トンネル工学報告集第17巻/pp. 329-333, 2007. 11

開削トンネルの耐久性能に関する基礎的研究

A STUDY ON DURABILITY OF THE EXCAVATION TUNNEL

Nguyen Duc Long[1]・大澤拓洋[2]・岩波 基[3]
Nguyen Duc Long・Takuhiro OSAWA・Motoi IWANAMI

[1]学生会員　長岡工業高等専門学校　環境都市工学科
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町８８８番地)
E-mail: ci17371f@st.nagaoka-ct.ac.jp
[2]正会員　長岡工業高等専門学校　環境都市工学科
[3]正会員　博（工）　長岡工業高等専門学校　環境都市工学科　准教授

Because neighboring conditions are complicated as for us, We cannot evaluate the durability of the long term of the excavation tunnel adequately. A permissible stress degree design method is used by the design of the excavation tunnel . However, a limit state design method is introduced in the other fields.
Therefore we confirmed the durability of the excavation tunnel. As a result we extracted a problem that I did collation of the durability of the excavation tunnel by a performance design method.

Key Words : *excavation tunnel ,durability*

１．はじめに

1998年に改訂されたISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」では，性能設計を用いることを規定し，その設計照査には限界状態設計，または信頼性設計法を採用することを定めている．しかし，トンネルの分野では，地盤条件や施工条件に応じて覆工に作用する外力(土圧)が複雑に異なることや，その用途に応じてトンネル構造物の内外の環境が様々で覆工の長期耐久性能を適切に評価できないことから，許容応力度設計法が採用されているのが現状である．開削トンネルの設計に限界状態設計法の導入が試みられているが，それに用いる部分安全係数は実測データに基づいて合理的には定められていない．特に，耐久性能については実験値を極端に安全側の評価をした照査が行われているのが現状である．そこで本報告は，開削トンネルについてコンクリート標準示方書に準じた耐久性能照査の問題点を明確にし，今後の研究課題についてまとめたものである．

２．耐久性能照査の現状

2.1. ひび割れに対する検討

「トンネル標準示方書（開削工法編）2006年制定[1)]」では開削トンネルの耐久性能照査は，算定した曲げひび割れ幅が，トンネルの使用目的や環境条件そして部材の条件から定めた許容ひび割れ以下となることを確認して行う．この検討は，耐久性能だけでなく水密性能や美観についても構造物の品質を確認する上で重要な検討である．しかし，供用年数に対応した耐久性能を設計し，開削トンネルの仕様を決定する照査方法とはなっていない．

2.2. コンクリートの中性化に対する検討

「トンネル標準示方書（開削工法編）2006年制定[1)]」においてコンクリートの中性化深さの設計値を求める式は記述されており，照査が具体的にできる．しかし，コンクリートの水セメント比が50%以下で，かぶりが30mm以上ある場合には中性化の検討を省略することができる．したがって，一般的な開削トンネルでは60mm以上かぶりを確保しているので，こ

の検討によって構造物仕様を検討することはないと考えられる．

2.3 コンクリートの塩化物の影響に対する検討

「トンネル標準示方書（開削工法編）2006年制定[1)]」では，外部から塩化物の影響を受けることは想定しておらず，東京都心の東部地区における開削トンネルのように外部から塩化物が作用する場合には「コンクリート標準示方書（施工編）2002年版[2)]」に準じて検討することとなっている．

以上のことから，開削トンネルについての耐久性能の検討では地下構造物の特性を十分に考慮した検討方法が確立されていないと考えられる．

3．検討条件

3.1. 耐久性能に対する検討方針

（1）ひび割れ幅の検討

設定した条件にしたがい，断面力と鉄筋応力度を算出してひび割れ幅の検討を行う．

（2）中性化に対する検討

水セメント比が50％で最低の純かぶりが30mm以上あるため，中性化に対する検討は省略する．

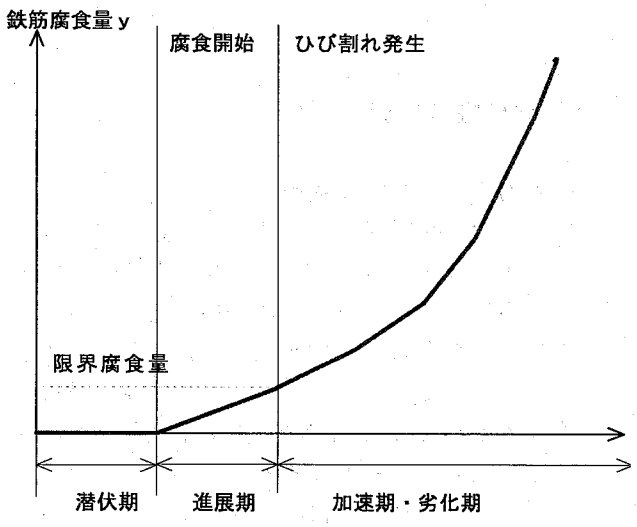

図-1　劣化予測モデル

（3）コンクリート標準示方書に準じた塩化物の影響に対する検討

「コンクリート標準示方書（施工編）2002年版[2)]」に定められた塩化物の影響に関する検討は，Fickの拡散方程式を用い，鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界に達していないことで確認する．つまり，

