

山岳トンネルにおける性能規定型発注方式の海外事例について

A basic Consideration on order of performance based design for tunnel construction project in overseas

須藤敦史*

Atsushi SUTOH

*工博（株）地崎工業 技術部（〒105-8488 東京都港区新橋5丁目11番3号）

In this study consists of the following two topics, one is a basic consideration on a performance based design for tunnels or underground structures design system, and the other is classified to the order of tunnels or underground structures using performance based design. In the former study, performance based design which cannot be used for tunnels and/or underground structures design system, because of these loads and ground pressure are unknown. In the latter one, the order of tunnels or underground structures was classified.

Key Words: performance based design, tunnel construction project, overseas

1. はじめに

本論文は最近盛んに論じられてきている公共構造物における性能設計特徴を概観するとともに、性能設計が適用が難しいとされる山岳トンネルを取り上げ、海外のトンネル構造物において示された性能規定型の発注方式の概要とスキームおよび構造・支保部材への要求性能・機能（性能指示書）の実例を紹介すると同時に山岳トンネルにおける性能規定型の発注方式における今後の課題を考察したものである。

2. 性能設計とは

性能設計とは Performance Based Design が語源であり、「性能照査型設計法」・「性能規定型設計」・「性能明示型設計」など様々な呼び方がされている。

また、一般的に性能設計の導入によって得られる効果は以下とされる。

- ① 構造物の性能を一般ユーザーに明示できること
- ② ISO に代表される国際標準化への対応
- ③ 新技術の公正な導入とコスト低減

ここで公共構造物の設計基準が性能設計に移行している背景は以下に示す 1995 年に発足した WTO（世界貿易機構）第 6 条の技術仕様がその基礎となっている。

【第 6 条技術仕様】

- ・技術仕様が国際貿易に障害をもたらしてはならない。
- ・技術仕様は性能を基準とする。

すなわち、WTO 加盟国（政府）によって調達される土木構造物は基本的に国際規格（ISO）に準拠した設計規格や技術基準等でなければならぬことを意味している。

表-1 仕様規定と性能規定の特徴

	仕様規定	性能規定
目標	概念的	明確
照査方法	規定的	自己選択
責任	公的保証	自己責任
経済性	過大になり易い	最適化が図り易い

そこで現行の設計概念ある仕様規定（確定的）と国際規格（ISO）が推奨する性能規定（確率的）の比較を表-1 に示す。

従来の仕様規定で用いられてきた代表的な設計手法である許容応力度設計法は、安全率などにより構造物の設計余裕度もしくは余裕目標を決定しているため、個々の構造物において統一的（定量）評価は難しいのが現状である。

これに対して性能設計では欧米における設計手法の主流である信頼性設計を基本とし、個々の構造物に対する安全に対して統一的かつ定量的評価が可能となり、加えて設計の照査方法などの選択が設計者に委ねられるため、設計代替案の絶対比較が実施でき、建設事業の合意形成や事業評価など容易に盛り込める設計手法である。

加えて、公共構造物における性能規定型発注方式の特徴として、使用材料や構造形式などを指定する従来の仕様型の発注方式と異なり、当該構造物に必要とされる強度・耐久性など部材などの機能・性能のみを規定するものであり、使用材料や施工方法などについても受注者もしくは施工者からの提案を受け易い設計手法である。

