

30. 自動スランプ調整装置の紹介と適応事例

東亜建設工業(株)：*古堅 泰秀
名岐機器(株)：落合 勝俊

1. はじめに

NATM における吹付コンクリートは、岩塊の局所的な脱落あるいは地山の緩み進行を防止し、地山アーチの形成を担う役割を持つ重要な支保材料である。最近では、高強度化による覆工厚さの低減や地山の支持力の向上、さらには、高品質化による粉塵、跳ね返りの低減といった技術開発が行われている。

一般に吹付コンクリートは、急結剤の添加により早期強度を発現、自由方向への施工可能など長所を持つ反面、跳ね返りによる材料損失が多く、施工性・品質にばらつきを生じやすいといった短所を併せ持つため、材料、配合、施工機械および施工管理などに十分注意する必要がある。

安定した吹付を行うためには、フレッシュコンクリートのスランプを管理することが重要である。そこで品質において最大に影響を及ぼす細骨材の表面水率に着目し、これを自動補正する自動スランプ調整装置の開発を行った。

以下に自動スランプ装置を適用した通常の吹付コンクリート施工と高強度吹付コンクリート施工並びに高品質コンクリート施工の事例を紹介する。

2. 自動スランプ調整装置

2-1. 原理

自動スランプ調整装置は、同材料を同量練り混ぜれば、フレッシュコンクリートの性状は等しくなり、ミキサ(定格 18.5kW)にかかる負荷はほぼ一定となることを利用している。

従来では、細骨材の表面水率の違いによりミキサ内に投入される細骨材および水の量が異なるため、フレッシュコンクリートの性状にばらつきを生じていた。

自動スランプ調整装置は試験練りの結果とミキサにかかる負荷を照らし合わせ、練り混ぜた細骨材の表面水率を類推し、次回の混練りに反映させることによって、フレッシュコンクリートの性状を安定させることが可能となっている。ミキサの負荷は駆動モータの電流値より検出している。自動スランプ調整装置の混練りフローを図2-1に示す。

2-2. 装置の構成

自動スランプ調整装置は2つの操作盤で構成されている。一方は、基準となるミキサ電流値を設定する機能と検出時間におけるミキサ電流値を表示する機能を有し、他方は、検出されたミキサ電流値をもとに表面水

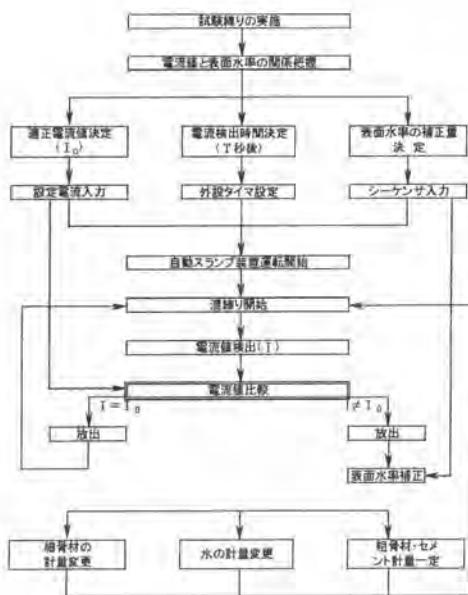


図2-1 混練りフロー

率の補正量を決定するためのシーケンサを従来の現場プラントの操作盤に組み込んだものである。

また、高品質吹付コンクリートにおいては、その緻密で高粘性な特性より、ミキサの負荷電流の変動が微小となるため、インバータを組込み、モータへの負荷を3割程度増加させている。

