

アーチカルバートにおける高流動コンクリートの打設事例

Placing Case with Hi Performance Concrete in Arch Culvert

加古慎¹・岡野法之²・中島純也³・辻徹⁴・宇田誠⁵

Makoto Kako, Noriyuki Okano, Junya Nakajima, Toru Tsuji and Makoto Uda

¹鉄建建設株式会社 東関東支店 (〒260-0028 千葉県千葉市中央区新町1番地17)

E-mail:makoto-kako@tekken.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所 (〒370-8543 群馬県高崎市栄町6-26)

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所 (〒370-8543 群馬県高崎市栄町6-26)

⁴東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所 (〒370-8543 群馬県高崎市栄町6-26)

⁵正会員 鉄建建設株式会社 札幌支店 (〒060-0005 札幌市中央区北5条西2丁目5番地)

A part of the Agatsuma Line of the East Japan Railway Company will be under water after the Yamba Dam is completed, which is under construction by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport in Gunma Prefecture. The single-track Kawayu Tunnel 1,870 m long was constructed to provide an alternate route for the section to be submerged. Since reinforcing bars, with shear reinforcement, were densely arranged in the arch culvert in this tunnel, there was a fear of incomplete filling of concrete. We therefore determined to use high performance concrete for arch culvert. On the basis of the results of tests with several mix proportions, the definitive mix was specified. Consequently, excellent results were achieved in the actual construction, with high quality concrete in place.

Key Words : *Hi-performance concrete, Arch culvert, Tunnel*

1. はじめに

国土交通省のハツ場ダム建設計画に伴うＪＲ東日本吾妻線付替工事、川原湯トンネルの起点方坑口部において、鉄道構造物等設計標準・耐震設計（新耐震標準）により設計されたアーチカルバートを施工した。

このアーチカルバートの配筋の特徴として、ピッチが狭く、そのため骨材のブロッキング等が懸念される。特に、コンクリートをNATM区間と同様の吹き上げ方式で打設する特殊区間（２章参照）では、①吹き上げ部で閉塞した場合に、その対応に時間を要するため、コールドジョイントの発生を招く、②せん断補強筋が配置され、その両端部には円形フックが設けられているため、コンクリートの充てんが不十分となる恐れがあった。

以上のことより、高流動コンクリートの適用が適当と判断し、適用したので、その結果を報告する。

2. 工事概要

(1) 付替線および川原湯トンネルの概要

東日本旅客鉄道では、ハツ場ダム建設計画に伴う約10.4kmにおよぶ吾妻線付替工事を国土交通省より委託を受けて進めている（図－1）。本付替工事は、トンネル3本、大小5橋梁、1高架橋および1駅の新設からなるプロジェクトであり、施工対象となる川原湯トンネルは、延長1,870m（NATM区間：1709m、アーチカルバート区間：161m）の新設鉄道単線トンネルである。

(2) 施工条件

アーチカルバート区間のうち、終点側の40m区間は、坑口部の土被りが非常に薄い区間である（図－2）。また、当該地区は民有保安林に指定されているため、トンネル上半部を開削して支保（鋼製支保工、吹付けコンクリート）を明かりで建込んだ後に