ここで、以下に性能規定型発注方式における特徴を記述し、従来の仕様設計による発注方式と性能設計による発注方式の概要を表-2 に示す。

表-2 仕様規定と性能規定の比較

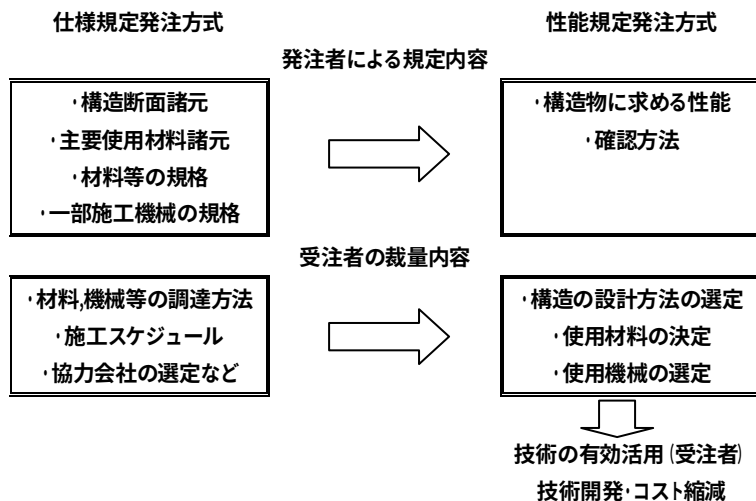


表-3 地山等級ごとの支保工の基本的考え方²⁾

地山等級	支保工の考え方
B	肌落ち防止、応力集中の緩和や地山の風化防止を目的として、吹付けコンクリートとロックボルトの施工
C I	岩塊の局所的な抜け落ち防止、地山の風化・劣化防止を目的として、吹付けコンクリートとロックボルトの施工
C II	不連続面で滑り落ちる岩塊(ゆるみ荷重)を支持してその拡大を防止することを目的として、吹付けコンクリートとロックボルトが施工。さらに不連続面に粘土を挟んだり鏡肌が見られる場合、湧水により吹付けコンクリートの付着が著しく損なわれる場合等で、岩塊の崩落の危険性がある場合には、部分的に上半の鋼アーチ支保工(H-125)を使用する。ただし一部の岩種においては上半だけの鋼アーチ支保工による変位の抑制効果は期待できないことから、変位が大きくなる場合には剛な支保で閉合する必要がある。
D I	ゆるみ荷重を直接支持してゆるみの増大を防止することおよび岩石の強度が不足する場合には支保工による内圧を地山に作用させることにより、地山内の塑性領域の発生を抑制して、内空変位の極度な増大を防止することを目的として吹付けコンクリート・ロックボルトおよび鋼アーチ支保工の施工
D II	ゆるみ荷重を直接支持してゆるみの増大を防止すること、および地山の強度が不足を支保による内圧を地山に作用させることにより、地山内の塑性領域の発生を抑制して内空変位の極度な増加を防止することを目的として、吹付けコンクリート・ロックボルトおよび鋼アーチ支保工が施工される。D II等級ではインバートによる早期閉合や変形余裕を設けることが必要

表-4 2車線道路トンネルの標準支保パターン²⁾

地山等級	支保パターン	標準断面幅員(m)	ロックボルト				吹付けコンクリート		鋼アーチ支保工		インバート		変形余裕(mm)	補強工法
			長さ(m)	間隔(m)	施工間隔(m)	施工間隔(m)	厚さ(mm)	上・下(%)	上・下(%)	アーチ間隔(m)	インバート			
B	B-a	2.0	3.0	1.5	2.0	上半120°	5	—	—	30	0	0		
C I	C I-a	3.5	3.0	1.5	1.5	上半	10	—	—	30	(40)	0		
C II	C II-a	1.2	3.0	1.5	1.2	上半	10	—	—	30	(40)	0		
	C II-b	3.0	4.0	1.2	1.2	上半	10	H125	H125	30	40	0		
D I	D I-a	1.0	3.0	1.2	1.0	上下半	10	H125	H125	30	40	0		
D II	D II-b	3.0	4.0	1.2	1.0	上下半	20	H150	H150	30	50	10		
	D II-c	3.0以下	4.0	1.2	3.0以下	上下半	20	H150	H150	30	50	10		

【長所】

a)要求性能を規定できれば、設計や施工にとらわれずに発注できる。(発注者)

b)施工管理を軽減できる。(発注者)
c)保有技術が発揮できる。(施工者)
d)コスト削減・技術開発のインセンティブとなる。(施工者)

【課題】

a)要求性能を完全に規定することが難しい構造物もある。(発注者)
b)規定性能の検査が難しい。(発注者)
c)不具合リスクが大きい。(施工者)

しかし、性能設計の山岳トンネルなどの地下構造物への適用は、周辺地山から作用する外力など支保部材に対する荷重が不明確であるなどの理由により、難しいとされており、荷重などの外力が明確でかつ構造物の性能が規定しやすい舗装工事など限られた構造物への適用や採用事例に留まっているのが現状である。

3. 山岳トンネルの設計

現在、わが国の山岳トンネルでは特殊な地山条件やトンネルを除いて、吹付けコンクリート・ロックボルト・鋼製支保工などの一次支保部材と二次覆工コンクリートで構成される NATM による設計がほとんどである。