2-3. 装置の内容

自動スランプ調整装置の初期設定手順を以下に示す。

- ① 現場プラントで表面水率が分かっている細骨材を用いて試験練りを行い、予定したコンクリート性状、スランプであることを確認し、基準値とする。
- ② この際、ミキサの電流値が安定する時間を求め、これを設定電流並びに検出時間とする。
- ③ 次に、故意に表面水率を変化させ試験練りを行い、検出時間における電流値と混練り後のスランプを記録する。この作業を適当回数繰り返し、それぞれのコンクリート特性（ミキサ電流値とスランプ値）を把握する。
- ④ ③で求めたデータを基に、ミキサ電流値が規定値の範囲外となる時の表面水率の補正量を求め、これを制御盤のシーケンサへ入力する。

3. 施工事例

3-1. 通常吹付コンクリート（詰坂トンネル）

(1) 工事概要

工事名称：詰坂工区改良（詰坂トンネル）工事
 発注者：島根県
 工期：平成5年12月18日～平成8年8月23日
 概要：延長 1,140m（内トンネル区間 1,010m）
 工法：NATM、発破掘削

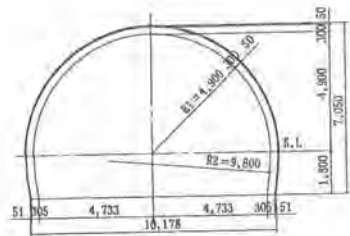


図3-1 トンネル断面

(2) 配合

試験練りの際、基準とした現場配合を表3-1に示す。

表3-1 基準とした現場配合

W/C (%)	S/a (%)	C (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)
63	60	360	227	969	686

(注) 細骨材の表面水率は2.0%

(3) 自動スランプ調整装置の設定

前述の手順に従い求めたミキサ電流値及びスランプと表面水率の相関を図3-2に示す。また、図3-2より設定したミキサ電流値の変化量に対する表面水率の補正量を表3-2に示す。

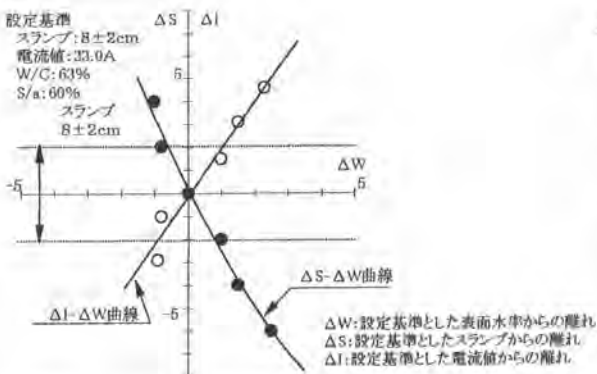


図3-2 ミキサ電流値及びスランプと表面水率の相関

表3-2 自動スランプ調整装置の設定値

ミキサ電流値の変化量 ($I-I_0$)	表面水率の変化量 (%)
-6.1以下	+2.0
-4.1～-6.0	+1.6
-2.1～-4.0	+1.2
-1.1～-2.0	+0.8
-0.6～-1.0	+0.2
0.5～-0.5	0.0
0.6～1.0	-0.2
1.1～2.0	-0.8
2.1～4.0	-1.5
4.1～6.0	-2.0
6.1以上	-3.0

(4) 吹付コンクリートの品質管理

掘削期間 (H7/7~H7/9) 中の吹付コンクリート管理全データ (511 件) を基に、スランプと表面水率の発生頻度を求めた。その結果を図 3-3、図 3-4 に示す。

