

京都大学	博士（工学）	氏名	秋 田 勝 次
論文題目	セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、セメント系薬液注入材の耐久性に着目し、主に注入施工後に採取した注入硬化体の耐久性試験を実施して、その性能と注入域の地山を評価し、さらに今後のセメント系薬液注入材の活用についてまとめたものであり、7章からなっている。 第1章は「序論」であり、本研究の背景について述べ、本研究の目的と論文の構成について示している。 第2章は一般的な注入の目的と設計について概説し、薬液注入材の分類および本研究の主題であるセメント系薬液注入材の硬化メカニズムと開発の変遷を述べている。 第3章はセメント系薬液注入材の既往の研究例を示しているが、その研究例は少なく、青函トンネル建設時にセメント水ガラス注入材の研究や急硬性セメント注入材の研究例はあるものの、試験的な評価にとどまっている現状を示している。 第4章は青函トンネルや中山トンネル等の幹線鉄道として主要なトンネルの注入施工事例5例を目的別に分け示しているが、セメント系薬液注入材による注入工法は、トンネルを掘削するための最終的な補助工法として適用されており、注入工法の骨格である注入材料の耐久性を評価することは、トンネル構造物等の維持管理上からも極めて重要であることを述べている。 第5章はセメント系薬液注入材のうち最も広範に使用されているセメント水ガラス注入材の耐久性を評価するにあたり、青函トンネルに適用されたセメント水ガラス注入材に着目し、室内の材料特性試験と青函トンネル坑内から採取した注入硬化体の耐久性試験および各種計測データから、セメント水ガラス注入材の長期材料特性とトンネル注入域の評価を行っている。得られた知見は次のとおりである。 1) 青函トンネル供用後、海底下の注入域に実施したボーリングコアからセメント水ガラス注入材を採取した結果、施工から30年経過した注入硬化体は堅硬な固結物となっており、強度も施工時に考慮した要求性能をみたしていることを確認した。 2) 採取された注入材の化学分析では、グラウトの骨格成分であるシリカ分、アルミナ分は、施工時の配合より30%程度大きい値を示し安定しており、硬化体の中には劣化生成物は認められない。30%の増加量については、高圧注入によりグラウトが加圧脱水作用を受けていることを試験により確認している。 3) 青函トンネル坑内における長期的な各種計測データ（湧水圧分布、湧水量、湧水の化学分析、トンネル内空変位等）を解析・評価した結果、青函トンネルの構造物および注入域は健全な状態にあることを示している。 また、セメント水ガラス注入材をより有効に活用するためには、セメントに対する高炉スラグの分量を一段と増加させることや、より微粉末化することおよび遅延剤として磷酸ナトリウムを使用することが効果的であること等を示している。 第6章はより耐久性を向上させるために青函トンネルで開発された急硬性セメント注入材を対象として、室内材料試験とともに青函トンネルや鍋立山トンネルで注入施工後に採取した硬化体から長期材料特性を評価し、以下の知見を得ている。 1) 急硬性セメント注入材は、10年の水中養生試験結果のみならず、2年の海水養生			

京都大学	博士（工学）	氏名	秋 田 勝 次
および硫酸マグネシウムに浸漬した促進試験においても安定した強度が保持されている。 2) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入施工後に採取した急硬性セメント注入材の硬化体（青函トンネル 27 年養生後、鍋立山トンネル 17 年養生後）は、掘削時の強度以上の値を示し、かつホモゲル強度に比べ大きな強度増加を示すことを確認している。この現象はセメント水ガラス注入材と同様にグラウトが加圧脱水作用を受けたためであることを再現試験により確認している。 3) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで採取した硬化体のどちらにおいても、X 線回折試験等の結果からエトリンガイトの生成が確認でき、水和生成物は安定して存在していることを確認した。 以上の結果から、急硬性セメント注入材は、水中および乾燥の影響を受けない条件下では、17～27 年以上に渡って安定した硬化性状を保持していることが確認された。 また、急硬性セメント注入材を有効に活用する方策として、遅延剤を適切に使用することにより、二重管ダブルパッカー方式や 1 ショット注入の採用が可能であることを示すとともに、急硬性セメント注入材のセメントのみならず、急硬材をより微粉末化することで有効な注入材料になることを提案している。 第 7 章は「結論」であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、トンネル等の地下構造物に適用されている注入工法の材料のうち、広く使用されているセメント系薬液注入材に着目し、セメント系薬液注入材の耐久性および注入域の地山の評価を長期的に実施して得られた知見をまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

1. セメント系薬液注入材料は広く用いられる注入材料ではあるが、耐久性についての研究例は少なく、1年材齢程度の室内試験による評価にとどまっている。
2. セメント系薬液注入材のうち使用例が多く一般的なセメント水ガラス注入材の耐久性を評価するため、青函トンネルの注入施工を取り上げ、種々の室内試験と青函トンネル坑内から採取した注入硬化体の試験・分析および各種計測データからセメント水ガラス注入材の長期材料特性と注入域の地山の評価を行った。

得られた知見は次のとおりである。

- 1) 施工から 30 年経過したグラウト硬化体においても堅硬で密実な固結物となっており、強度も施工時に考慮した要求性能を満たしていることを確認した。
 - 2) グラウト硬化体の化学分析結果では、グラウトの骨格成分であるシリカ分、アルミナ分は、施工時の配合より 30% 程度大きい値を安定して示し、硬化体の中には劣化生成物は見受けられない。
 - 3) 青函トンネル坑内における各種観測データを長期的に評価した結果、青函トンネルの構造物および注入域の地山は健全な状態であることを確認した。
3. セメント系薬液注入材のうち、青函トンネルで開発され使用が増している急硬性セメント注入材について、室内の材料特性試験および青函トンネルと鍋立山トンネルで注入施工された硬化体から長期材料特性を評価した結果、次の知見を得た。
 - 1) 急硬性セメント注入材は、10 年の水中養生試験、2 年の海水養生試験および硫酸マグネシウムに浸漬した促進試験においても安定した強度を示していることを確認した。
 - 2) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで注入施工後に採取した硬化体（青函トンネル 27 年養生後、鍋立山トンネル 17 年養生後）は、施工直後より強度増加を示していることを確認した。強度増加の現象は、グラウト施工時に加圧脱水作用を受けているためであることを再現試験により確認した。
 - 3) 青函トンネルおよび鍋立山トンネルで採取した硬化体の双方とも X 線回折試験結果等から水和生成物は安定して存在することを確認した。

以上、本論文は、セメント系薬液注入材の耐久性を明かにすることで、従来から仮設材料として位置づけられていた注入材料の耐久性能を見出したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 23 年 1 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。