

1000m流下させた高流動コンクリートによる鉄管背面充填工

寺田文男* 岡田 章**
岩本容昭* 松田敦夫***

1. まえがき

神流川発電所は、長野県南相木村を流れる信濃川水系南相木川の最上流部に上部ダム、群馬県上野村を流れる利根川水系神流川の最上流部に下部ダムを建設し、有効落差 653m を利用して最大出力 282 万 kW(単機出力 47 万 kW×6 台)の発電を行う揚水式発電所であり、東京電力(株)により平成 17 年 7 月の運転開始を目指して現在建設中である。この発電所における水圧管路斜坑部(勾配 48°、L=935m)は、トンネルを全断面斜坑 TBM (φ6,600mm)で下部より掘削したのち、上部より搬入した鉄管(内径φ4,600mm、単位長 15.0m)を下部まで運搬して据付け、単位管を 2 本(30m)据付ける毎に鉄管背面をコンクリートで充填する方法で施工される。図-1に神流川発電所の概要を示す。

東京電力(株)がこれまで建設してきた揚水式発電所において、水圧管路斜坑部の充填コンクリートには、普通コンクリートが用いられてきた。しかし、普通コンクリートを上部より打設する場合、流下距離が極端に長いと特殊シュートを用いても材料分離を完全に防

ぐことは難しかった。また、締固め作業を行うための足場を急勾配の斜坑内で製作する必要があり、安全性および施工性に課題があった。神流川発電所は、これまでの揚水式発電所と比べ水圧管路斜坑部の延長が長く、さらにコストダウンの観点から高張力鋼 HT100 を用い、従来地点以上に岩盤負担率を高め鉄管の肉厚を薄くする設計となっている。このため、岩盤と鉄管の間に充填されるコンクリートは、これまで以上に高い品質が要求された。そこで、充填コンクリートに高流動コンクリートを適用することにより、充填コンクリートの品質を向上させるとともに、締固め用の足場を省略し、作業の安全性を向上させることを考えた。締固め用の足場の省略は施工サイクルの短縮にもつながり、経済性の向上も期待できた。

全長 960m、48° の下り勾配のコンクリートの搬送は前例がなく、いくつかの施工実験を繰返し、施工可能な設備や配合について検討した。その結果、960m 流下しても、材料分離せず高い流動性を保つ高流動コンクリートを開発することができ、施工を開始するに至った。

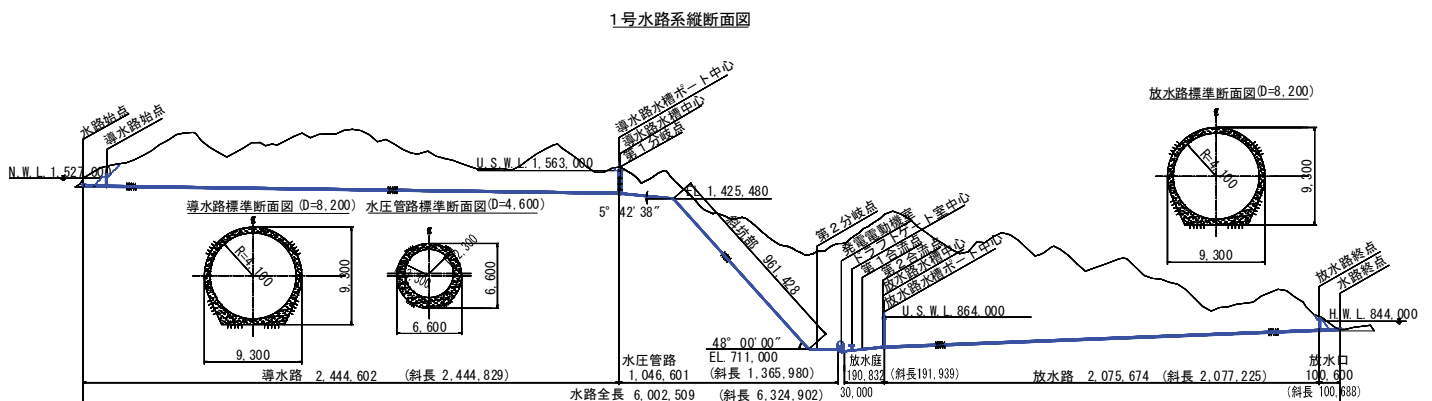


図-1 神流川発電所概要

*東京支社土木部 **東京支社土木技術部 ***技術研究所

2. 要求性能および配合設計

水圧管路斜坑部の施工に先立ち、高流動コンクリートの配合設計を行った。水圧鉄管の岩盤負担設計より、充填コンクリートの要求性能として、鉄管とコンクリートの間に生じる初期間隙量を0.2mm以下とし、静弾性係数を20.6kN/mm²以上とすることが求められた。また、打設箇所は無筋であるが、流動距離が最大8m程度必要であることからフレッシュコンクリートの流動性および充填性の目標値を表-1のように設定した。