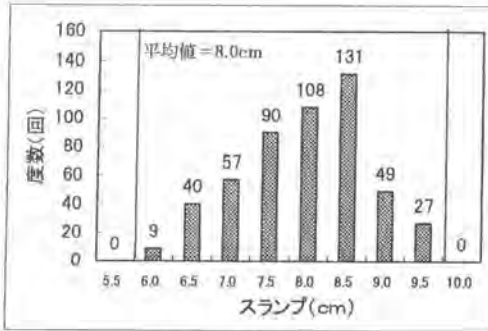


図 3-3 スランプ発生頻度

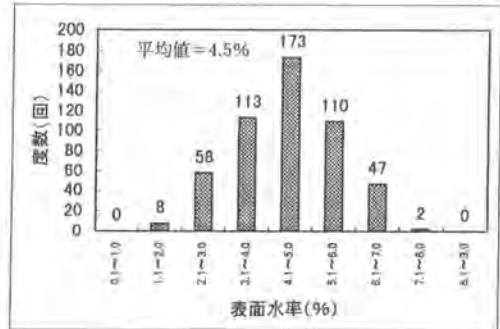


図 3-4 表面水率発生頻度

細骨材の表面水率は、最小値 1.8%~最大値 7.2%の範囲で変動している。それに対し、スランプは平均値=8cm として、管理基準値内に収まっていることがわかる。こうした結果を引き出すためには、事前に行うミキサ電流値及びスランプ値と細骨材の関連づけを的確に行うことが重要である。

3-2. 高強度吹付コンクリート (三日町トンネル)

(1) 工事概要

工事名称:平成7年度県単克雪対策工事 (トンネル工区)
 発注者:長野県
 工期:平成7年12月19日~平成9年9月30日
 概要:延長 320m (内トンネル区間 282m)
 工法:NATM、機械削削、ショートベンチカット

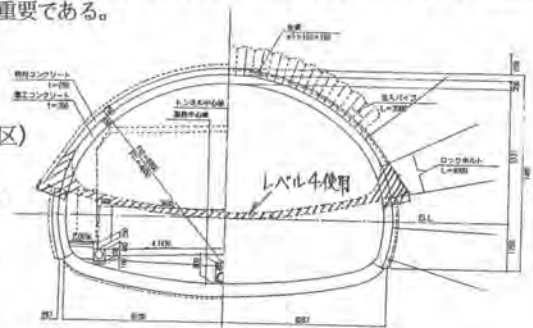


図 3-5 トンネル断面

(2) 高強度吹付コンクリートの概要

高強度吹付コンクリートは、プラントで添加する混和剤 (高性能減水剤、 Σ ショット、 Σ ショット S 等) と吹付用急結剤 (ナトミック Type-10、Type-10S) を吹付コンクリートに添加配合することにより得られるものである。従来の吹付と比べ飛躍的に高強度を得ることができ、且つ、耐凍結融解抵抗性の向上も図っている。

本工事においては、崩落性の地山 (砂礫層) 区間で、ウイングリブの根付けコンクリートと上半仮インパートに高強度吹付コンクリートを用い、初期強度が最も高くなる混和剤 Σ ショット S と急結剤 Type-10S で施工を行った。尚、本吹付コンクリートの強度は $\sigma_{10min}=4.7$ 、 $\sigma_{1D}=18.6$ 、 $\sigma_{7D}=36.4$ 、 $\sigma_{28D}=48.0N/mm^2$ を示した。

(3) 配合

本工事の細骨材は、粗粒率が大きい (2.85%) 上に 0.3mm アンダーが少なく (12%程度)、手にふれた感触はザラザラしていた。このため、通常吹付の際は一般的なセメント量 (360kg) での配合では、コンクリートに流動性が不足し、吹付機が閉塞を起こすため、コンクリート $1m^3$ 当たりのセメント量を 20kg 増加する必要がある。

表 3-3 に通常吹付と比較した高強度吹付の配合を示す。

表 3-3 基準とした配合

種類	W/C (%)	S/a (%)	C (kg)	P (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)
通常	57	65	380	—	216	1104	598
高強度	43	63	400	40	189	1041	621

(注) 高強度吹付コンクリートの W/C は次式より求めている。

$$\text{水 (W)} / (\text{セメント (C)} + \text{混和剤 (P)})$$

(4) 自動スランプ装置の設定

通常吹付コンクリート使用時、自動スランプ調整装置の設定基準値は、目標スランプを $10 \pm 2\text{cm}$ 、ミキサ電流値を 26.5A としていた。