しかし、山岳トンネルにおいては周辺地山から作用する外力など支保部材に対する荷重が不明確であるなどの理由により、周辺地盤の工学的状態に応じた標準支保パターンで設計が行われている。

山岳トンネルにおいて、この標準支保パターンが確立されてきた背景および目的は、「トンネルの設計はそれぞれの地質に応じて設計することが望ましいが、一つのトンネルをとってみてもその地質はわが国の場合にその地質は千差万別であり、これに適合する支保等の設計を一つ一つ対応させることは非常に困難でかつ複雑となる。

また山岳トンネル施工の安全性・迅速性・経済性および合理性を追求していくなかで、詳細設計があまり意味をなさない場合もある。」²⁾と記述されている。

そこで山岳トンネル地下構造物における当初設計の基本的な考え方として、類似の地山をトンネル施工時の挙動によって大まかに 4

表-5 Q システムにより支保区分³⁾

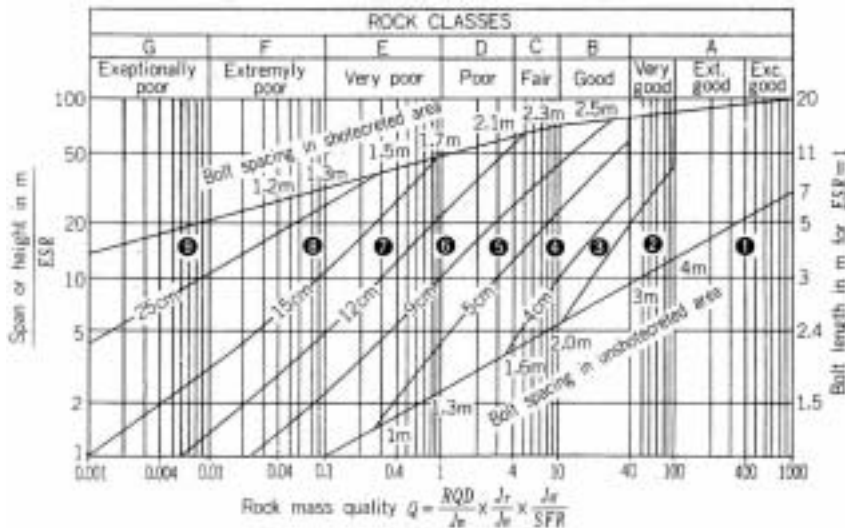


表-6 フェライナトンネルにおける吹付けコンクリートの仕様⁵⁾

吹付けコンクリートの仕様	L1	L2	L3
適用範囲	切羽 迅速な支保	二次支保 地山の安定化	後方 永久支保
吹付け厚(cm)	2~4	4~8	8~15
優先工法	湿式（ち密であること）		
骨材	0~8mm		
圧縮強度(N/mm ²)	B40/30	B40/30	B50/40
12時間強度(N/mm ²)	15	7	規定なし
試験吹付けでの強度余裕 (N/mm ²)	5~8	6~8	8~10
透水性(DIN1048)	40mm 以下	30mm 以下	20mm 以下
はね返り率(%)	10 以下		
粉じん量(mg/m ³)	4 以下		

つの工学的な岩盤のグループに区分し、さらにトンネル施工時の挙動に応じた地山等級に分類している。これらとトンネルの標準支保パターン（構造）とを対応させることにより、当初設計の効率化や合理化を図る経験的な設計体系である。

そしてトンネル坑内・坑外の観測・計測による施工段階の適切な地山評価と技術的判断に基づいて、支保パターンの修正を実施する基本的な認識に立って、個々のトンネルの実体に即応した支保パターン（構造）に変えていくことをトンネル構築の基本的な考え方²⁾としている。

ここで上記の地山等級ごとの支保工の役割を整理すると表-3、および代表的なトンネルの標準支保パターンを表-4に示す。

一方、海外においても山岳トンネルや地下構造物の設計では、周辺地山から支保部材に作用する荷重が不明確であるなどの理由により性能設計の適用は難しく、わが国と同様に地山を工学的に区分し、さらにトンネル施工時の挙動に応じた地山等級の分類とトンネル標準支保パターンとを対応させる経験的な設計体系を採用している。

