

現場技術者のための  
吹付けコンクリート・ロックボルト

平成17年3月

社団法人日本トンネル技術協会

## まえがき

平成8年2月に日本トンネル技術協会から出版された「トンネルの吹付けコンクリート」は、山岳工法トンネルにおける吹付けコンクリートの設計・施工について初めて体系的に記述した解説書として、トンネル技術者に歓迎された。

同書の作成にあたった施工技術委員会・山岳工法小委員会吹付け幹事会は、平成8年4月に「支保幹事会」へと衣替えし、山岳トンネルの重要支保部材である吹付けコンクリートとロックボルトを主題材として、支保工全般について研究を進めてきた。この間、アンケート調査に基づき、実務に携わる技術者の疑問にわかりやすく答える形で吹付けコンクリート・ロックボルト技術全般について解説した「現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト Q&A」を日本トンネル技術協会誌に連載した。この成果は取りまとめられ、同じ書名で平成15年3月に協会から出版された。

今回出版する「現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト」は、「トンネルの吹付けコンクリート」の出版後約9年間における吹付けコンクリート技術の著しい進歩に対応するとともに、山岳トンネルの支保工のもう一方の主役であるロックボルトについても、新たに理論から設計、施工、施工管理にいたるまで記述し、さらに、「現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト Q&A」の成果も盛り込んで内容の充実を図った。これらの他に、トンネル技術者の関心が高い観察と計測、特殊な条件下のトンネル支保の事例、および覆工コンクリートを省略したシングルシェル・ライニングについても追加している。本書は、現場技術者はもとより工事計画・発注担当者等トンネル工事等実務に携わる全ての技術者にとって、日々の業務の参考書として十分期待に応えられるものと確信する。

平成17年3月

社団法人日本トンネル技術協会  
施工技術委員会山岳工法小委員会  
委員長 飯田 廣臣

## 施工技術委員会山岳工法小委員会支保幹事会の構成

\*印；前任者、( ) 内の所属は在任中を示す。

| 区 分 | 氏 名     | 所 属                 |
|-----|---------|---------------------|
| 幹事長 | 服部 修一   | (独)鉄道・運輸機構          |
|     | 中山 範一*  | (独)鉄道・運輸機構          |
| 顧 問 | 小野 紘一   | 京都大学大学              |
| 幹 事 | 遠藤 拓雄   | (独)土木研究所            |
|     | " 森本 智* | (独)土木研究所            |
| "   | 伊藤 哲男   | 日本道路公団試験研究所         |
| "   | 藤田 一宏   | (社)日本機械化協会施工技術総合研究所 |
| "   | 竹原 秀明*  | (社)日本機械化協会施工技術総合研究所 |
| "   | 南 将行    | 東京電力(株)             |
| "   | 倉原 隆二   | 梅林建設(株)             |
| "   | 蛭子 清二   | (株)奥村組              |
| "   | 木梨 秀雄   | (株)大林組              |
| "   | 萩原 智寿   | 鹿島建設(株)             |
| "   | 岡田 喬    | (株)熊谷組              |
| "   | 富澤 直樹   | (株)鴻池組              |
| "   | 大森 禎敏   | 五洋建設(株)             |
| "   | 吉永 正雄   | 佐藤工業(株)             |
| "   | 磯田 将    | 清水建設(株)             |
| "   | 山本 和義*  | 清水建設(株)             |
| "   | 北川 義人   | 大成建設(株)             |
| "   | 須藤 敦史   | (株)地崎工業             |
| "   | 柳 博文    | 鉄建建設(株)             |
| "   | 後藤 有志   | (株)東急設計コンサルタント      |
| "   | 熊谷 成之   | 戸田建設(株)             |
| "   | 熊谷 幸樹   | 飛鳥建設(株)             |
| "   | 岡井 崇*   | 西松建設(株)             |
| "   | 盛重 知也   | 西松建設(株)             |
| "   | 小林 雅樹   | 日本国土開発(株)           |
| "   | 中島 浩    | (株)間組               |
| "   | 三河内永康   | (株)フジタ              |
| "   | 梨本 裕    | 前田建設工業(株)           |
| "   | 山地 宏志   | 三井住友建設(株)           |
| "   | 國村 省吾   | 応用地質(株)             |
| "   | 粕谷 忠則   | (株)カテックス            |
| "   | 石田 積    | 電気化学工業(株)           |