これに対し、高強度吹付コンクリートは、粘性が高く、吹付機（ダイナミックローリ 2025GV）の施工性に影響するため、目標スランプを 20cm 以上として配合試験を行った。その結果、表 3-3 に示した配合において、スランプ 23.5cm 、スランプフロー 38.5cm 、ミキサ電流値 28.4A が得られた。この結果を基準として、スランプ、スランプフロー及びミキサ電流値と細骨材の表面水率との相関を求めた結果を図 3-6 に示す。

図 3-6 から、高強度吹付コンクリートは、表面水率が小さい領域「A」におけるスランプ変化量が小さく、設定値を決定するに不適當であることがわかった。そこで、スランプフローに着目すると、その変化量は設定値を決定するに十分であり、特性も通常吹付コンクリートと同様な曲線となることがわかる。よって、自動スランプ調整装置の設定値はスランプフローと電流値の相関から表 3-4 のように定めた。

表 3-4 自動スランプ調整装置の設定値
(高強度吹付コンクリート)

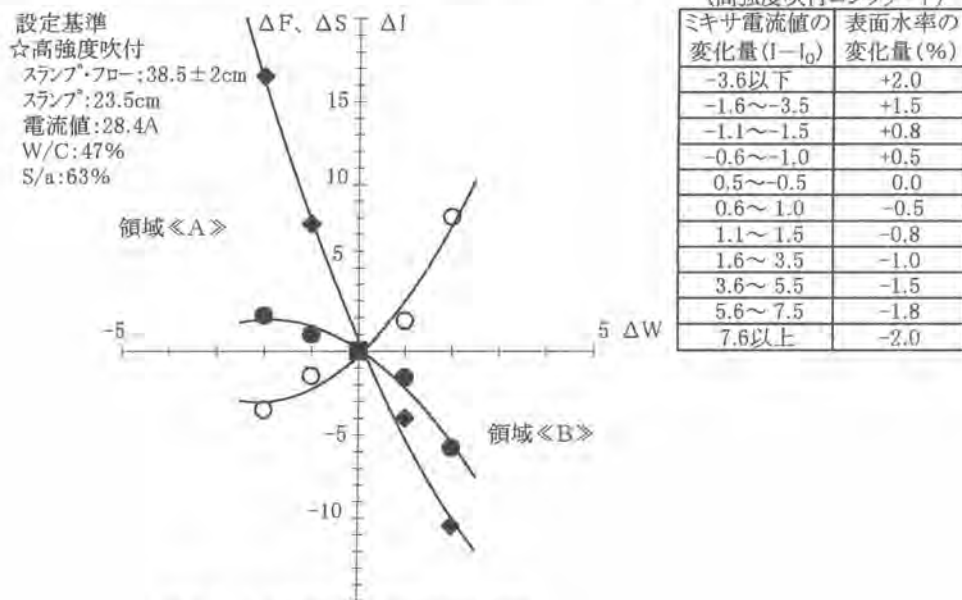


図 3-6 ミキサ電流値と表面水率の相関

(5) 自動スランプ調整装置の適応性

図 3-6 より、次の事が言える。

- ① 設定基準よりスランプ（スランプフロー）が大きい「A」の領域では、表面水率の変動に対しスランプの変動が少なく、スランプによる管理は不適當である。しかし、対照的に、スランプフローの変動は大きく、しかも直線な変化であるため、管理に適している。
- ② 設定基準よりスランプ（スランプフロー）が小さい「B」の領域では、①とは逆に少ない表面水率の変動で、スランプの変動がある。これは、混和剤の増粘効果のためと考えられる。
- ③ 通常吹付におけるスランプの特性（表面水率との相関）と、高強度吹付におけるスランプフローの特性は類似している。

