

開削トンネルに使用するコンクリート配合の検討

STUDY ON MIX PROPORTION OF CONCRETE USED FOR CUT-AND-COVER TUNNELS

大門信之¹⁾、名古屋菊夫²⁾、吉村正²⁾、平野隆²⁾、倉田知己³⁾

Nobuyuki OOKADO, Kikuo NAGOYA, Tadashi YOSHIMURA, Takashi HIRANO, Tomoki KURATA

The Teito Rapid Transit Authority (TRTA) has decided to revise the proportion of materials used in concrete mix for cut-and-cover tunnels to improve the durability of structures while taking into account life cycle costs. The TRTA intends to reduce the water content per unit volume of concrete to reduce surplus water that causes the hydration reaction that is a major factor causing cracks.

The applicable method may consist of the laboratory tests and test construction were conducted for a comparative study that also considered the current situation regarding the use of aggregates. In consequence, it was decided to change the mix proportion from conventional concrete using a normal air-entraining and water reducing admixture to one using a high-range water-reducing and air-entraining admixture.

Key Words: durability, water content per unit volume, high-range water-reducing and air-entraining admixture, crack control, shrinkage strain

1. はじめに

地下鉄のトンネルや駅では開削トンネルを広く採用している。帝都高速度交通営団（以下営団）として戦後建設した開削トンネルの延長は約 100km に及び、築造後約 50 年を経過している構造物もあるが、構造上の欠陥が生じるなどの致命的な問題は生じていない。このため、開削トンネルに使用するコンクリート配合は、戦後、昭和 26 年の丸の内線の建設に伴いレディーミクストコンクリートを初めて採用して以来、大改訂することとはなかった。

一方、近年建設段階における経済性のみでなく、ライフサイクルコストを考慮した合理的な社会資本の形成が強く求められている。そこで、営団では構造物の耐久性向上を目的としてコンクリート配合の見直しを行った。既設構造物のコア採取やコンクリート配合の現状調査を踏まえた配合変更方針から、室内試験をもとに配合変更案を策定し、さらに、現場試験施工によりその効果を確認して、今後開削トンネルで使用するコンクリートの配合変更を実施した。

本文は、その経緯と検討内容および結果について報告するものである。

2. 従来のコンクリート配合の特徴

営団で使用されている従来のコンクリート配合は、地下構造物であることに着目しているため、設計基準強度と最大水セメント比を次のように規定していた。

-
- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
 - 2) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部
 - 3) パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部

2.1 設計基準強度

トンネルの場合、地上に建設される構造物と比較して施工空間が限られており施工環境が悪い。このため、打設したコンクリートの締め固めや充填が不十分であると所要の強度が得られない可能性がある上、打設されたコンクリートの状況確認が困難である。従来配合ではこれらを考慮して、呼び強度 24N/mm^2 に対し 10% の余裕を持った 21N/mm^2 に設計基準強度を規定していた。

2.2 最大水セメント比

地下鉄のトンネルは比較的地下水位が高い場所に建設されることが多く、トンネルは地下水位以下となるのが一般的である。したがって、透水、透湿により構造物の耐久性が影響を受けると考えられ、使用するコンクリートは水密コンクリートとして密実なコンクリートとしなければならない。このため、最大水セメント比を 55% に指定していた。

3. 構造物およびコンクリートの現状調査と配合変更の方針の立案

既設構造物に使用されているコンクリートの性状を把握すべく、供用中の構造物ではコア採取、供用前の構造物ではコア採取およびクラック調査を行った。

この結果、東京オリンピックが開催された昭和 39 年（経過年数 36 年）前後を境に圧縮強度に差はあるものの、次に示す調査結果より、コンクリートの劣化は軽微であるが、耐久性向上の観点からひび割れ本数や幅の減少等のひび割れの抑制が必要であると考えた。

①構造上問題があるような欠陥は生じていない。

②呼び強度以上の圧縮強度が充分確保されている。したがって、施工環境が悪いにも係わらずコンクリートの強度不足は生じていない。（図 1 参照）

③中性化深さは最大 45 年経過したコンクリートでも 10mm 以下と、土木構造物で通常いわれている値（40 年経過時で 16mm）よりも小さく、鉄筋の腐食も認められなかった。これは、水セメント比の指定を行い密実なコンクリートとしていることによると考えられる。（図 2 参照）