# 現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト 目 次

まえがき  
委員会の構成

## 第1編 山岳トンネルにおける支保

|                        |      |
|------------------------|------|
| 第1章 支保の歴史              | 1-1  |
| 1.1 木製支保工から鋼製支保工へ      | 1-1  |
| 1.2 吹付けコンクリート          | 1-2  |
| 1.3 ロックボルト             | 1-3  |
| 第2章 トンネル支保工の設計と支保部材の特徴 | 1-6  |
| 2.1 トンネル支保工設計の概要       | 1-6  |
| 2.2 支保パターンの設定          | 1-6  |
| 2.2.1 標準設計の適用          | 1-6  |
| 2.2.2 類似条件での設計         | 1-8  |
| 2.2.3 解析的手法            | 1-8  |
| 2.3 トンネル支保工の修正設計       | 1-9  |
| 2.4 支保部材の特徴            | 1-10 |
| 2.4.1 吹付けコンクリート        | 1-11 |
| 2.4.2 ロックボルト           | 1-11 |
| 2.4.3 鋼製支保工            | 1-12 |
| 2.5 支保部材の組合わせ          | 1-12 |
| 2.6 覆工の位置付け            | 1-14 |

## 第2編 吹付けコンクリート

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 第1章 吹付けコンクリートの支保効果と設計            | 2-1  |
| 1.1 吹付けコンクリートの機能と効果              | 2-1  |
| 1.1.1 吹付けコンクリートの支保機能             | 2-2  |
| 1.1.2 部材抵抗による支保機能                | 2-3  |
| 1.1.3 付着の効果                      | 2-5  |
| 1.1.4 吹付けコンクリートの支保効果             | 2-9  |
| 1.1.5 支保機能と支保効果の関係               | 2-14 |
| 1.1.6 既往トンネルにおける吹付けコンクリート支保効果の評価 | 2-18 |
| 1.2 吹付けコンクリートの設計                 | 2-22 |
| 1.2.1 設計吹付け厚および設計強度              | 2-22 |
| 1.2.2 標準設計の適用                    | 2-25 |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 1.2.3 理論解析による設計                 | 2-25  |
| 1.2.4 有限要素法 (FEM) による支保効果の確認    | 2-32  |
| 1.3 インバート吹付けコンクリート              | 2-36  |
| 1.3.1 インバート吹付けコンクリートの効果         | 2-36  |
| 1.3.2 インバート吹付けコンクリートの厚さの考え方     | 2-38  |
| 1.4 鏡吹付けコンクリート                  | 2-39  |
| 1.4.1 鏡吹付けコンクリートの効果             | 2-39  |
| 1.4.2 鏡吹付けコンクリートの厚さの考え方         | 2-40  |
| 第2章 吹付けコンクリートの材料と配合             | 2-47  |
| 2.1 吹付けコンクリートに使用する材料と配合         | 2-47  |
| 2.1.1 材料と配合の概要                  | 2-47  |
| 2.1.2 セメント                      | 2-48  |
| 2.1.3 骨材                        | 2-49  |
| 2.1.4 急結剤                       | 2-54  |
| 2.1.5 混和剤                       | 2-60  |
| 2.1.6 混和材                       | 2-65  |
| 2.1.7 配合                        | 2-70  |
| 2.2 吹付けコンクリートの性状                | 2-83  |
| 2.2.1 フレッシュコンクリートの性状            | 2-83  |
| 2.2.2 硬化コンクリートの性状               | 2-84  |
| 2.3 繊維補強吹付けコンクリート               | 2-94  |
| 2.3.1 概要                        | 2-94  |
| 2.3.2 補強繊維の種類                   | 2-95  |
| 2.3.3 繊維の混合方法                   | 2-99  |
| 2.3.4 繊維補強吹付けコンクリート配合設計の基本的な考え方 | 2-99  |
| 2.3.5 繊維補強吹付けコンクリート配合に関する最近の動向  | 2-102 |
| 2.3.6 繊維補強吹付けコンクリートの性状          | 2-105 |
| 2.4 吹付けコンクリートの高強度化              | 2-110 |