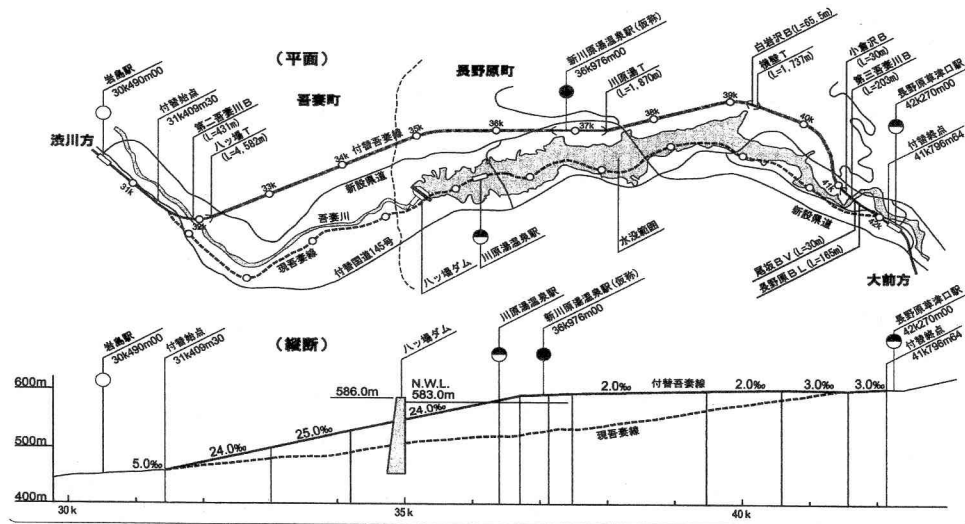


図-1 吾妻線付替計画概要

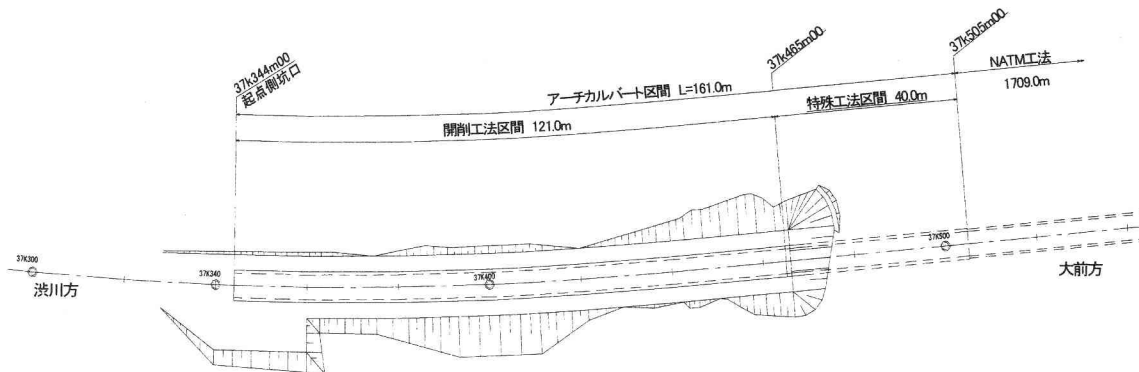


図-2 トンネル起点側坑口付近全体図

埋戻し，下半掘削後，NATM区間で使用したセンターで覆工を打設する工法（特殊工法と呼ぶ）を採用した。以下に施工条件を述べる。

①掘削は上述の特殊工法で施工する。

②覆工コンクリートはポンプ車を坑口部に据え，配管打設する。スプリングラインの上下，天端の3箇所打設口を設け，コンクリートの打ち上がりに伴い順次打設口を切り替える。天端部は吹き上げ方式となる。

③配筋は，450mmの断面に対し，主筋（D22,25が交互に配置，@125），配力筋（D16，@240）がダブルで，せん断補強筋（アーチ部：D16，@300千鳥，側壁部：D19，@300千鳥）が配置され

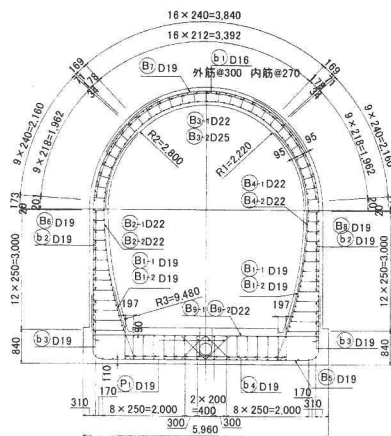


図-3 特殊工法区間配筋

ている（図-3）。

配筋の特徴として、ピッチが狭く、骨材のブロッキング等が懸念される。特に吹き上げ部で閉塞した場合には、その対応に時間を要するため、コールドジョイントの発生を招く恐れがある。また、せん断補強筋が配置され、その両端部には円形フックが設けられているため、コンクリートの充てん性を阻害する要因となる。以上のことより高流動コンクリートとすることが適当と判断した。