④供用前の構造物における観察によると、ひび割れがトンネル横断方向に発生している。その最大幅は ACI 基準における土中の許容最大ひび割れ幅にあたる 0.3mm である。また、脱型時には既にひび割れの大多数が発生しており、ひび割れの多くは若材齢時に発生するものと考えられる。

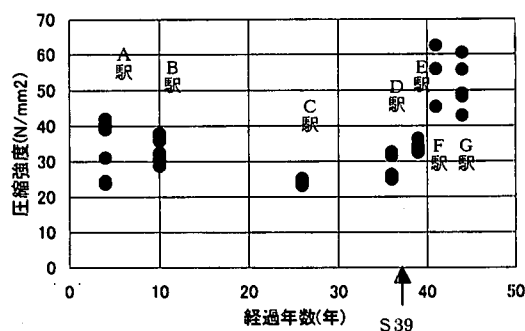


図 1 経過年数と圧縮強度

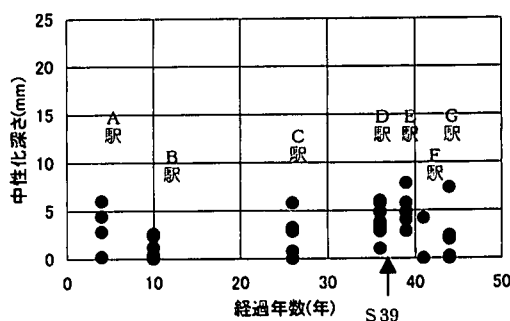


図 2 経過年数と中性化深さ

コンクリートのひび割れは、主にセメントの水和反応における余剰水が原因となるコンクリートの収縮に起因する。一方、営団で使用するコンクリートの単位水量は、10 年前に 150kg/m^3 台であったものが最近では

10～20%増加し、165 kg/m³を超えるものとなっている。配合の変更は、ひび割れの抑制による耐久性の向上を目的として、従来配合の単位水量を減少させることを方針とした。

なお、配合の変更にあたり、現状構造物の調査結果を踏まえ、①設計基準強度は呼び強度と一致させる、②最大水セメント比の変更は行わない、こととした。

4. 単位水量減少方法の検討

4.1 混和剤による単位水量減少

混和剤を変更することにより単位水量を減少する方法について検討した。

プレーンコンクリートを基準に、混和剤の種類を変えて単位水量をそれぞれ 12%減水（従来配合）、15%減水、18%減水したコンクリートの基本性状を、室内試験により把握した。使用材料を表 1 に、試験結果を表 2 に示す。なお、いずれのコンクリートも設計基準強度 24N/mm²、スランプ 15cm、水セメント比 55%とした。

①凝結時間は、減水率による明確な差は生じなかった。いずれの CASE の始発時間・終結時間でも実際の工事への適用には問題ない。

②ブリージング量は減水率が高くなるほど改善され、CASE1 での値 0.22cm³/cm²と比較して CASE2 では 0.14 cm³/cm²、CASE3 では 0.08 cm³/cm²と、各々 36%，64%小さくなり、分離傾向が減少する。

③水セメント比が同一であるため透水性に大きな差はない。

④長さ変化率試験から、4 週時点での収縮は CASE1 と比較して CASE2 では約 4%，CASE3 では約 10%の収縮低減効果が認められ、この傾向は乾燥収縮試験によっても明らかとなった。なお、収縮は各ケースとも打設後 13 週程度でほぼ収束した。

⑤圧縮強度に関し、従来配合である CASE1 と比較すると、CASE2 では初期の材齢における強度は優位であるが、7 日以降では同等であった。CASE3 では 7 日以降についても優位であることがわかった。このことから、減水率が大きいほど圧縮強度は高めの傾向にあり、この傾向は若材齢時に顕著であることがわかった。（図 3 参照）

上記の結果、減水率が大きいほど収縮率が小さく、ひび割れ抑制効果が高いと考えられ、基本性状も改善される CASE3 の高性能 AE 減水剤を使用するものを新配合の候補とした。（以下新配合（案 1）とする）

表 1 試験コンクリート使用材料

	CASE1	CASE2	CASE3
混和剤	ボソリス No.70 (普通 AE 減水剤)	ボソリス No.70LH (普通 AE 減水剤)	レオビルド SP8N (高性能 AE 減水剤)
減水率	12%(従来配合)	15%	18%
セメント	普通ポルトランドセメント		
細骨材	大井川水系陸砂		
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石（最大粗骨材寸法 20mm）		
練混ぜ水	上水道		