山岳トンネルや地下構造物における性能設計の採用において、地山条件や設計に関する基本的な考え方やそれぞれの国情により形態が異なるが、目的とする永久構造物を構築するという基本的な考え方に基づいている。

例えば北欧のノルウェーにおけるNMT（ノルウェートンネル工法）³⁾では、表-5に示す地山分類・標準支保パターンとしてQシステム⁴⁾を使用し、シングルシェル・ライニング・システムを山岳トンネルや地下構造物における支保構造として採用している。

これに対してスイスやドイツ⁵⁾などでは、トンネルの支保構造は支保層と覆工層に区分され、さらに仕上げ層を含めた多層の支保構造で構築する基本的な考え方を採用しており、例えばスイスで施工されたフェライナトンネル第二工区では表-6³⁾に示すような3層構造の支保部材において性能設計を行っている。

いずれにおいても山岳トンネルや地下構造物の設計に対してはトンネル周辺地山が有する支保（支持）能力を期待しているため、構造物に作用する荷重がある程度明確でなければならない性能設計の適用は難しいのが現状である。

状である。

したがって、山岳トンネルや地下構造物の設計において周辺地山の状態（硬・軟）が支保部材に作用する荷重と地山支保（支持）能力を決める大きな要因であるため、性能設計を適用に際しての問題点となる所である。

加えて海外では建設されるトンネルや地下構造物の重要度により要求性能・供用期間を設定し、支保部材に対しては永久構造物として耐えうる高品質・鋼繊維補強吹付けコンクリートや腐食・発錆のないロックボルトが用いられている。

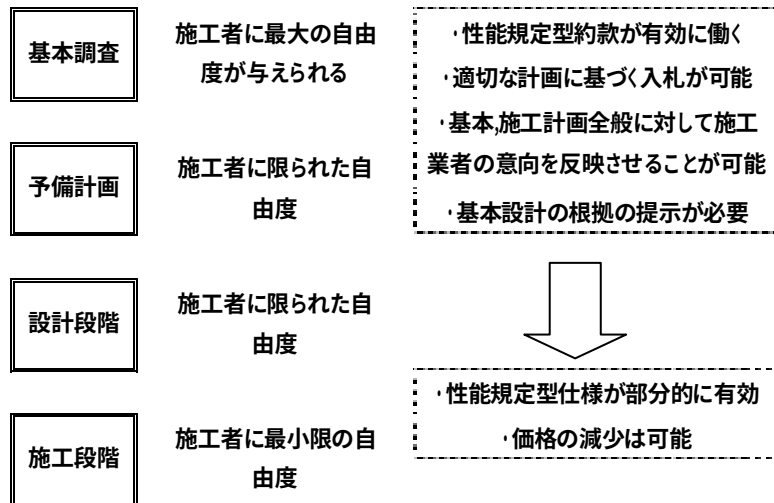
このこともNATMトンネルにおいて支保部材は仮設構造物と見なしているわが国の現行設計と異なる点である。

3. 山岳トンネルにおける性能設計

山岳トンネルなどの地下構造物における性能規定型の発注方式は国際的に数が少なく、契約・施工に関する資料はあまり残っていない。

そこで著者が収集した海外の高速鉄道や分水路ト

表-7 参加時期と性能規定の効果



ンネル建設プロジェクトで採用された性能規定型の発注方式の事例より,その要点を整理・紹介を行う。
6)など

(1) 性能規定型の発注方式の流れ

これらトンネル建設プロジェクトにおける性能規定型の発注方式におけるスキームの概要は,まず発注者から基本調査に基づいた周辺地山に関する地質データなどやトンネルの断面構成に関する基本設計(地山等級ごとの掘削方法・支保工形式あるいは覆工厚など)を提示されるとともにトンネルの要求性能を性能指示書などで指定される。

これを参考に入札参加者は指定されたトンネルや地下構造物の要求性能を満足するように技術提案を行い合理的な設計・施工・コストに関する資料を見積金額とともに提示して応札するものが一般的な入札スキームである。

ここで性能規定型発注方式の調査事例よりスキームの要点を以下に整理する。

(2) 基本概念・責任分担と入札契約方式

a)基本的な概念と責任の分担

社会資本の整備などにおける性能規定型の発注方式の基本概念は,初期段階から施工者を積極的に参加させることにより生産性の向上とコスト削減を図る“Functional Performance Specification”と呼ばれる契約方式を前提としており,その効果は表-7に示すように施工(応札)者のプロジェクトへの参加時期が早いほど多彩に発揮されている。