鉄筋位置の塩化物イオン濃度＜腐食限界濃度

であることを確認する．

このとき，腐食限界濃度は1.2kg/m^{3}と設定されている．この検討は図-1の潜伏期に対するものである．

（4）進展期を考慮した塩化物の影響に対する検討

開削トンネルは地上構造物よりも一般的にかぶりが大きく，湿潤状態であるため酸素供給量が比較的少ない．そのため，通常，潜伏期に比べて問題とならないほど短いと考えられている図-1の進展期を考慮してもよいと考えた．

3.2. 検討条件

（1）形状寸法

図-2の2連の開削トンネルの標準断面について対象として検討を行った．構造寸法は表-1にまとめた．

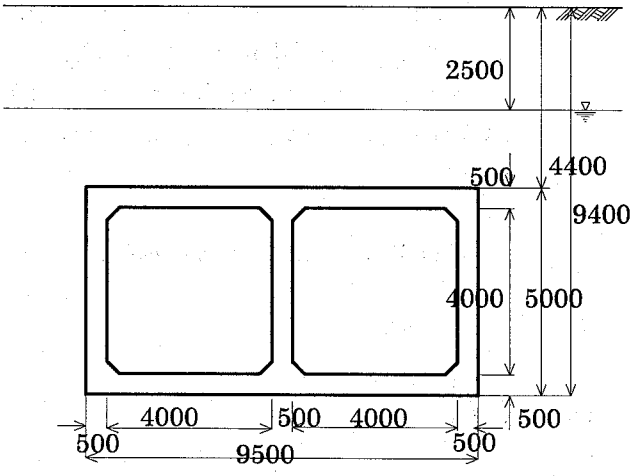

図-2　標準断面図（単位mm）

表-1　構造寸法

高さ	5000
幅	9500
内空	4000×4000
上床版厚	500
底版厚	500
外壁厚	500
内壁厚	500
ハンチ	300×300

（2）地盤条件

設定した地盤条件を，表-2に示す．

表-2　地盤条件

土層	砂
層厚(m)	15.0
地下水位(GL-m)	2.5
単位体積重量(kN/m^3)	19
内部摩擦角 ϕ	30
粘着力c(kN/m^2)	0.0

（3）部材条件と配筋

コンクリートと鉄筋の諸元は表-3のような一般的な値とし，表-4の配筋を設定した．

表-3　物性諸元

コンクリート	
設計基準強度 N/mm^2	24
弾性係数 kN/mm^2	25
単位体積重量 kN/mm^3	24.5
鉄　筋	
鉄筋の種類	SD345
降伏強度 N/mm^2	345
弾性係数 kN/mm^2	200

表-4　標準部配筋

	上床版		底　版	
	異形鉄筋径 D	鉄筋間隔	異形鉄筋径 D	鉄筋間隔
外主鉄筋	35	200	25	200
外配力筋	19	200	19	200
純かぶり	63.5	-	68.5	-
内主鉄筋	22	200	22	200
内配力筋	16	200	16	200
純かぶり	73	-	73	-
	外　壁		内　壁	
	異形鉄筋径 D	鉄筋間隔	異形鉄筋径 D	鉄筋間隔
外主鉄筋	25	200	16	200
外配力筋	19	200	13	200
純かぶり	68.5	-	79	-
内主鉄筋	19	200	16	200
内配力筋	13	200	13	200
純かぶり	77.5	-	79	-

（4）荷重条件

表-5の荷重条件で検討を行った．

表-5　荷重条件

上載荷重(kN/m^2)	10.0
地下水の単位体積重量(kN/m^3)	10.0
静止土圧係数 K_0	0.5

（5）環境条件

一般的な環境条件を今回の検討では採用した．環境条件を，表-6に示す．

表-6　環境条件

鋼材の種類	環境条件	
異形鉄筋	一般の環境	腐食性環境
異形鉄筋	0.005c	0.004c

4．検討結果

4.1. ひび割れ幅の検討

開削トンネルについて通常の骨組み解析で断面力を算出し，表-4に示した配筋についてひび割れ幅の検討を行った．各部材の最大曲げモーメントを表-7にまとめ，表-8にひび割れ幅の検討結果を一覧にして示した．なお，すべての断面でひび割れ幅の検討によって定まる鉄筋量が，許容応力度を確保するために必要な鉄筋量より多い結果となった．