| 2.4.1 概要                        | 2-110 |
| 2.4.2 配合                        | 2-110 |
| 2.4.3 配合および施工上の留意点              | 2-114 |
| 2.5 高品質吹付けコンクリート                | 2-116 |
| 2.5.1 概要                        | 2-116 |
| 2.5.2 高品質吹付けコンクリートの配合と製造        | 2-116 |
| 2.5.3 高品質吹付けコンクリートの効果           | 2-118 |
| 2.5.4 SECコンクリート                 | 2-120 |
| 2.6 吹付けモルタル                     | 2-121 |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 2.6.1 概要                   | 2-121 |
| 2.6.2 TBM坑用支保としての吹付けモルタル   | 2-121 |
| 2.6.3 トンネル補修工事における吹付けモルタル  | 2-122 |
| 2.6.4 耐火用吹付けモルタル           | 2-124 |
| 第3章 吹付けコンクリートの施工           | 2-130 |
| 3.1 概要                     | 2-130 |
| 3.1.1 吹付け方式の概要             | 2-130 |
| 3.1.2 吹付け方式の変遷             | 2-131 |
| 3.1.3 吹付け方式の選定             | 2-131 |
| 3.2 設備                     | 2-133 |
| 3.2.1 設備の概要                | 2-133 |
| 3.2.2 プラント設備               | 2-133 |
| 3.2.3 吹付け機                 | 2-138 |
| 3.2.4 急結剤供給装置              | 2-142 |
| 3.2.5 吹付け機械                | 2-145 |
| 3.3 施工                     | 2-151 |
| 3.3.1 吹付け面の事前処理            | 2-151 |
| 3.3.2 補強材                  | 2-151 |
| 3.3.3 吹付けコンクリートの運搬および吹付け時間 | 2-151 |
| 3.3.4 材料の圧送                | 2-152 |
| 3.3.5 急結剤の混合               | 2-156 |
| 3.3.6 ノズルワーク               | 2-162 |
| 3.3.7 吹付け厚さと表面仕上げ          | 2-164 |
| 3.3.8 特殊条件下における吹付けコンクリート   | 2-166 |
| 3.3.9 特殊吹付けコンクリート          | 2-169 |
| 3.3.10 吹付け作業時の安全対策         | 2-170 |
| 3.4 吹付けコンクリートの粉じん対策        | 2-172 |
| 3.4.1 概要                   | 2-172 |
| 3.4.2 発生源対策                | 2-174 |
| 3.4.3 換気（設備）による対策          | 2-176 |
| 3.4.4 集じんによる対策             | 2-178 |
| 3.4.5 暴露減少対策               | 2-180 |
| 3.4.6 粉じん濃度の測定             | 2-181 |
| 第4章 吹付けコンクリートに関する試験および管理   | 2-192 |
| 4.1 概要                     | 2-192 |
| 4.2 材料および配合に関する試験方法        | 2-192 |
| 4.2.1 材料の管理と貯蔵             | 2-192 |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 4.2.2 配合試験              | 2-200 |
| 4.2.3 計量および練混ぜ          | 2-203 |
| 4.2.4 その他の試験            | 2-205 |
| 4.3 吹付けコンクリートの性状に関する試験  | 2-205 |
| 4.3.1 コンクリートの配合を確認する試験  | 2-206 |
| 4.3.2 初期材齢時の試験          | 2-213 |
| 4.3.3 早期および長期材齢時の試験     | 2-219 |
| 4.3.4 測定結果の整理           | 2-232 |
| 4.4 繊維補強吹付けモルタルの品質管理    | 2-233 |
| 4.5 吹付けコンクリートの出来高管理     | 2-234 |
| 4.5.1 吹付け厚さのばらつき        | 2-234 |
| 4.5.2 吹付け厚さの測定方法        | 2-234 |
| 4.5.3 吹付け厚さ不足の場合の対応と留意点 | 2-237 |
| 4.6 はね返り率の測定            | 2-238 |
| 4.6.1 はね返り率の測定方法        | 2-238 |
| 4.6.2 はね返り以外の損失量        | 2-240 |
| 4.6.3 測定結果の評価           | 2-241 |