以上から、三日町トンネルでは、高強度吹付コンクリートの品質管理をスランプフローを用いて行ったが、問題なく吹付施工を終了した。

3-3. 高品質吹付コンクリート（秋浦トンネル）

(1) 工事概要

工事名称：東北幹、秋浦トンネル他工事
 発注者：日本鉄道建設公団
 工期：平成9年8月5日～平成12年2月12日
 概要：延長 835m（内トンネル区間 690m）
 工法：NATM、発破、ミニベンチカット

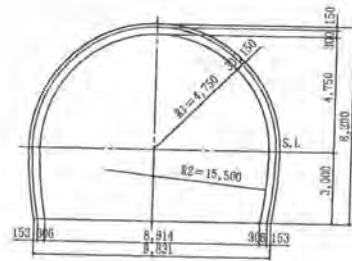


図3-7 トンネル断面（P-A）曲

(2) 高品質吹付コンクリートの概要

高品質吹付コンクリートは、セメントの一部をシリカフュームと呼ばれる微粒子、砂の一部を石灰石微粉末（CaCO₃）で置き換え、それらを含むコンクリート材料を分割練混ぜ工法（SEC）^(注1)により練り混ぜることで、従来よりも粘性が高く付着性の良いコンクリートを得て、リバウンド率の向上と粉塵発生量の低減を図るものである。

（注1）分割練混ぜ工法（SEC）のコンクリートプラントには、モルタル先練り方式と全骨材造穀方式があり、混練りミキサがパン型には前者を二軸ミキサには後者を採用している。

秋浦トンネルでは、二軸ミキサを採用したため、練混ぜ方は以下のように実施した。

【全骨材造穀方式】



但し、SFとCaCO₃は事前混合であり、Cと累積計量である。

(3) 配合

試験練りの際、基準とした現場配合を表3-5に示す。

表3-5 基準とした現場配合

W/C (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m ³)						
		水	結合材		細骨材		粗骨材	添加剤
			セメント	シリカフューム	砂	石灰		
		W	C	SF	S	CaCO ₃	G	(高性能減水剤)
60	62	216	342	18	1020	90	690	2.52

（注1）高品質吹付コンクリートのW/Cは次式より求めている。

水 (W) / (セメント (C) + シリカフューム (SF))

（注2）高品質吹付コンクリートのS/aは次式より求めている。

砂 (S) / (砂の比重) + CaCO₃ / (CaCO₃の比重)

砂 (S) / (砂の比重) + CaCO₃ / (CaCO₃の比重) + 粗骨材 (G) / (粗骨材の比重)

砂の比重：2.68 CaCO₃の比重：2.70 粗骨材の比重：2.72

(4) 自動スランプ調整装置の設定

自動スランプ装置は、ミキサの負荷電流を基に、細骨材の表面水率に補正をかけ、所定のコンクリートスランプを得る装置であるが、高品質吹付コンクリートのような緻密で粘性の高いコンクリートにおいては、負荷電流の変動が小さく、表面水率の補正を明確化できない状況が生じる。そこで、インパータを組込み、ミキサへの負荷を（3割程度）増大させた。（図3-8）

次に、切羽段階でのスランプ目標値を 8±2cm とするために、試験練り段階において、スランプの経時変化を何点か測定した。吹付プラントからの出荷から吹付開始までの時間は、40～60分程度と判断し、それに見合うスランプの経時変化を確認したところ、

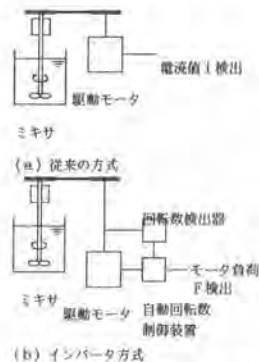


図3-8 従来方式とインパータ方式の相違

図3-9 が得られた。

図3-9 から、コンクリート出荷時における自動スランブ調整装置の目標スランブを $15.5 \pm 2\text{cm}$ (ミキサモータ負荷 32.9%, スランブ 15.5cm) とし、これを設定基準値とした。これより、スランブ及びミキサモータ負荷と表面水率の相関を求めた結果を図3-10 に示す。

