the design and application. Using the test results, numerical study was performed in order to correlate the tension softening properties of a large specimen with that of a standard scale one. Also the direction and distribution of steel fibers in the specimen was examined. Finally, the useful data about the quality of the SFRC lining have been obtained.

Key Words: steel fiber reinforced concrete, invert lining, large-scale bending test, scale effect

1. はじめに

首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル工事は、市街地の道路直下を土被り約 8m で掘削する工事であり、施工中の周辺環境維持と用地幅の制約から、NATM による二層構造トンネルが採用されている。掘削方法や、掘削に関する設計・施工上の検討事項は、既報により報告済み^{1)~4)}である。このトンネルの覆工構造は、当初覆工厚 80cm ~90cm の鉄筋コンクリート部材として計画されていた。しかし、大きな曲げモーメントが発生しないインバート部については、覆工厚 90cm の鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 構造を採用することにより、鉄筋を組む手間を省ける等のより効率的な施工法に変更した (図-1)。但し、覆工厚 90cm の SFRC 構造を採用するに当たっては、以下のことが問題点として挙げられた。

- ①SFRC 構造で覆工厚 40cm を越えるようなトンネル二次覆工は、施工例が少なく、SFRC の引張強度特性の寸法効果については未解明である。
- ②SFRC 部材の強度特性、曲げ靱性特性を決定する因子として、部材中の鋼繊維混入率や配向性が挙げられるが、覆工厚 90cm の覆工における鋼繊維混入率、配向性は把握されておらず、混

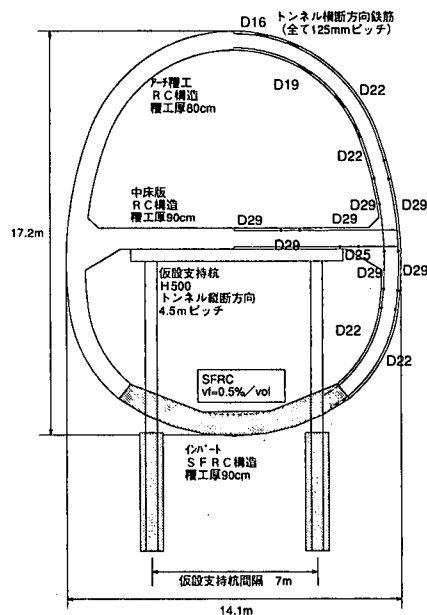


図-1 青梅トンネル施工断面図

- | | |
|----|--|
| 1) | 日本道路公団 東京建設局八王子工事事務所 青梅北工事区 工事長 |
| 2) | 正会員 大成建設(株)・戸田建設(株)・佐田建設(株) 青梅トンネル南工事共同企業体 |
| 3) | 正会員 大成建設(株) 土木設計第一部解析技術室 |

入率、配向性を簡便に把握することが求められる。

そこで、本検討では、以下の検討を実施した。

①部材厚 90cm の供試体について曲げ靱性試験を実施し、試験結果を有限要素解析によりシミュレートして、SFRC の曲げ強度特性を把握し、曲げ靱性等の寸法効果の有無について考察する。

②上記の部材厚 90cm の曲げ強度試験供試体からコアサンプリングを行い、配向性・鋼繊維混入率の把握を行い、実構造物における混入率や配向性の傾向について考察する。

2. インバートSFRC構造の設計

インバートの SFRC 化の設計検討にあたっては、部材設計を限界状態設計法（終局限界状態、使用限界状態の検討）に基づいて行った。SFRC 部材のひび割れ面における応力伝達性能は、規定荷重－たわみ線（図－2）⁵⁾を仮定した。施工に用いた鋼繊維の材料諸元、混入率等については、別途試験練り供試体の曲げ靱性試験を実施し、図－2 の規定線以上の曲げ靱性を有していることを確認した上で決定した。荷重条件としては、トンネル完成時に加えて、施工時荷重や、仮設支持杭の影響等も考慮に入れて検討した。表－1 に検討に用いた荷重条件を示す。

検討の結果、インバート部で断面力が最大になったのはケース 13（仮設支持杭撤去時）であり、断面力計算結果は図－3 のようになった。終局限界状態耐力照査の結果、計算された断面力は無筋コンクリートの終局耐力を上回るものの、SFRC の終局耐力以下となっており、SFRC を用いれば終局限界状態に対して構造が成立可能であることがわかった（図－4）。