### 第3編 ロックボルト

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 第1章 ロックボルトの支保効果と設計              | 3-1  |
| 1.1 概要                          | 3-1  |
| 1.2 ロックボルトの構造                   | 3-1  |
| 1.3 ロックボルトの機能と効果                | 3-4  |
| 1.3.1 支保効果と設計に関する文献調査           | 3-4  |
| 1.3.2 ロックボルトの支保機能と効果の定性的な分析     | 3-5  |
| 1.3.3 支保機能の整理                   | 3-7  |
| 1.3.4 支保効果の整理                   | 3-11 |
| 1.3.5 支保効果に関する実験的研究事例           | 3-14 |
| 1.4 ロックボルトの設計法の分類と特徴            | 3-18 |
| 1.4.1 概説                        | 3-18 |
| 1.4.2 標準支保パターンによる設計             | 3-22 |
| 1.4.3 理論解析による設計                 | 3-25 |
| 1.4.4 数値解析による設計                 | 3-30 |
| 1.5 ロックボルトに関する解析検討事例            | 3-33 |
| 1.5.1 有限要素法 (FEM) によるトンネルでの解析事例 | 3-33 |
| 1.5.2 ロックボルトで補強された不連続面のせん断挙動    | 3-33 |
| 1.5.3 トンネルアーチ部の安定問題             | 3-34 |

|       |                    |      |
|-------|--------------------|------|
| 1.5.4 | ロックボルトの長さや密度の影響    | 3-36 |
| 1.5.5 | 鏡ボルトの支保効果解析        | 3-37 |
| 1.5.6 | ケーブルボルトの支保効果       | 3-39 |
| 第2章   | ロックボルトの材料          | 3-42 |
| 2.1   | 概説                 | 3-42 |
| 2.2   | ロックボルト芯材           | 3-42 |
| 2.2.1 | 鋼材製                | 3-42 |
| 2.2.2 | 繊維補強プラスチック（FRP）製   | 3-46 |
| 2.2.3 | その他特殊なロックボルト       | 3-47 |
| 2.3   | 定着材                | 3-52 |
| 2.3.1 | ロックボルト定着材の種類       | 3-52 |
| 2.4.2 | 定着材の性能             | 3-53 |
| 2.4   | ベアリングプレート          | 3-55 |
| 2.4.1 | 一般的なベアリングプレート      | 3-55 |
| 2.4.2 | ベアリングプレートの効果       | 3-55 |
| 2.5   | アタッチメント            | 3-56 |
| 2.5.1 | カプラー               | 3-56 |
| 2.5.2 | ロックボルトの頭部防護        | 3-56 |
| 2.5.3 | その他                | 3-58 |
| 第3章   | ロックボルトの施工          | 3-60 |
| 3.1   | 概要                 | 3-60 |
| 3.2   | 一般的な施工方法           | 3-61 |
| 3.2.1 | 穿孔                 | 3-61 |
| 3.2.2 | 不良地山での施工方法         | 3-63 |
| 3.2.3 | 湧水時の施工方法           | 3-65 |
| 3.2.4 | モルタル定着             | 3-66 |
| 3.3   | 施工手順               | 3-68 |
| 3.3.1 | 定着材式先充填型（モルタル）     | 3-68 |
| 3.3.2 | 定着材式先充填型（カプセル）     | 3-69 |
| 3.3.3 | 摩擦定着式鋼管膨張型         | 3-70 |
| 3.3.4 | 定着材式後注入型（打込型）      | 3-71 |
| 3.3.5 | 定着材式後注入型（自穿孔型）     | 3-72 |
| 3.3.6 | 繊維補強プラスチック（FRP）ボルト | 3-73 |
| 3.3.7 | ケーブルボルト            | 3-74 |
| 3.4   | 施工機械               | 3-76 |
| 3.4.1 | 穿孔機械               | 3-76 |
| 3.4.2 | モルタル練混ぜおよび圧送装置     | 3-78 |