ここで一般的に性能規定型の発注方式は,発注者のリスクを軽減して請負者にリスクを押し付けるような印象があるが,地質など不確定要因の多い山岳トンネルの建設などでは,発注者は地質・岩盤・湧水情報のすべての提供を保証し(この情報は一般構造物における外力・目標性能のようなもの),施工者は計画・施工についての責任すべてを負うことで双方公平なリスク分担を行えるスキームを構成することが重要な点である。

b)契約形態

性能規定発注方式では契約形態“Lump Sum”(総価契約)が基本とされているが,トンネルのような特殊な構造物については,地質・湧水等の不確定要因およびリスクを有しているため,総価とともに地山等級ごとの掘削単価による併用契約がプロジェクトを円滑に進めるために必要であると言える。

また工事代金の支払はプロジェクトの進捗に併せて行われる(1ヶ月~12ヶ月ごとの出来高払い)のが一般的である。

c)従来方式との相違事項

性能規定型の発注方式において,その契約を最大限に発揮するためには,以下に示す事項を留意することが必要である。

- ①発注者の要求事項が明確であること。
- ②予備計画段階から施工者を参加させる。
- ③計画に必要な精度の高い(地山状況など)データを提供すること。
- ④計画・施工に関するリスクは施工者,地質に関するリスクは発注者が負う。
- ⑤性能指示は機能・性能面(用途・機能・費用・工期)のみを規定した性能指示書(発注者が作成)により行われる。
- ⑥発注者・設計会社・監査会社・施工者が一体となりプロジェクトを遂行すること。

4. 性能規定型の発注方式

トンネル建設のように比較的金額の大きな公共事業では国際競争入札が一般的であるが,その細部ではそれぞれの国の諸事情によって若干異なる入札方式が採用されているのが現状である。

ここで性能規定型の発注方式を採用する公共事業は,その規模や金額が比較的大きいため,事業資金・技術面で定められた基準を満足した企業(もしくは企業体)に入札資格を与えている(指名競争入札に近い)のが現状である。

(1) 欧米においては基本的に性能規定型の発注工事はターンキー工事もしくは Public Private Partnership : PPP, Private Finance Initiative : PFI 事業が多いため,図-1に示す発注者・第三者機関(エンジニア)・施工者体制で事業を実施する。また事業契約後のプロジェクトリスクは,基本的に施工計画を初めとしてあらゆるものについて施工者側が負うが,意見が対立した場合には第三者機関(エンジニア)によって原因審査がなされ,三者の協議事項となる(たとえば5)。

(2) 発注者の提供資料

公募時に発注者が提供した資料は以下である。

a) 基本調査資料

- ①構造物のリストと計画申請用の基本設計
- ②地質および山岳地形の特徴などを記述した報

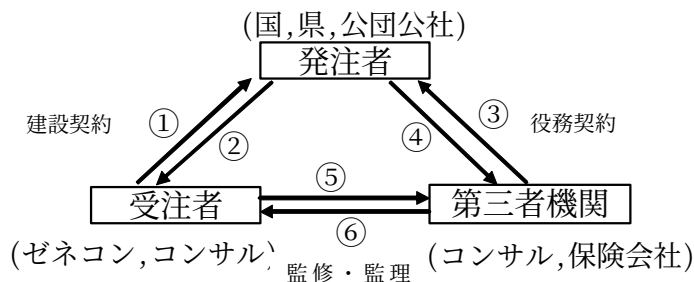


図-1 欧米における一般的な施工管理体制

告書および想定湧水量

b) 一般性能指示書（Appendix I 参照）⁴⁾

c) トンネル概算費用資料

①地山等級別の掘削単価

②湧水増加による追加費用

③作業休止補償費

d) 特別契約条件（契約変更について）

ここで、施工中に地山等級の変更が伴った場合（発注者が提示した地質や湧水量と異なった場合は監査スタッフと協議）、契約時の地山等級ごとの掘削単価を基本として工事の全体金額が変更される。