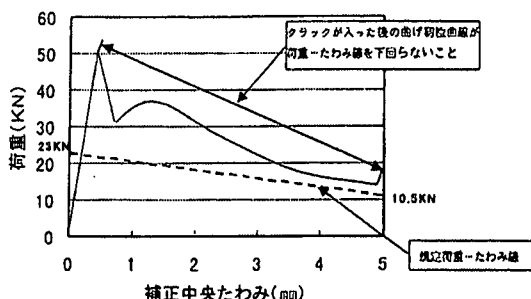
3. SFRCの大型供試体曲げ靱性試験

SFRC 部材の曲げ靱性の確認方法としては、まず、標準供試体⁶⁾（部材厚 15cm×部材幅 15cm×部材長 53cm）を用いて曲げ靱性試験を実施して荷重－たわみ曲線（図－5）を求め、規定線を上回ることを確認した後、覆工厚 90cm での強度特性を把握するために、部材厚 90cm×部材幅 60cm×部材長 315cm で曲げ靱性試験を実施した。実施状況を写真－1 に、供試体の概要図を図－6 に示す。供試体の部材長、載荷点は、標準供試体と相似形になるように設定した。但し、部材断面幅については、試験装置の性能上の問題から、標準供試体と相似形の 90cm ではなく、60cm とした。

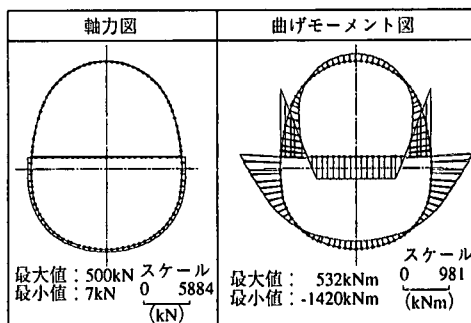
大型供試体の荷重－たわみ曲線を図－7 に示す。荷重のピーク値は、覆工の N=0 の場合の設計曲げ耐力 M より算出される荷重 $P=6M/L$ を上回っており、試験結果は設計耐力以上を確保できていることが確認された。

表－1 荷重ケース一覧表

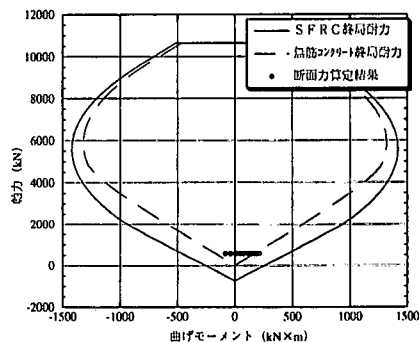
ケース名	荷重条件	解析手法	死荷重 自重	土圧 側圧	坑内 地表	活荷重 重役	土圧	水圧	杭切頭 荷重
case1～5	完成時 (常時)	2次元 フルメッシュ解析	○	○	○	○	K=0.3 K=0.5 考慮せず	高水位 低水位	－
case6,7	完成時 (大雨時)	2次元 フルメッシュ解析	○	○	○	○	K=0.3 K=0.5	低水位	－
case8,9	施工時 (自重のみ)	2次元 フルメッシュ解析	○	－	－	○	○	－	－
case10～12	施工時 (仮設支持杭 の撤去時)	3次元 シェル解析	○	－	－	○	考慮 考慮せず	－	－
case13	施工時 (仮設支持杭 撤去時)	2次元 フルメッシュ解析	○	－	－	－	－	－	○



図－2 SFRC 部材の曲げ靱性特性の仮定⁵⁾



図－3 断面力算定結果（ケース 13）



図－4 終局耐力照査結果

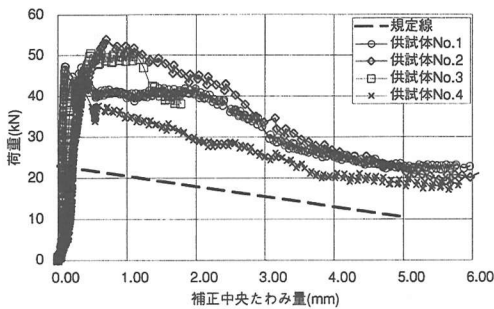


図-5 標準供試体曲げ靱性試験結果

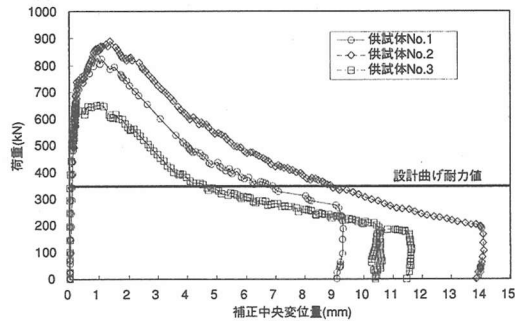


図-7 大型供試体曲げ靱性試験結果
(荷重-たわみ曲線)