3. 配合検討

(1) 配合検討

当該構造物に用いる高流動コンクリートの自己充てん性は、「高流動コンクリート施工指針」¹⁾に準拠すると、配筋よりランク2が必要となる。よって、今回の高流動コンクリートの必要性能としては、設計条件を含めると表-1に示すものとなる。

高流動コンクリートの配合を検討する上で以下の点に留意した。

①アルカリ骨材反応を抑制するために、アルカリ総量を 3.0kg/m^3 以下とする。

②乾燥収縮量を低減するために高炉セメント以外のセメントを使用する。

③単位水量を極力小さくすること。

また、生コンプラントの設備面から以下の制約を受ける。

①石粉等の紛体は使用できない。

②セメントは、普通ポルトランドセメントを使

用する。

以上のことから、高流動コンクリートの種類は、単位セメント量を比較的少なくすることが可能な併用系とした。初期配合を表-2に示す。また、使用材料を表-3に示す。

(2) 試験練り（室内試験）

生コンプラント試験室において、室内ミキサ（パン形ミキサ、公称容量60リットル）を用い、初期配合のコンクリートを40リットル練り混ぜた。骨材は表乾状態に近いものを使用した。単位水量の厳密性を図るため、細骨材については練混ぜ前に表面水率を測定し、水量の補正を行った。

試験項目および試験方法を表-4に示す。試験は、練混ぜ直後、および30分後に実施した。

(3) 室内試験結果

室内試験における配合を表-5、試験結果を表-6に示す。各種コンシステンシー試験を満足するように、高性能AE減水剤、空気量調整剤の添加量および細骨材率を変化させた。配合No.2、3について

表-1 高流動コンクリートの必要性能

必要性能				評価値
フレッシュ時	流動性	スランプフロー	(cm)	60~70
	材料分離抵抗性	50cmフロー到達時間	(秒)	3~15
	自己充てん性	U形充てん高さ	(mm)	300以上 (障害R2)
	空気量		(%)	4.5±1.5
硬化後	圧縮強度(材齢28日)		(N/mm ²)	24.0以上

表-2 コンクリートの初期配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C	s/a	空気量	材 絶対容積	単位量(kg/m ³)					
	(%)	(%)	(%)	(m ³ /m ³)	水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE減水剤	増粘剤
25	40	52.4	4.5	0.31	170	425	913	806	8.075 ^{※)}	0.1

表-3 使用材料

材料	記号	種類	物性他	備考
セメント	C	普通ポルトランド	密度 3.16g/cm^3	
細骨材	S	山砂	表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.77%、粗粒率2.75	吾妻郡吾妻町殿谷戸産
粗骨材	G	砂利	最大寸法25mm 表乾密度 2.60g/cm^3 、吸水率2.28%、実積率62.0%	吾妻郡六郷村大原産
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	
	Vi	増粘剤	セルロース系	

表-4 試験項目および試験方法(室内試験)

試験項目			試験方法	試験時期(練混ぜ後)	
				直後	30分
フレッシュ時	流動性	スランプフロー	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法	○	○
	材料分離 抵抗性	50cmフロー 到達時間	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法	○	○
	自己充てん性	U形充てん 高さ(障害 R2)	JSCE-F 511 高流動コンクリートの充てん装置 を用いた間隙通過性試験方法(案)		○
	空気量		JSCE-F 513 高流動コンクリートの空気量の圧 力による試験方法(空気室圧力方法)(案)	○	○
	単位水量		静電容量法(KETT水分計)	○	○
硬化後	圧縮強度		JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法 (材齢7日、28日) 供試体の作成は、JSCE-F 515高流動コン クリートの強度試験用供試体の作り方(案)		○

表-5 コンクリートの配合一覧(室内試験)