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 第4章 ロックボルトの試験および管理         | 3-80 |
| 4.1 概要                     | 3-80 |
| 4.2 材料に関する試験               | 3-80 |
| 4.3 引抜き試験                  | 3-81 |
| 4.3.1 引抜き試験の目的             | 3-81 |
| 4.3.2 引抜き耐力の定義             | 3-82 |
| 4.3.3 引抜き耐力の特徴             | 3-83 |
| 4.3.4 ロックボルトの芯材耐力と引抜き耐力の関係 | 3-84 |
| 4.3.5 引抜き試験の管理基準の比較        | 3-85 |
| 4.3.6 引抜き試験の注意事項           | 3-85 |
| 4.4 出来形管理                  | 3-86 |
| <br>                       |      |
| <b>第4編 観察および計測</b>         |      |
| 第1章 観察および計測の位置付けと役割        | 4-1  |
| 1.1 観察および計測の目的             | 4-1  |
| 1.2 観察および計測の計画             | 4-1  |
| 第2章 観察・計測項目とその方法           | 4-4  |
| 2.1 観察調査                   | 4-4  |
| 2.1.1 切羽の観察                | 4-4  |
| 2.1.2 既施工区間の観察             | 4-10 |
| 2.1.3 坑外の観察                | 4-10 |
| 2.2 計測A                    | 4-11 |
| 2.2.1 天端沈下および内空変位測定        | 4-12 |
| 2.2.2 地表面沈下測定              | 4-18 |
| 2.3 計測B                    | 4-22 |
| 2.3.1 地中変位測定               | 4-23 |
| 2.3.2 ロックボルト軸力測定           | 4-27 |
| 2.3.3 吹付けコンクリート応力測定        | 4-31 |
| 2.3.4 鋼製支保工応力測定            | 4-34 |
| 2.3.5 盤ぶくれ測定               | 4-37 |
| 2.3.6 AE測定                 | 4-38 |
| 2.3.7 ロックボルト引抜き試験          | 4-40 |
| 2.3.8 原位置調査および試験           | 4-41 |
| 2.3.9 地山試料試験               | 4-44 |
| 第3章 観察および計測結果の管理と評価        | 4-49 |
| 3.1 観察結果の管理と評価             | 4-50 |
| 3.2 計測による管理                | 4-51 |