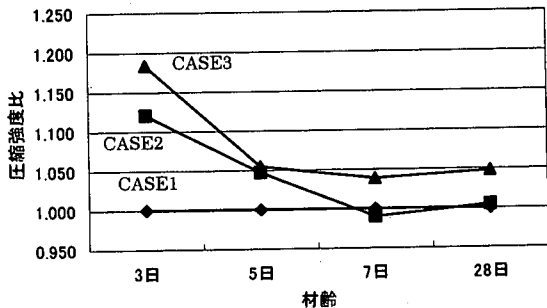


図 3 各材齢における従来配合との圧縮強度

表 2 コンクリートの基本性状（室内試験結果）

試験種類	凝結試験		ブリーディング試験	透水性試験	長さ変化率試験		乾燥収縮
	JISA6204		JISA1123	インフュージョン法 (拡散係数)	JISA1129		JIS 原案
	時間・分(h-m)		cm ³ /cm ²		%		拘束収縮による ひび割れ発生時
	始発	終結			4 週	13 週	
CASE1 (減水率 12%)	7h10m	9h55m	0.22	10.5	-0.049	-0.080	11 日
CASE2 (減水率 15%)	7h45m	10h40m	0.14	12.5	-0.047	-0.079	12 日
CASE3 (減水率 18%)	6h10m	9h15m	0.08	12.5	-0.044	-0.076	17 日

4.2 スランプ減少コンクリートの施工性の確認

営団で建設する地下構造物は、狭隘な空間における施工性の悪さや、桁や柱の主筋やスターラップの交錯などから締め固めが困難となる場合を想定し、より高い充填性を確保するためスランプを15cmに規定している。単位水量を減少させる別の方法として、このスランプを1ランク下げ12cmとして単位水量を減少させる方法（以下新配合（案2）とする）について模索した。ただし、施工時の困難が伴うこと予想されることから、打設試験を行った。

打設試験は、面積が広く、部材厚がある下床版と、面積が小さく、打設深さがある中壁に対して行った。この結果、下床版ではスランプを12cmに変更したコンクリートの施工は可能であるが、中壁では一部に締め固め不良箇所が生じるなど、採用には問題があることがわかった。

4.3 試験施工による効果の確認

室内試験と実際の施工では、使用材料・打設方法・養生時の環境等が異なる。このため、実際の施工において新配合コンクリートによるひび割れの抑制効果を確認する必要がある。新配合と従来配合のコンクリートを各々1ブロック（延長約20m）隣接して打設し、観察・調査による比較検討を行った。比較対象は施工中の4駅における、床版10組、側壁6組とした。新配合の単位水量は、室内試験の配合などから、（案1）で160kg/m³、（案2）で164kg/m³を上限値とした。なお、当該4駅は地下連続壁を本体利用しており、側壁は合わせ壁となっている。表3に使用したコンクリートを示す。

表3 使用コンクリート配合

		呼び強度	設計基準強度	セメント	水セメント比	スランプ	最大粗骨	空気量	最大単位	混和剤種類	適用部材
		N/mm ²	N/mm ²	種類	%	cm	材寸法	%	水量		
新配合	(案1)	24	24	普通	55以下	15±2.5	20	4.5±1.5	160	高性能AE減水剤	床版、側壁
	(案2)	24	24	普通	55以下	12±2.5	20	4.5±1.5	164	普通AE減水剤	床版
従来配合		24	21	普通	55以下	15±2.5	20	4.5±1.5	—	普通AE減水剤	床版、側壁

(1) 調査の項目と時期

室内試験結果よりコンクリートの収縮は3ヶ月程度で収束することがわかった。このため、調査は①脱型時、②4週経過後、③3ヶ月以上経過後の計3回行うこととした。なお、ひび割れ幅は最終の値で評価するため、4週経過時点では計測していない。調査項目は表4に示す。

表4 調査の項目と時期

ひびわれ調査項目		①脱型時	②4週経過後	③3ヵ月以上経過後
目視による観察	スケッチによる発生状況	○	○	○
	貫通の有無の確認	○	○	○
	遊離石灰等の溶出状況の確認	○	○	○
ひび割れの計測	幅の計測	○	—	○
	長さの計測	○	○	○