(3) 応札者の提供資料

入札時に応札者が提供する資料は以下である。

a) 性能記述書類

①過去の実績に基づく施工計画とそれらの根拠となる詳細設計を含む技術提案書

具体的には、提供された地質データに基づき地山条件および湧水量を判断し、掘削方法・地山等級・支保パターン・工程および構造的な変更・VE 提案などを計画・設計する。

②地山等級別の掘削単価、湧水量増加による追加掘削費用および作業休止補償費

トンネル概算費用の算出根拠資料として提供された様式に単価を記入して提出する。

b) 入札価格

性能記述書類（技術提案書・掘削単価表）に基づいて包括的総価を提出する（総価・単価入札）。

c) 建設プロジェクトにおける資金計画

プロジェクト全体の資金計画とともに入札企業（もしくは企業体）の財務状態の書類を提出する。

(4) 予定価格および落札者の決定

建設プロジェクトの予定価格は基本的にはないが、発注者は計画申請用の基本設計により落札採点用の標準的な価格を設定する。

また落札者の決定は、学識経験者から構成される技術評価チームによる評価と発注者からの提示図面より標準的な価格評価がなされ決定されている。

なお採点基準（たとえば点数配分や算定式）は事前に公表され、採点結果はすべて公開されている。

5. 性能規定型の発注工事の施工

契約後のプロジェクトリスクについては工事の契約形態で若干の差異が生じるが、基本的に施工計画

を初めとしてあらゆるものについて施工者側にあるが以下に示す事項は協議事項となる。

(1) 地質・湧水に関するリスクおよび設計変更

地質および湧水に関するリスクは基本的に発注者の責任であり、地盤が予想以上に悪い場合や湧水量が予想以上に多い場合など、契約時に提示された条件と実際が異なった場合には、監査スタッフと協議の上変更がなされる。

なお、変更協議が進まない場合には、地質調査の専門会社やコンサルタンツなどの第三者の審査により判定される。

(2) 要求性能の確認（検査）

施工された構造部材の性能の確認は、通常は発注者の専門家により行われる。具体的には二次覆工前に認可された支保パターン（吹付けコンクリート厚、ロックボルト長さ・本数）と施工状況を検査して承認される。なお規定を満足しない場合には、詳細な規定により補修を行わなければならない。

(3) その他

周辺地山が悪い場合の工事遅延は 3 ヶ月から 6 ヶ月程度認められ、遅延に対するペナルティーは契約金額の 0.025%/日程度が設定されている。なお施工に関する発注者の各種書類の停滞および指示の遅れは発注者による工事の遅延として工期の延伸となる。

またトンネル構造物の保証期間は 3 年～5 年程度設定され、請負金額の 5%程度を銀行保証として拠出差ししなければならない。

保障期間に何らかの問題が生じた場合には、補修後さらに保障期間が据え置かれる。期間中に何もなければ保証は終わり、保証金は戻ってくる。

ここで双方に意見が対立した場合には、第三者機関によって、原因の審査がなされる。

5. まとめ

山岳トンネルや地下構造物の建設における性能規定型の発注方式は、上述したように技術面（地質・湧水の不確実性や構造物の性能記述の難易性など）および契約面（責任分担やリスク処理など）において整備すべき法律や解決すべき問題が数多くあることも事実である。

しかし、性能規定型の発注方式は構造物の耐久性や LCC を重視した使用者・利用者の立場に視点を置いた設計・施工計画・管理・維持管理が出来る発注・契約システムとして山岳トンネルや地下構造物を含めた一般土木構造物に広く採用されるものと考えられる。

【Appendix I : 一般性能指示書の記載例（抜粋）】

1) 一般事項

・地質データの正当性は発注者の責任、トンネル

施工方法の選択および施工区分の設定は受注者の責任である。

2)掘削工程

- ・掘削工程は受注者が計画し、遅れそうな場合発注者の要請により受注者は短縮を実施する義務がある。

3)排水計画

- ・受注者は排水量の予想および実績を記録し、入札資料で申告された基準湧水量と対比すること。

4)トンネル建設

①トンネル掘削

a.トンネル掘削方法

- ・掘削方法（機械、爆破、併用）の選択は、地山状況に適應するように受注者が行い、発破計画は専門家により受注者が行い、発注者の承認を行うこと

b.地山等級分類（上下半別の進行長）

- ・受注者は切羽状況と力学的解析により安全対策を決定し実行すること

- ・地山等級と進行長は発注者の同意が必要であり、変更が必要な時受注者は発注者に証明すること

- ・承認された地山等級は厳守すること

c.支保部材およびその厚さ

受注者によって予め決められる支保部材厚は、内空変形余裕量=0cm、覆工厚さ $\geq 30\text{cm}$ 、吹付けコンクリート厚さ $\geq 15\text{cm}$ の条件を満足すること