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 3.2.1 天端沈下および内空変位測定の管理基準値   | 4-53 |
| 3.2.2 地表面沈下測定の管理基準値         | 4-55 |
| 3.2.3 支保部材の応力測定と湧水量         | 4-58 |
| 3.3 計測結果の評価                 | 4-59 |
| 3.4 施工中の調査と試験結果の評価          | 4-60 |
| 3.5 観察および計測結果に基づく予測         | 4-62 |
| 第4章 設計および施工への反映             | 4-65 |
| 4.1 支保の修正設計                 | 4-65 |
| 4.1.1 周辺構造物の安全性評価           | 4-66 |
| 4.1.2 トンネル安定性評価             | 4-66 |
| 4.1.3 計測結果による支保工の修正設計       | 4-68 |
| 4.1.4 支保工修正設計の留意点           | 4-70 |
| 4.1.5 増しロックボルトの考え方          | 4-71 |
| 4.1.6 ロックボルト打設間隔と打設長の評価     | 4-75 |
| 4.1.7 インバートによる断面閉合          | 4-76 |
| 4.2 切羽安定の対策                 | 4-79 |
| 4.2.1 概要                    | 4-79 |
| 4.2.2 天端部の安定対策              | 4-80 |
| 4.2.3 鏡面の安定対策               | 4-79 |
| 4.2.4 脚部の安定対策               | 4-89 |
| <br>                        |      |
| 第5編 特殊トンネルの支保               |      |
| 第1章 概要                      | 5-1  |
| 1.1 NATMにおける支保の考え方          | 5-1  |
| 第2章 土被りの小さい未固結地山におけるトンネルの支保 | 5-3  |
| 2.1 基本的な考え方                 | 5-3  |
| 2.2 切羽の安定                   | 5-3  |
| 2.2.1 鏡吹付けコンクリート            | 5-5  |
| 2.2.2 鏡止めボルト                | 5-5  |
| 2.2.3 フォアポーリング              | 5-6  |
| 2.2.4 斜め打ちボルト               | 5-6  |
| 2.2.5 仮インバート（インバート吹付け）      | 5-7  |
| 2.2.6 脚部補強ボルト（パイル）          | 5-8  |
| 2.3 地表沈下の抑制と坑口部の安定          | 5-8  |
| 2.3.1 垂直縫地ボルト               | 5-8  |
| 2.4 標準標準支保パターン              | 5-11 |
| 2.4.1 設計の基本                 | 5-11 |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 2.4.2 支保工                       | 5-11 |
| 第3章 大変形地山におけるトンネル支保             | 5-14 |
| 3.1 大変形の原因について                  | 5-14 |
| 3.2 大変形地山トンネルにおける支保工の考え方        | 5-15 |
| 3.3 大変形地山トンネルの施工事例              | 5-16 |
| 3.3.1 日暮山トンネル（I期線）              | 5-17 |
| 3.3.2 飯山トンネル（富倉工区）              | 5-18 |
| 3.4.3 岩手トンネル（女鹿工区）              | 5-20 |
| 第4章 分岐部および連結部のトンネル支保工           | 5-23 |
| 4.1 設計と施工上の問題点                  | 5-23 |
| 4.2 分岐部および連結部での支保工の補強範囲         | 5-23 |
| 4.3 設計上の留意点                     | 5-25 |
| 4.4 施工上の留意点                     | 5-25 |
| 4.5 施工事例の紹介                     | 5-26 |
| 4.5.1 八風山トンネル（西工区）              | 5-26 |
| 4.5.2 狩場3号トンネル                  | 5-28 |
| 4.5.3 八甲田トンネル（築木工区）             | 5-30 |
| 第5章 めがねトンネルにおける支保工              | 5-35 |
| 5.1 基本的な考え方                     | 5-35 |
| 5.1.1 概要                        | 5-35 |
| 5.1.2 導坑                        | 5-36 |
| 5.1.3 センターピラー                   | 5-37 |
| 5.1.4 施工順序                      | 5-38 |
| 5.2 施工事例                        | 5-39 |
| 5.2.1 下至津ランプ連絡道路トンネル            | 5-39 |
| 5.2.2 阿部倉トンネル                   | 5-43 |
| <b>第6編 シングルシェル・ライニング</b>        |      |
| 第1章 吹付けコンクリート覆工の事例              | 6-1  |
| 1.1 国内事例の調査結果                   | 6-1  |
| 第2章 シングルシェル・ライニング               | 6-5  |
| 2.1 シングルシェル・ライニングの構造と特徴         | 6-5  |
| 2.1.1 シングルシェル・ライニングの構造          | 6-5  |
| 2.1.2 シングルシェル・ライニングの長所          | 6-6  |
| 2.1.3 シングルシェル・ライニングの覆工機能上の課題と対策 | 6-7  |
| 2.2 シングルシェル・ライニングの事例            | 6-8  |
| 2.2.1 海外におけるシングルシェル・ライニングの事例    | 6-8  |

|  |      |
|--|------|
| 2.2.2 国内におけるシングルシェル・ライニングの事例 .....     | 6-8  |
| 第3章 シングルシェル・ライニングの材料と施工 .....          | 6-12 |
| 3.1 シングルシェル・ライニングに用いる吹付けコンクリート .....   | 6-12 |
| 3.1.1 材料と配合 .....                      | 6-12 |
| 3.1.2 施工 .....                         | 6-13 |
| 3.1.3 吹付けコンクリート覆工の管理事例 .....           | 6-15 |
| 3.2 シングルシェル・ライニングに用いるロックボルト .....      | 6-18 |
| 3.2.1 ロックボルトの長期耐久性 .....               | 6-18 |
| 3.2.2 永久ロックボルト .....                   | 6-19 |
| 3.2.3 シングルシェル・ライニングにおけるロックボルトの施工 ..... | 6-20 |
| 3.3 シングルシェル・ライニングに用いるその他の補強材料 .....    | 6-20 |

【巻末資料】

【キーワード検索】

【広告】