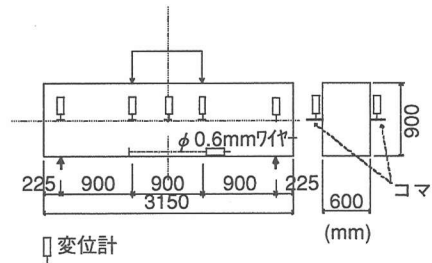


図-6 曲げ靱性試験大型供試体の概要図



写真-1 大型供試体曲げ靱性試験実施状況

4. SFRCの寸法効果に関する考察

本節では、前節で得られた標準供試体と実物大供試体の曲げ靱性試験結果から、SFRCの曲げ強度特性の寸法効果の有無を把握するために、有限要素解析を実施してSFRCの曲げ靱性をシミュレートする。

鋼繊維補強コンクリートの設計に用いる引張応力-ひび割れ開口幅の関係(引張軟化曲線)は、図-8に示すような直線関係⁷⁾を仮定すれば、少ないパラメータで靱性特性をうまく説明できるとされている。この場合、直線の傾き λ と、切片 f_{tr} が、入力物性値となる。引張軟化曲線は、本来直接引張試験により求めるべきものであるが、高剛性でかつ高精度の変位制御が可能な試験機が必要であり、実施が困難であるため、曲げ試験結果から引張軟化曲線を推定する方法が提案されている⁷⁾。曲げ試験結果の荷重(P)-たわみ(δ)曲線は、曲げ引張応力($\sigma = 6P/L \div Z$)-ひび割れ開口幅($w = \delta \times 0.75$)曲線に変換することができる。この曲線を図-8と同様に直線近似した場合の勾配 β と引張軟化曲線の勾配 λ の間には相関関係があることが知られており、Nanakornら⁸⁾がFEM解析を用いて β と λ との関係を求めた結果、

$$\beta = 1.85\lambda$$

という関係があることが報告されている。

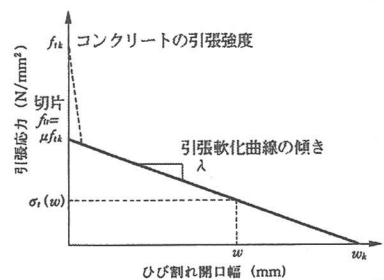


図-8 引張軟化曲線のモデル化⁷⁾

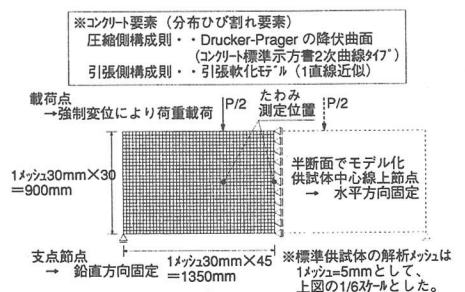


図-9 FEM解析の概要

そこで、本報文においては、標準供試体の曲げ靱性試験結果より β の値を概略推定した後に、上記の関係を用いて λ の値を推定して、標準供試体の曲げ引張応力-ひび割れ開口幅関係をシミュレートできる引張軟化曲線を求めた。そして、求めた物性値から実物大供試体の曲げ靱性試験をシミュレートして、試験結果の比較を行った。