配合 No.	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位粗骨 絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)					単位量(C×%)	
					水	セメント	細骨 材	粗骨 材	増粘 剤	高性能 AE減水剤	空気量 調整剤
1 初期配合	40	52.4	4.5	0.31	170	425	913	806	0.1	1.9	0.002
2	40	52.4	4.5	0.31	170	425	913	806	0.1	2.1	0.004
3	40	52.4	4.5	0.31	170	425	913	806	0.1	1.9	0.004
4	40	52.4	4.5	0.31	170	425	913	806	0.1	1.8	0.007
5	40	53.1	4.5	0.305	170	425	918	788	0.1	1.58	0.003

表-6 室内試験結果

配合 No.	試験 時期	スランプフロー (cm)	50cmフロー 到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	U形充てん 高さ (mm)	U形充てん 時間 (秒)	単位水量 (kg/m ³)
1	練り直後	48.5×44.5	—	2.5	27.5			
2	練り直後	66.5×64.5	5.43	3.9	27			
3	練り直後	67.0×63.5	6.25	1.5	29			
4	練り直後	65.5×64.5	5.12	5.4	28.5	153	—	169.6
5	10分後	66.5×65.5	6.38	5.6	29			171.5
	30分後	66.0×64.5	6.61	4.8	29	345	31.98	168.4

は目視で材料分離が確認されたため、U形充てん試験は実施しなかった。配合No.4のU形充てん試験については、材料分離が主原因と考えられる粗骨材のブロッキングが発生し、評価値を満足しなかった。最終的にNo.5の配合が全ての試験項目の評価値を満足したため、実機試験のための暫定配合とした。

(4) 試験練り(実機試験)

室内試験で所要の性能が得られた暫定配合を実機ミキサ(2軸強制練りミキサ、公称容量 2.5m³)によって 2.0m³ 練混ぜ、アジテータ車(4 t 積載車)に積載した。練混ぜ方法は、モルタル先行練りの全材料投入後 120 秒練りとした。また、練混ぜ時のミキサ

の負荷電流を確認した。なお、練混ぜ前に骨材の表面水率を測定し、水量の補正を行った。

試験項目は、室内試験と同様とし、試験時期は練混ぜ直後、練混ぜ30分後、60分後、および90分後とした(表-7)。所要の性能を満足しない場合は、配合を修正し、再度実機ミキサにより練混ぜを行い、性能を照査した。

(5) 実機試験結果

実機試験を行った配合一覧を表-8に、実機試験の結果を表-9に示す。

各種コンシステンシー試験を実施し、所定の値を満足しない場合は、高性能AE減水剤、空気量調整

表-7 試験項目および試験方法(実機試験)

試験項目			試験方法	試験時期(練混ぜ後)			
				直後	30分	60分	90分
フレッシュ時	流動性	スランプフロー	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法	○	○	○	○
	材料分離抵抗性	50cmフロー到達時間	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法	○	○	○	○
	自己充てん性	U形充てん高さ(障害R2)	JSCE-F 511 高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過性試験方法(案)		○		○
	空気量		JSCE-F 513 高流動コンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)(案)	○	○		○
	単位水量		静電容量法(KETT水分計)	○	○		
硬化後	圧縮強度		JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法(材齢7日、28日) 供試体の作成は、JSCE-F 515高流動コンクリートの強度試験用供試体の作り方(案)		○		

表-8 コンクリートの配合一覧(実機試験)

配合No.	W/C	s/a	空気量	単位粗骨絶対容積	単位量(kg/m ³)					単位量(C×%)	
	(%)	(%)	(%)	(m ³ /m ³)	水	セメント	細骨材	粗骨材	増粘剤	高性能AE減水剤	空気量調整剤
1 暫定配合	40	53.1	4.5	0.305	170	425	918	788	0.1	1.8	0.00375
2	40	53.1	4.5	0.305	170	425	918	788	0.1	2.1	0.00425
3	40	53.1	4.5	0.305	170	425	918	788	0.1	2.275	0.007

表-9 実機試験結果

配合No.	試験時期	スランプフロー	50cmフロー到達時間	空気量	コンクリート温度	U形充てん高さ	U形充てん時間	単位水量
		(cm)	(秒)	(%)	(℃)	(mm)	(秒)	(kg/m ³)
1	5分後	21.0(スランプ)	-	6.1	30			
2	10分後	59.0×58.0	11.75	2.5	30			167.5
3	10分後	64.5×64.0	10.77	4.5	29.5			169.9
	30分後	66.0×63.0	8.34	5	30	315	48.51	169
	60分後	66.0×65.0	8.47	6	30			
	90分後	65.5×63.5	9.02	5.8	30	175	50.94	