d.予想不可で不可避の地山等級追加および崩落等以下のような地山等級の増分のみ補償される

- ・インバート・アーチ・側壁の支保されない範囲に発生する場合と崩落体積量つまり空洞幅 $\times 1$ 進行長 $\times$ 平均空洞深さ（30cm）を超える場合

e.切羽および断面検測と処理

- ・切羽は受注者が1発破ごとに検査・記録すること

- ・作成した記録は発注者に提出すること

- ・吹付けコンクリートは3cmまでの断面突出物については覆工コンクリートの最低厚さが30cm以上あれば処理する必要はない。

②施工方法

a.一般事項

- ・支保工は全体でアーチを形成すること

以下に挙げる措置は設計最低限の要求である

- ・地山掘削過程と関連する安全対策、措置時期と保護手段の選択は受注者が自らの責任で静力学的な算定と認可された施工計画・方法に基づいて地山状況や地質調査の結果を考慮して行うこと

- ・実施された支保工はすべて記録し、記録資料は発注者に提出すること

b.吹付けコンクリート

- ・品質検査の証明は発注者に提出し、添加剤・急結剤の追加は最小限にし、飲料水保護地域ではアルカリ分の少ないセメント（BE剤は付加）を使用すること

- ・吹付けコンクリートにひび割れが生じた場合、原因を解明し、状況によっては適切な措置をとること（ただし吹付けコンクリートは構造上最低15cmの厚さを確保）

- ・吹付けコンクリートの構造上最低限の鉄筋はコンクリート用金網を使用する。金網の継ぎ目は両方の網目が一部重なるように使用すること

c.ロックボルト

- ・ロックボルトの定着は、すぐに固まるロックボルトモルタルを使用し、遅くとも切羽（中心部）後方2進行長分ける。ロックボルトは少なくとも150kNの耐力を有するものを使用すること

- ・ロックボルトはできるだけ放射状に設置し、全体の表面配列を考慮し、上、下半部は 3m^2 つきロックボルト（L=4.00m）1本とする

③覆工コンクリート

a.一般事項

- ・覆工コンクリートは防水性を有し、さらに現状に応じて水圧耐久構造とすること

- ・地下水位が地山内で復元されるので覆工コンクリートは地圧の他に起こりうる最大水圧に対しても算定する。それに応じて目地部も密にかつ水圧に耐えうように形成されること

- ・コンクリートのひび割れを減少されるために、覆工コンクリートと吹付けコンクリートのせん断力を最小限にすること

b.作業区間とコンクリート打設長

- ・覆工コンクリート作業あるいは鉄筋組立て作業は、吹付けコンクリートに対する要求が適切であると証明された後に施工し、最大ブロック長さは防水コンクリートの場合名は10.00m、防水シートの最大施工長さは12.50m。

c.コンクリートに課せられる要求事項

- ・コンクリートは規格を遵守し、坑口部では入口から最低200mの長さで、高度の凍結抵抗性を持つコンクリートを施工すること

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002，10
- 2) 日本道路公団監修：設計要領第三集第6編トンネル(1)トンネル本体工，道路厚生会，pp66，1997，10
- 3) 五十嵐隆浩，河村巧：ルウェートンネル調査概要報告，北海道土木技術会トンネル研究委員会，トンネル技術研究発表会論文集，pp81-92，2005。
- 4) Bernhard R.Maidl: Steel Fiber Reinforced Concrete, Ernst & Sohn, pp. pp.189-203,1995.
- 5) Neubaustrecke Köln-Rhein/Main Brücken und Tunnel(Die Bahn),DB bau Project GmbH.
- 6) 須藤敦史，河村巧，三上隆：ルウェーに見るトンネル建設プロジェクトにおけるパブリック・プライベート・パートナーシップについて，第60回年次学術講演会，VI-302，2005，9。