図-9に実物大供試体のFEM解析メッシュを示す。なお、標準供試体の解析メッシュは、メッシュの寸法を1/6にしてシミュレートした。コンクリート圧縮側のモデル化としては、「コンクリート標準示方書」の二次曲線型の応力-ひずみ関係を用いた。ひび割れのモデル化としては、分布ひび割れモデルを用いた。図-10に入力した引張軟化曲線を示す。この入力値を用いて標準供試体を解析した結果は図-11のとおりであり、仮定した引張軟化曲線は標準供試体の曲げ引張応力-ひび割れ開口幅関係をシミュレートできていると考えられる。図-12に図-10の物性値を用いて、実物大供試体の曲げ引張応力-ひび割れ開口幅関係を求めて、実験結果と比較した結果を示す。この結果、FEM解析結果は、実験結果と同様の曲線形状をしており、標準供試体の物性値を用いれば、大型供試体の挙動を十分説明できると考えられる。但し、供試体 No. 3 のように、ピーク荷重が解析結果と比較して低いレベルの試験結果も存在する。これは、標準供試体と比較して、大型供試体は弱面が形成される確率が大いということが原因のひとつとして考えられる。弱面が形成される原因としては、次節で述べる部材中の鋼繊維の配向性や部材混入率にばらつきが生じる結果、ひび割れ面に抵抗しうる鋼繊維の数が局所的に少ない個所が生じることによると考えられる。供試体が大きくなれば、弱面が形成される確率も大きくなるため、標準供試体の試験結果と比較して曲げ靱性が小さくなる確率が高くなると考えられる。したがって以上より、曲げ靱性の物性値 λ 、 f_{tr} に寸法効果は顕著に表れていないが、部材厚が大きい場合は配向性、混入率のばらつきの影響から、標準供試体の強度を下回る確率が大いことが示唆される。

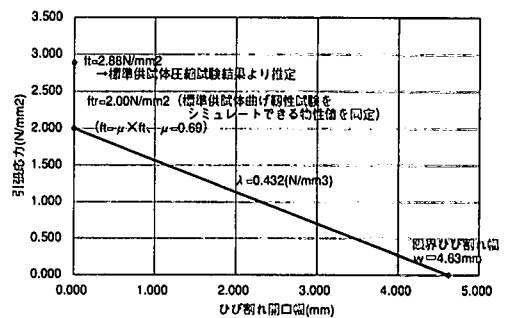


図-10 解析に用いた引張軟化曲線の仮定

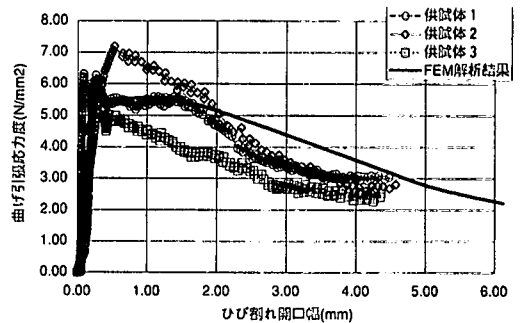


図-11 仮定した物性値による解析結果と標準供試体試験結果との比較

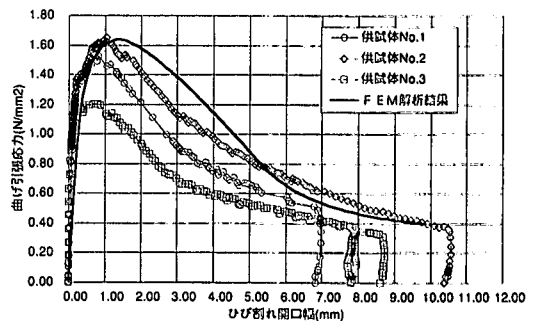


図-12 仮定した物性値による解析結果と大型供試体試験結果との比較

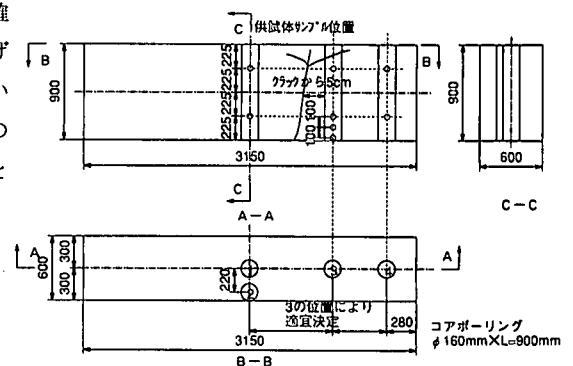


図-13 配向性、混入率試験サンプリング位置

5. 鋼繊維の配向性、混入率に関する考察

SFRC の強度特性を左右する因子として、部材中の鋼繊維の配向性、混入率のばらつきが挙げられる。ここでは、前節で用いた大型供試体からコアサンプリングを実施し、配向性、混入率について調査を実施した。