(2) 調査結果

コンクリートの収縮を（ひび割れ幅計測値の合計）÷（打設延長）とする「みかけの収縮ひずみ（以下収縮ひずみ）」として評価し、単位水量を低減したコンクリートのひび割れ抑制効果を確認することができた。各駅における調査結果の平均値を表5、および収縮ひずみの低減効果を図4に示す。

①新配合の収縮ひずみは、従来配合のそれと比較して床版における平均値で17.7×10⁻⁶、側壁における平均値では14.4×10⁻⁶少ない。

②個々のひび割れ幅は床版・側壁とも新配合と従来配合の平均値で違いはなかった。しかし、単位長さあたりに換算したひび割れ本数は、床版では従来配合 0.54 本/m に対し、新配合では 0.26 本/m と大幅に改善されている。側壁では、大きな差が生じていないが、このことについては別途考察に示す。

③新配合の収縮ひずみは、床版では平均 67.6×10^{-6} に対し、側壁におけるそれは 95.9×10^{-6} であり、収縮ひずみの低減効果は側壁よりも床版のほうが大きい。この傾向は従来配合でも同様であった。

④ひび割れの大部分が脱型時に既に発生している。

⑤新配合（案 1）と新配合（案 2）では明確な収縮ひずみの差はなかった。

表 5 試験施工の調査結果

		ひび割れ幅		ひび割れ本数		収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)				単位水量			
		新配合 (mm)	従来配合 (mm)	新配合 (本/m)	従来配合 (本/m)	新配合 ε ₁	従来配合 ε ₀	低減量 ε ₀ - ε ₁	低減率(%) (ε ₀ - ε ₁) / ε ₀	新配合コンクリート w ₁ (kg/m ³)	旧配合コンクリート w ₀ (kg/m ³)	低減量 w ₀ - w ₁ (kg/m ³)	単位水量 低減率 (w ₀ - w ₁) / w ₀ (%)
床版	A駅	—	—	—	—	92.0	> 77.9	Δ 14.1	—	161	168	7	4.2
	B駅	0.14	0.15	0.26	0.52	52.5	< 192.6	140.1	72.7	164	169	5	3.0
	C駅	0.16	0.16	0.28	0.57	115.3	< 134.9	19.6	14.5	160	176	16	9.1
	平均値	0.15	0.15	0.26	0.54	67.6	85.3	17.7	39.6			8.7	5.1
側壁	B駅	0.16	0.18	0.32	0.30	6.9	≈ 2.8	Δ 4.1	—	160	167	7	4.2
	C駅	0.15	0.15	0.30	0.42	90.2	≈ 89.6	Δ 0.6	Δ 0.7	160	174	14	8.0
	D駅	0.22	0.22	0.81	0.65	190.0	< 206.7	16.7	8.1	160	169	9	5.3
	平均値	0.18	0.19	0.54	0.48	95.9	110.3	14.4	6.2			9.0	5.3

※1：床版 A 駅では若材齢時に隣接する場所で新線の試運転が行われていた

※2：施工時期により 3 ヶ月以前のデータも含む

※3：「平均値」は全計測箇所の平均値

(3) 考察

①新配合では収縮ひずみは床版で 40% 程度、側壁で 5% 程度改善されており、従来配合と比べてひび割れ抑制効果が優れると考えられる。

収縮ひずみを、低減することができたのは、単位水量を従来配合と比べて平均で約 9 kg/m^3 減少させた効果であると考えられる。

②脱型時には既にひび割れの大多数が生じている。このため、若材齢時に強度が大きい新配合はひび割れ抑制効果に優れると考えられる。

(図 3 参照)

ひび割れは、拘束されたコンクリートの収縮により引張応力が蓄積され、コンクリートの引張強度以上となったときに生じる。ひび割れが生じた後はある程度の応力が解放された後に、再度引張応力の蓄積、ひび割れの発生が繰り返されることとなる。ひび割れ幅が変わらず発生本数に差があるとの調査結果から、若材齢時に強度の高い新配合コンクリートは、前述の繰り返し回数が従来配合と比較して少なく、その結果ひび割れの本数が少なかったものと考えられる。

③収縮ひずみの低減率が、床版より側壁のほうが小さいのは、拘束が強いためであると考えられる。

コンクリートのみかけの収縮ひずみ ϵ' は、コンクリート自体の収縮 ϵ と、これに拘束に対する係数 α (< 1.0) を乗じた値との差として現れる。拘束の状態が同一であれば新配合・従来配合のみかけの収縮ひずみの差は以下のように表される。

$$\epsilon'_{\text{従来}} - \epsilon'_{\text{新}} = (\epsilon_{\text{従来}} - \alpha \epsilon_{\text{従来}}) - (\epsilon_{\text{新}} - \alpha \epsilon_{\text{新}}) = (\epsilon_{\text{従来}} - \epsilon_{\text{新}}) - \alpha (\epsilon_{\text{従来}} - \epsilon_{\text{新}})$$