図3-10 を基にスランブ値とミキサモータ負荷の相関から、表面水率の補正を、表3-6 のように求めた。

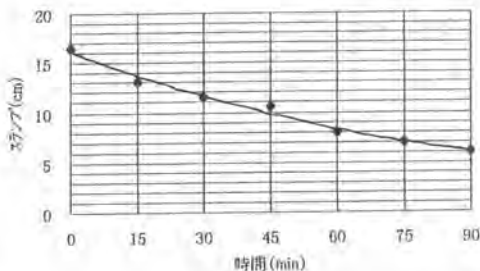


図3-9 高品質吹付コンクリートにおけるスランブの経時変化

表3-6 自動スランブ調整装置の設定値
(高品質吹付コンクリート)

ミキサモータ負荷の変化量 ($F-F_0$)	表面水率の変化量 (%)
-2.0以下	+1.0
-1.6~-1.9	+0.8
-1.3~-1.5	+0.6
-1.0~-1.2	+0.4
-0.3~-0.9	+0.2
1.0~-0.2	0.0
1.1~1.5	-0.2
1.6~2.0	-0.4
2.1~3.0	-0.6
3.1~3.5	-0.8
3.6以上	-1.0

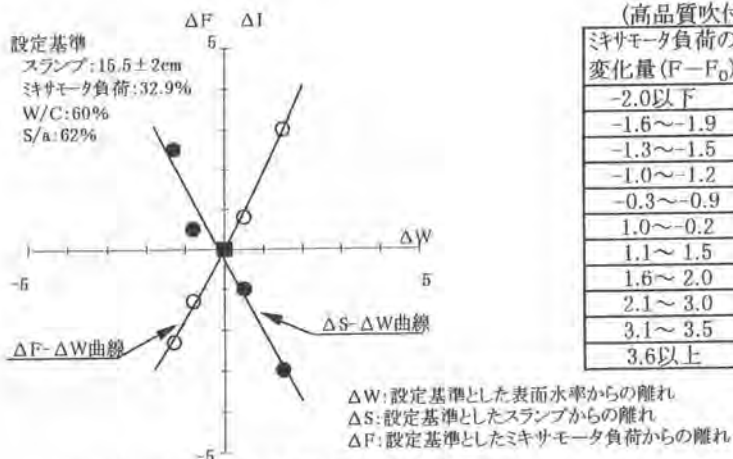


図3-10 ミキサモータ負荷と表面水率の相関

(5) 自動スランブ調整装置の適応性

上記事項より、次の事がわかった。

- ①高品質吹付コンクリートは、スランブダウンが通常のコンクリートよりも早いいため、事前にスランブの経時変化を測定し、切羽におけるスランブ基準を吹付プラントにおける自動スランブ調整装置の設定値に回帰する必要がある。
- ②インバータを組込み、ミキサモータ負荷を増大させることで、従来方式の通常吹付におけるスランブ特性（表面水率との相関）と類似したスランブ特性を得ることができる。
秋浦トンネルは、以上の方式を採用しているが、特に問題なく吹付施工を行っている。

4. おわりに

これまでに、自動スランブ調整装置は吹付コンクリート施工において以下に示す効果を上げている。

本装置は、工事当初に一旦設定してしまえば、材料（特に細骨材）の特性の大きく変化しない限り、安定した品質のコンクリートを供給可能である。

高強度吹付コンクリートのような流動性の高い材料においても、スランブフローによる管理で対応可能である。

更に、高品質吹付コンクリートのように緻密で粘性の高い材料においては、スランブダウンを回帰させ、インバータによるミキサモータ負荷を増大させることで対応可能となる。

最後に、本報告書の作成にあたり多大なご協力を頂いた詰坂トンネル（作）、三日町トンネル（作）、秋浦トンネル（作）をはじめ、関係者各位に深く御礼申し上げます。