コアサンプリングの位置を図-13 に示す。各コアの概形は、80mm×80mm×80mm の立方体である。配向性試験は、図-14 に示す概念図のように、コアの XYZ 方向に X 線を照射して、コアの内部を撮影した。撮影した結果、コンクリートは黒く、鋼繊維は白く照射される。図-15 に、X 線照査結果の一例を示す。鋼繊維が撮影方向に配向していると X 線写真に射影される面積が小さくなる。このため、撮影方向の配向率が高い場合、白く射影される面積が小さくなり、黒く照射される面積が大きくなる。以上より、各方向から撮影した写真におけるコンクリート面積比と 3 方向の平均値の比率から、その方向への配向率を推定した。配向性試験結果を表-2 に示す。配向率は最大で 12% と小さく、また、特定の方向へ顕著な配向の偏りも確認されなかった。

次に、サンプリングしたコアをハンマで割り、コア中の鋼繊維を抽出することにより、鋼繊維混入率を測定した。鋼繊維混入率の度数分布を図-16 に示す。混入率の標準偏差が 0.11% と大きく、全体的にばらつきの大きい結果となった。これは、採取したコアが小さく、局所的な鋼繊維の混入量にばらつきが生じているものと推察される。

以上の配向性、混入率試験結果は、大型供試体のコンクリート打設条件での結果であり、実際の現場の施工状況とは異なり、施工条件によってはこの結果よりもばらつきが大きくなることが考えられる。トンネル覆工コンクリートの施工条件として特筆すべきことは、覆工セントルの限られた打設口からコンクリートを横流しせざるを得ないという条件が挙げられる。今回の適用範囲はインパート部のみであり、特に限られた打設口からの横流しの必要はないので（写真-2 に打設状況を示す）、大型供試体の打設条件と大きくは異ならないが、特にアーチ部のコンクリートに適用する際には、施工条件の違いについて留意する必要があるものと考えられる。

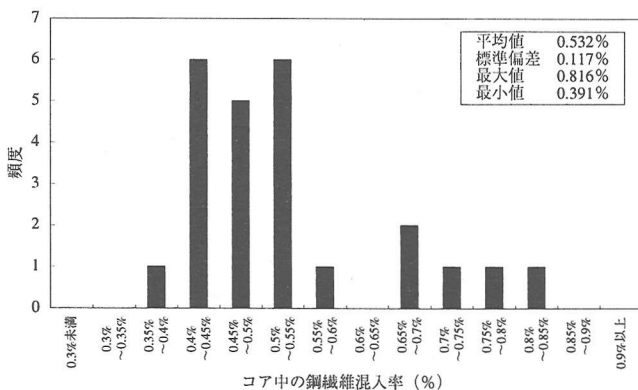


図-16 コア中の鋼繊維混入率ヒストグラム

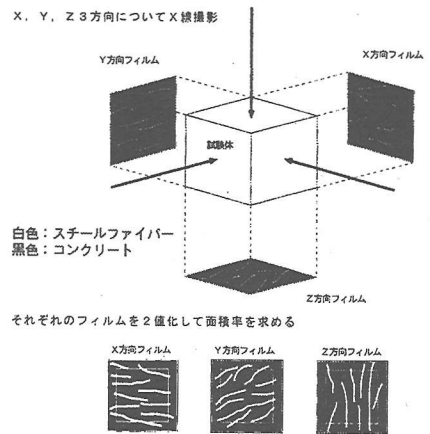


図-14 配向性X線調査方法の概要

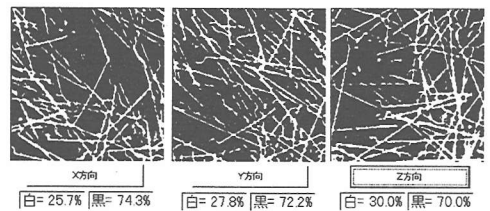


図-15 配向性X線調査結果の一例

表-2 配向性試験結果

		配向率=コンクリート面積 ÷コンクリート面積の3方向平均		
コアNo.		X方向	Y方向	Z方向
1	A	1.019	0.994	0.987
	B	1.044	0.948	1.008
	A	1.039	0.980	0.981
	B	1.031	0.978	0.991
	A	1.019	0.972	1.009
	B	1.015	1.016	0.969
	C	0.914	0.984	1.102
	D	1.088	0.878	1.029
	A	1.030	1.000	0.970
	B	1.034	0.967	0.999
	A	1.060	0.947	0.993
	B	1.122	0.971	0.907
2	C	0.992	1.006	1.002
	D	1.107	0.934	0.960
	A	1.018	1.020	0.962
	B	1.034	0.961	1.005
	A	1.063	1.010	0.927
	B	1.084	0.957	0.959
	A	0.992	0.968	1.040
	B	0.994	1.023	0.983
	C	1.077	0.990	0.933
	D	1.063	0.996	0.940
	A	1.025	1.049	0.926
	B	1.006	0.999	0.995