剤の添加量を調整した。

配合No. 3については、練混ぜ10分後、30分後、60分後および90分後それぞれにおいて、スランプフロー、50cmフロー到達時間および空気量の評価値を満足した。U形充てん試験については、練混ぜ90分後が評価値を満足しなかった。しかし、練混ぜ30分後と比較して、スランプフローおよび50cmフロー到達時間ともほとんど違いがなく、目視により確認した状態もほぼ良好であった。従って、練混ぜ90分後のU形充てん高さが小さくなった原因は、一部の大きな寸法の粗骨材がブロッキングしたためと考えられ、実施工での充てん性は問題ないと判断した。以上より、配合No. 3を最終的な示方配合とした。

配合を検討するうえで高性能AE減水剤の調整が難しく、添加量の若干の違いにより、フローが出な

い場合や、材料分離が生じる場合があった。今回使用したのは、山砂、陸砂利であり、砕石や砕砂と比較すると微粒分が少ない骨材である。適度な微粒分量を含む骨材であればブリーディングも抑制され、適切な添加量の範囲も広がったと考えられ、多くの配合を検討する要因になった。

3. 温度解析

(1) 温度解析

本施工で使用する併用系高流動コンクリートは、セメント量が多く、水和熱が高くなるため、温度ひび割れが発生する確率が高くなる。また、施工条件

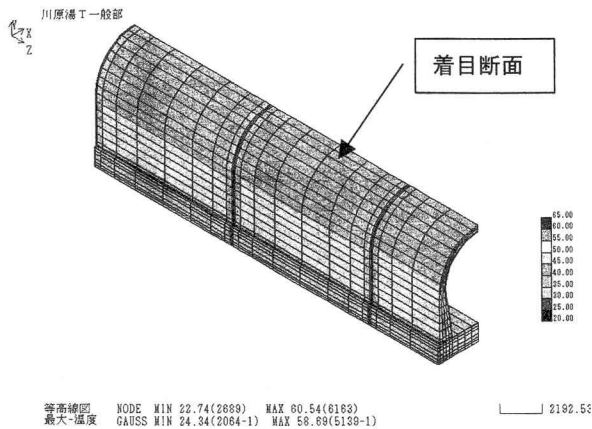


図-4 解析モデルおよび着目断面

の面では、隣接する覆工コンクリート、および底版コンクリートが先行して打設してあり、拘束を受けるため、温度応力によるひび割れの発生が懸念された。そこで、温度ひび割れの解析を行い、その結果に基づき補強の必要の有無を検討した。検討方法等は、「コンクリート標準示方書〔施工編〕」²⁾にしたがって行った。なお、解析は「ASTEAMACS」(株RCCM社製)を使用した。

(2) 解析結果

解析モデルおよび着目断面を図-4、着目点を図-5に示す。側壁上部および覆工天端付近については部材が薄いため、水和熱による温度上昇は小さくなる傾向がみられる(図-6)。その結果、内部拘束による引張応力は小さくなる(図-7)。また、外部拘束される底版とは離れているため、外部拘束による引張応力も小さくなる。ひび割れ指数も2以上の結果となっており(図-8)、ひび割れの発生確率はとても小さいことがわかる。