このため、 α が大きくなる、すなわち拘束が強くなると、みかけの収縮ひずみの差は小さく現れると考えら

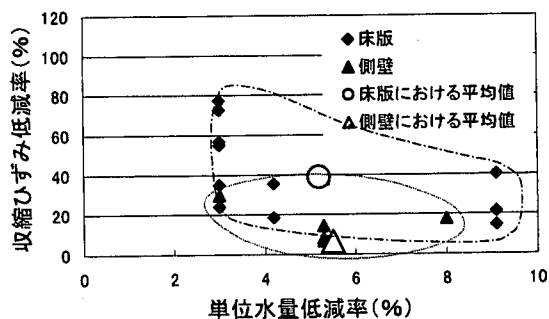


図 4 単位水量の低減率とひずみの低減率

れる。合わせ壁である側壁は既設の地下連続壁とジベル筋により一体化されており、拘束が強い。このため、側壁の収縮の低減効果は床版の収縮の低減効果よりも小さく現れたものと考えられる。

5. 配合の変更

5.1 スランプ減少コンクリート（案2）の適用性について

単位水量減少方法として、①高性能AE減水剤を使用する（案1）方法と、床版に限れば②スランプを12cmに減少する（案2）方法を検討した結果、いずれの配合も単位水量の減少による収縮ひずみの低減効果が確認できた。しかし、（案2）に関する以下に示す理由により（案1）を選択した。

①経済性に優れるものの、単位水量の増加傾向は、砕砂や碎石の使用割合の増加、交通事情の悪化に伴う運搬時間の増加などにより、今後益々顕著となるものと考えられ、スランプを小さくすることにより大幅に単位水量を減少させるコンクリートの製造は困難になると考えられる。

②コンクリートの収縮の低減効果は、単位水量の減少量が多い（案1）のほうが優れると考えられる。

③試験施工を行った工事区間における納入工場全8工場のうち、規定する単位水量164kg/m³を現時点で達成できるのは5工場であった。このため実際の工事において納入に支障が生じる。

表6 配合の選定

新配合種類	(案1)	(案2)
混和剤	高性能AE減水剤	普通AE減水剤
単位水量	160kg/m³	164 kg/m³
スランプ値	15cm	12cm
収縮の低減効果 [※]	10%	4%
従来配合との価格差	約千円/m³増	同等
評価	○	△

※28日時の長さ変化率試験結果

5.2 コンクリート配合の変更

以上の検討を経て、開削トンネルの構造部材に用いるコンクリートは高性能AE減水材を使用し、単位水量の上限値を160kg/m³に規定するものとし、表7に示すように配合の変更を行った。

表7 新配合コンクリート配合

	呼び強度 (N/mm²)	呼称	設計 基準強度 (N/mm²)	呼び強度 保証材齢 (日)	セメント 種類	水セメント比 (W/C)	スランプ (cm)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位水量 上限値 (kg/m³)	空気量 (%)	混和剤種類
新配合	24	24-15	24	28	普通	55%以下	15±2.5	20	160	4.5±1.5	高性能AE減水剤
従来配合	24	24-15	21	28	普通	55%以下	15±2.5	20	—	4.5±1.5	普通AE減水剤

6. おわりに

供用後の補修が困難であり長期間にわたって使用する地下構造物では、特に耐久性を向上させる必要がある。本検討では、コンクリートのひび割れ制御に効果のある配合を採用したことで、耐久性の向上に寄与できたものと考えている。しかし、ひび割れを皆無とすることは不可能であり、配合面からの改善のみではひび割れの低減効果には限界がある。今後は構造面からもあわせて検討してゆく必要があると考えている。

参考文献

1) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究 土木学会論文集 No. 77 1961. 11
2) 大川裕：高性能AE減水剤の特徴・種類および性能 コンクリート工学 Vol. 37, No. 6, 1999. 6
3) 長瀧重義：コンクリートの高性能化 技報堂出版
4) コンクリート便覧 社団法人日本コンクリート工学協会編 技報堂出版