表-7　断面力の総括

		最大曲げモーメント(kN･m)	軸　力 (kN)
上床版	外側	240.8	167.4
	内側	91.1	167.4
底　版	外側	163.9	264.8
	内側	119.5	264.8
外　壁	外側	127.7	211.3
	内側	69.6	211.3

表-8　ひび割れ幅検討結果

		上床版		底　版		外　壁	
		外側	内側	外側	内側	外側	内側
主鉄筋応力度	N/mm²	131.4	90.8	131.7	100.0	102.0	62.3
純かぶり	mm	63.5	73	68.5	73	68.5	77.5
鉄筋間隔	mm	200	200	200	200	200	200
鉄筋径	mm	35	22	25	25	25	19
k1		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
k2		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
k3		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
弾性係数	N/mm²	200000	200000	200000	200000	200000	200000
最大ひび割れ間隔	mm	490.1	528.7	519.8	519.8	519.8	537.6
ひび割れ幅	mm	0.32	0.24	0.34	0.26	0.27	0.17
環境条件		一般的	腐食性	一般的	腐食性	一般的	腐食性
許容ひび割れ幅	mm	0.32	0.29	0.34	0.29	0.34	0.31

4.2.塩化物の影響に対する検討（潜伏期）

塩化物の影響に対する検討では，塩化物イオンの供給量が同じである場合，かぶりが小さくてひび割れ幅が大きい方が鉄筋位置の塩化物イオン濃度が上がりやすい．そこで，本検討では上床版の外側について計算を実施した．なお，表面イオン濃度はコンクリート標準示方書（施工編）[2]に記載されているもっとも小さい値（1.5kg/m³）を用いた．トンネル内側では漏水に伴って流入した塩化物イオンが濃縮する可能性もあると思われる．

検討結果は純かぶり63.5mmでも供用年数50年では鉄筋位置の塩化物イオン濃度が1.18kg/m³となり，鉄筋腐食が生じる可能性があるという結果となった．

また，このかぶりで鉄筋腐食が発生すると予測される年数は40年という結果となった．

地下鉄銀座線や地下鉄丸ノ内線など建設から40年以上経たトンネル躯体でも，利用しているときに観察するとひび割れが見つかるものの耐久性能において問題となる箇所を発見したことはない．

電力の海岸部における洞道は劣化が進んでいる開削トンネルが多くあると聞いているが，今回の計算条件よりずっと厳しい条件下ではないかと想像される．

表-9　塩化物の影響に対する検討結果

		コンクリート示方書[2]
		1.0km程度
設計拡散係数 Dk	cm²/年	1.49
セメント水比 W/C		0.50
構造物係数 γi		1.10
構造物係数 γcl		1.30
コンクリート材料係数 γc		1.00
Dpの安全係数 γp		1.20
Dk	cm²/年	1.36
最大ひび割れ間隔	mm	490.05
ひび割れ幅	mm	0.32
許容ひび割れ幅	mm	0.32
純かぶり	mm	63.5
耐用年数 t	年	50
表面イオン濃度 C_0	kg/m³	1.5
塩化物イオン濃度 C_d	kg/m³	1.18
限界値 C_{lim}	kg/m³	1.2
$\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$		1.08
限界に達する年数	年	40

4.3.進展期の検討

進展期は鉄筋の腐食が開始された時刻を起点として鉄筋腐食による体積膨張で腐食ひび割れが発生するまでと定義される.

鉄筋の腐食速度の推定式も腐食ひび割れ発生限界の設定方法もそれぞれ数種類あるが，腐食速度は枡田らの式[3]を用い，ひび割れ発生時の限界腐食量を5mg/cm² [4]として腐食ひび割れまでの年数を推測すると約18年となる.

ただし，その他の式を使うと塩化物イオン濃度が小さくかぶりが大きいので，進展時期が160年という結果となるものもあった.

5．おわりに

今回開削トンネルの耐久性に関する試計算を行った結果以下のことがわかった.

・設計条件にもよると思うが，開削トンネルの場合，許容応力度で定まる鉄筋量よりひび割れ幅の検討で定まる値の方が大きい可能性がある.
・現在の照査方法では，開削トンネルの耐久性能評価のうち中性化を検討する必要性がほとんどないと思われる.
・塩化物イオン濃度の照査は通常の場合，極端に安全側の評価になる可能性があるように思われる.
・進展期の腐食速度評価については多くの課題があるが，開削トンネルのような地下構造物においては，腐食ひび割れを耐久性能の限界としてもよいと思われる.
・地下構造物における耐久性能評価における表面塩化物イオン濃度や拡散係数のデータを収集する必要がある.

参考文献

1) トンネル標準示方書（開削工法編）2006制定,土木学会
2) コンクリート標準示方書（施工編）2002制定,土木学
3) コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム,日本コンクリート工学協会,pp.237,2004.10.8
4) コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム,日本コンクリート工学協会,pp.204,2004.10.8