底版から側壁0.8m上りの位置では部材厚が厚く、特に部材内部と外面は水和熱による温度上昇が

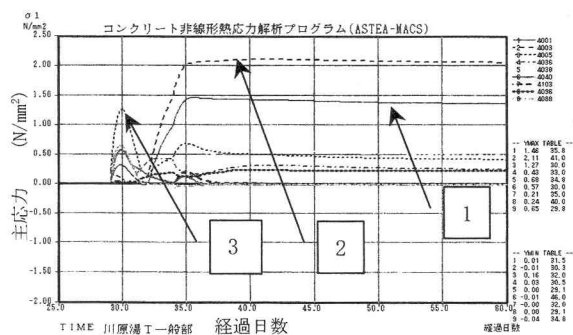
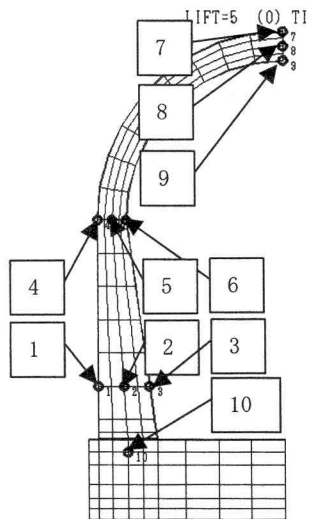


図-7 主応力履歴

(底版コンクリート打設日を0日とする)



(0) MAX 0.00(0)
7(3306-1) MAX 19.75(2238-1)

図-5 着目位置図

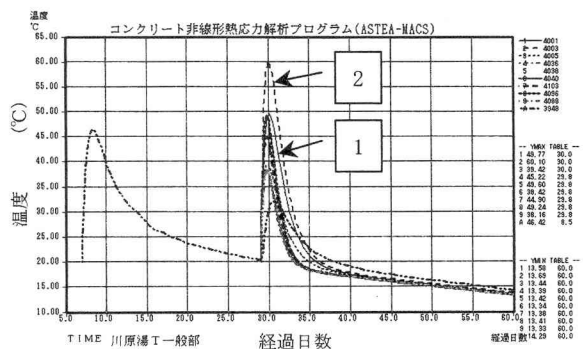


図-6 コンクリート温度履歴

(底版コンクリート打設日を0日とする)

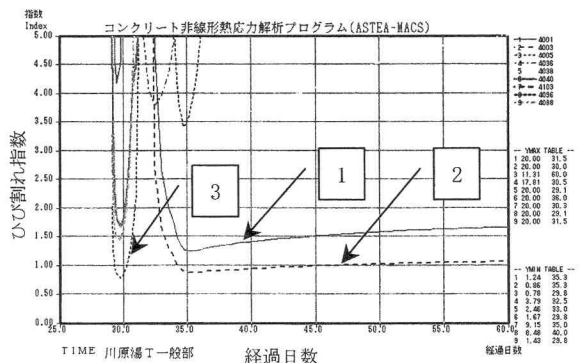


図-8 ひび割れ指数履歴

(底版コンクリート打設日を0日とする)

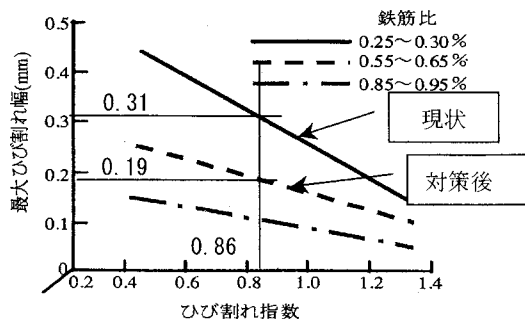
高いことが結果からわかる（図－6）．着目点3では、打設直後にコンクリート温度が上昇し、内部が膨張し、内部拘束が部材外面に働いている（図－7）．このことにより、ひび割れ指数が打設直後に低い値を示している（図－8）．しかし、ひび割れ指数はこの後収束する傾向がみられる．この内部拘束によるひび割れは表面にだけ発生するもので、貫通するひび割れではないため表面の補修だけで対処が出来る．

図－7より、着目点1，2に関しては、打設から3日後以降に引張応力が発生しており、ひび割れ指数を見ても同様に3日後以降に低くなっている（図－8）．これは温度が下降するときには打設したコンクリートと既設コンクリートとの温度差が大きく、コンクリートの収縮量の差が発生しているためと考えられる．よって、既設コンクリートである底版が拘束して外部拘束によるひび割れの発生が考えられ、ひび割れが貫通する可能性がある．図－9より、発生確率はひび割れ指数が最小0.86であることから、ひび割れ発生確率は約93％となる．