※配向率大→その方向に鋼繊維が多く配向
 大字：配向率が他の方向と比べて5%以上大きい
 斜字：配向率が他の方向と比べて5%以上小さい

6. まとめ

本報文で得られた知見を以下に列挙する。

1. 今回の施工条件は、覆工厚 90cm と SFRC 構造の二次覆工としては過去に実績のほとんどない条件であり、採用に当たっては限界状態設計法による部材設計を行い、部材諸元については実物大曲げ靱性試験や配向性試験などの試験により慎重に把握して決定した。
2. 標準供試体曲げ靱性試験で得られた曲げ靱性を用いて実物大強度試験を FEM 解析によりシミュレートした結果、実物大強度試験の荷重－たわみ関係に近い関係が得られた。このことは、現在、「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）」（土木学会）⁷⁾などで用いられている SFRC の曲げ靱性特性 f_{lr} 、 λ の寸法効果による影響が少ないことを示唆している。但し、実物大曲げ試験結果は、ピーク強度にばらつきがあり、今後データの蓄積を行い、部材厚が大きい場合の材料係数の設定方法などについて検討する必要があると考えられる。
3. 部材中の鋼繊維の配向性、混入率を、実物大供試体からコアを採取して測定した。その結果、配向性については一方向への偏りは確認されず、鋼繊維は部材中でランダムな方向を向いていることが確認された。混入率についてはややバラツキが大きい傾向となった。このようなバラツキが SFRC 部材の曲げ靱性特性等へ及ぼす影響を定量的に判断することは現状では困難であるが、今後同様の方法によってデータを蓄積すれば、材料物性との相関関係も明らかになってくることが期待される。

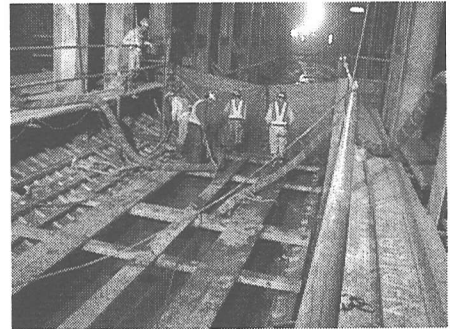


写真-2 SFRCインバート打設状況

謝辞

今回の報文の内容を踏まえた上で、覆工厚 90cm の SFRC インバートを順調かつ迅速に施工することができた。写真-2 にインバートコンクリートの打設状況を示す。最後に、SFRC の強度試験、配向性試験に協力していただいた、（株）宇部三菱セメントの各位と非破壊検査株式会社の各位に敬意を表したい。

参考文献

- 1) 藤村・山野・原田・須藤(1998)：国内初の 2 層道路トンネル 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル、トンネルと地下、第 29 号、9 号、pp. 15-25.
- 2) 藤村・山野・原田・加藤(1999)：市街地道路直下の二層道路トンネルの施工 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル、土と基礎、第 47 号、7 号、pp. 17-20.
- 3) 桜井・藤村・原田・岩野・加藤(1999)：土被りの浅い大断面トンネルにおける地山挙動の非線形逆解析、トンネル工学研究論文・報告集、第 9 巻、pp. 95-100.
- 4) 春山・原田・寺本・須藤・加藤(2001)：2 層構造トンネルにおける仮設支持杭によるアンダーピニングの設計と施工、トンネル工学研究論文・報告集、第 11 巻（投稿中）
- 5) 日本道路公団(2000)：鋼繊維補強コンクリートトンネル施工管理基準（案）
- 6) 日本道路公団(2000)：鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性試験方法（案）
- 7) 土木学会(1999)：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）
- 8) Nanakorn, Horii, Matsuoka(1996)：A Fracture Mechanics-based Design Method for SFRC Tunnel Linings、土木学会論文集、No. 532、V-30、pp. 221-233.