既打設コンクリート側の妻部付近についても同様に解析を行った結果、中間部と同様に側壁上部と覆工天端は温度上昇が比較的小さく、内部拘束による引張応力は小さい．部材外面では内部拘束により引張応力がいくらか働き、ひび割れ指数が低くなっているが、中間部同様、表面ひび割れとなり、発生確率も10％程度となる．底版から側壁0.8m上りの位置では部材厚が中間部と変わらず、部材内部では水和熱による温度上昇が高くなる．また、打設後4日目以降に鉛直方向よりもトンネル軸方向に卓越した外部拘束を受ける傾向がみられる．ひび割れ指数を見ると最低で1.10となっており、発生確率は73％程度となっている．

(3) ひび割れ対策

解析の結果、スパン中央部においてひび割れ発生確率が93％と特に高く、ひび割れ幅も現在の鉄筋比



図－10 最大ひび割れとひび割れ係数の関係²⁾

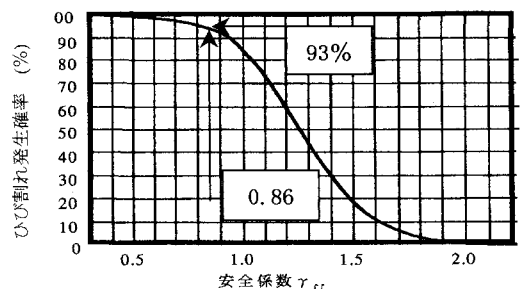
とひび割れ指数より換算すると許容ひび割れ幅0.3mmを超えるクラックになると予想される（図－10）．底版の外部拘束によるひび割れの対策として、現状の鉄筋量に対し、2倍の鉄筋を配置することにより、ひび割れを分散し、許容ひび割れ幅を許容値の0.3mm以下に抑えることとした．変更前の配筋筋は250mmピッチで配置されており、鉄筋比は0.25であった．これをFLから1.5mの範囲について125mmピッチに変更することにより鉄筋比を上げ、温度ひび割れ対策とした．

4. 施工実績

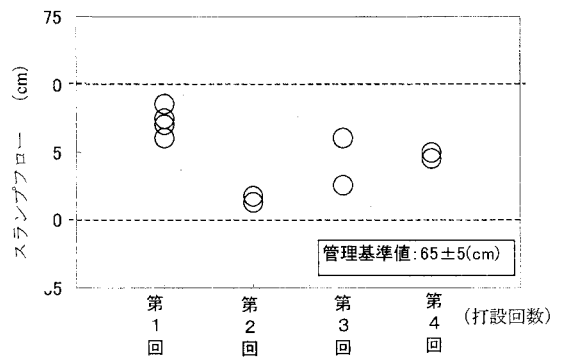
(1) 各種試験結果

図－11にスランプフロー試験結果、図－12に空気量試験結果を示す．なお、各試験とも第1回の打設に関しては複数回実施した．

スランプフロー試験に関しては、多少のばらつきはあるが、打設日毎にみると安定した値が測定されている（標準偏差：2.2cm，変動係数：3.4％）．試験練りの際、同じ配合であっても細骨材の表面水率の違いによりスランプフローに差が生じたことから、その変動を極力抑える必要があった．生コンプラントでは細骨材の表面水を自動水分計で日常管理し、その変動を最小限に抑えるため、骨材工場で一定期間保管したものを打設日前日に入荷し、使用した．



図－9 安全係数とひび割れ発生確率の関係²⁾



図－11 スランプフロー試験結果

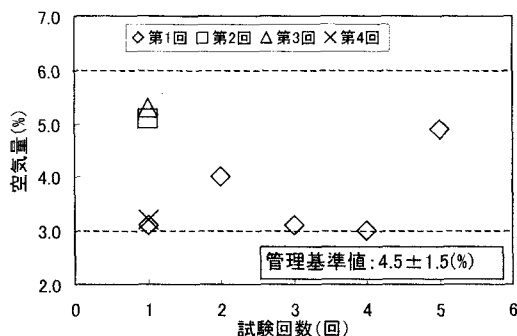


図-12 空気量試験結果

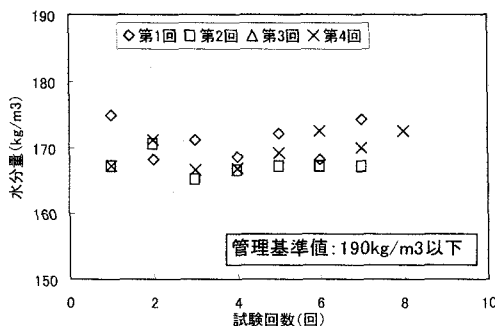


図-13 水分量試験結果

空気量に関しては、管理基準値を満足しているものの、ばらつきが大きく、同日の試験結果であっても差が大きい（標準偏差：1.0%，変動係数：25.0%）。室内試験においても配合を決定する上で、空気量の微調整を何回も行っており、苦労した点のひとつである。粗骨材は陸砂利、細骨材は山砂を使用している。碎石、砕砂と比較すると微粒分が少ないことが、空気量を確保する上で困難となった原因と考えられる。

図-13に水分量試験結果を示す。水分量試験は、1時間につき1回測定を実施した。示方配合の単位水量170kg/m³に対し、それに近い値を示している（標準偏差：2.7kg/m³、変動係数：1.6%）。骨材の管理状態が良好であったため、このように安定した値が計測されたと考えられる。

図-14に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度試験は60m³につき1回実施した。圧縮強度に関しても、強度のばらつきは少なく、安定した品質のコンクリートを打設することができた（7日強度－標準偏差：1.8N/mm²、変動係数：4.6%、28日強度－標準偏差：2.6N/mm²、変動係数：5.1%）。

(2) 施工

セントルはトンネル覆工コンクリートに対して設

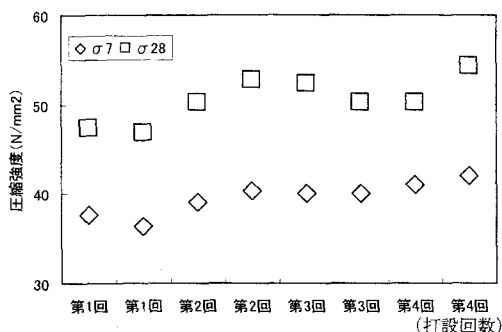


図-14 圧縮強度試験結果

計されているため、高流動コンクリートに対応可能か、構造計算を行った。その結果、補強等を要せずに打設が可能という結果を得た。打設速度は1時間当たり15m³とした。妻型枠に関しては、従来の覆工コンクリートに使用したものは空隙が大きく、高流動コンクリートを打設した場合には、モルタル分の流出によるジャンカの発生が懸念されるため、間隙の少ない妻型枠を新たに製作した。

コンクリート打設時は、安定して良質なコンクリートが供給されたため、懸念された材料分離も無く、複雑な配筋の中で円滑に流動する状況が確認できた。

トンネル貫通後の打設となるため、セントル脱枠後はプラスチック収縮ひび割れが発生しないよう、トンネル坑口をシートで常時閉鎖した。打設後の表面の仕上がり状態は良好で、打設後半年経過時もクラックの発生は認められなかった。

5. おわりに

場所打ちによるアーチカルバートにおいてコンクリートの巻厚が比較的薄く、配筋が密で複雑な場合には、高品質な構造物を作る手段のひとつとして、高流動コンクリートの採用が有効と考えられる。高流動コンクリート自体は、一般的になりつつあるが、出荷実績があるプラントはいまだに少なく、材料、設備、能力的な問題が少なくない。それらの問題を手順を踏んで解決することにより、高品質なコンクリートを打設することができると考える。価格面等の問題はあがあるが、大きな労力を伴う覆工コンクリートの締固め作業の省力化を図ることが可能である等の利点が多々あり、今後の普及に期待でき、今回の事例が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93号，1998
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002