鉄管とコンクリートの間に生じる初期間隙量を小さくするためには、コンクリートの硬化収縮を小さくする必要がある。このため、増粘剤系の高流動コンクリートを用いて、コンクリート中の単位セメントの量を極力少なくする方針で配合を検討した。初期間隙量については、コンクリートの熱物性値試験結果に基づいて温度応力解析を行い、さらに自己収縮試験の結果を加えて評価した。配合試験の結果、所定の要求性能を満足するためには、セメントを30%フライアッシュで置換した場合で、粉体量を400kg/m³以下としなければならないことが分かった。この結果に基づいて基本配合を表-2のように決定した。

表-1 流動性および充填性の目標値

評価項目	評価方法	目標値
流動性	スランブフロー	55±5cm
材料分離抵抗性	50cm到達時間	3~15秒
充填性	U形充填高さ(ランク3)	300mm以上

3. コンクリート圧送設備

高流動コンクリートを960m流下させるにあたり、コンクリートが材料分離を起こし配管内で閉塞することが危惧された。材料分離抵抗性を上げるためには、配管径を小さくし、満管の状態にすることが望ましい。しかし、配管径が小さすぎると、抵抗が大きくなりすぎ圧送できなくなる。そこで、コンクリート圧送管のサイズを決めるために、現場で配管延長50m程度(斜坑部は17mの折り返し)の流下試験を実施し、5インチ管と4インチ管の圧力損失および流下状況の違いを確認した。その結果、4インチ管では、圧力損失が非常に大きいことと、流下後のコンクリートのスランブフローが低下することが確認された。一方5インチ管では、流下時に粗骨材が若干飛び出すこと現象が見られた。これらの結果を踏まえて、水平部(150m)では圧送抵抗を小さくし打設速度を上げるために5インチ管とし、斜坑部(960m)では、配管内のコンクリートをできるだけ満管に近い状態にして材料分離抵抗性を高めるために4インチ管を採用した。

図-2に打設方法を示す。コンクリート圧送管の最大延長は、1,110m、コンクリートポンプには、最大吐出圧12Mpaの超高压ポンプを使用した。

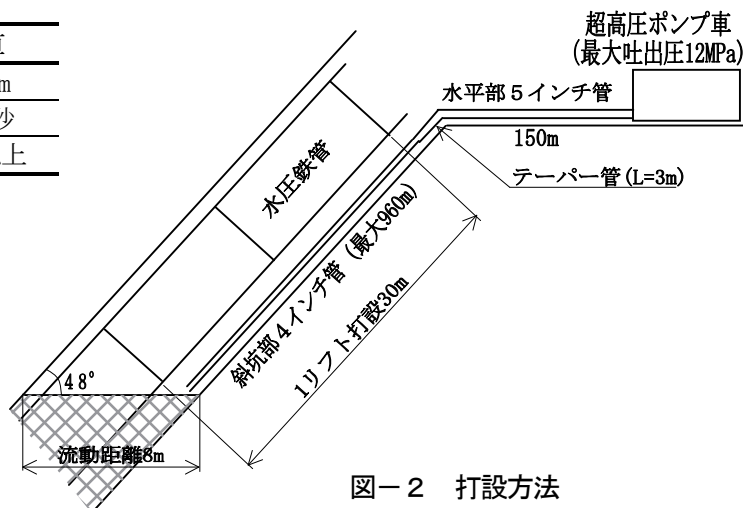


図-2 打設方法

表-2 基本配合および使用材料

W/P %	F/P %	粗骨材容積 m ³ /m ³	空気量 %	単位量 kg/m ³						
				W	C	FA	S	G	SP	VA
47	30	0.31	4.5	180	266	114	865	828	5.7 1.5%P	0.29 0.16%W

使用材料 セメント C: 普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm³、ライアッシュ FA: 常磐火力7号炉産、密度 2.10g/cm³
 細骨材 S: 神流川産砕砂、密度 2.65g/cm³、粗骨材 G: 神流川産砕石、最大寸法 20mm、密度 2.67g/cm³
 高性能 AE 減水剤 SP: レオビルド SP8SBM、ポリカルボン酸系、増粘剤 VA: SFCA2000、水溶性セルロースエーテル

4. 実施工試験および示方配合

コンクリート圧送管の設置完了後、圧送によるコンクリートの性状の変動を確認するために実施工試験を実施した。実施工試験は、まず表-2に示す基本配合で現場プラントにおいて試験練りを実施し、目標のフレッシュ性状となるよう混和材の添加量を調整した。次に、決定した配合で試験打設を行い、圧送後の試料を採取し試験を行った。その結果、配管内での材料分離は見られなかったが、圧送前に60cm以上あったスランプフローが圧送後に40cm以下となり、著しいスランプフローロスが生じた。この原因として、

- ① 1km近い距離を流下する間に、コンクリート中の高性能AE減水剤の効果が低下した
- ② 部分的に満管状態が起こり、その前後で著しい圧力差が生じ、コンクリートの性状に影響を与えたことなどが考えられた。そこで、
 - ① 高性能AE減水剤を遅延タイプのものに変更する
 - ② 高性能AE減水剤および増粘剤の添加量を増やす
 - ③ 斜坑頂上部の配管に空気弁を設け、配管内で圧力差が生じないようにする

といった対策を講じた。遅延タイプの高性能AE減水剤は、事前に現場プラントにおいて試験練りを実施し、増粘剤とのバランスを考え添加量の調整を行った。再試験では、圧送後のスランプフローロスを考慮して、

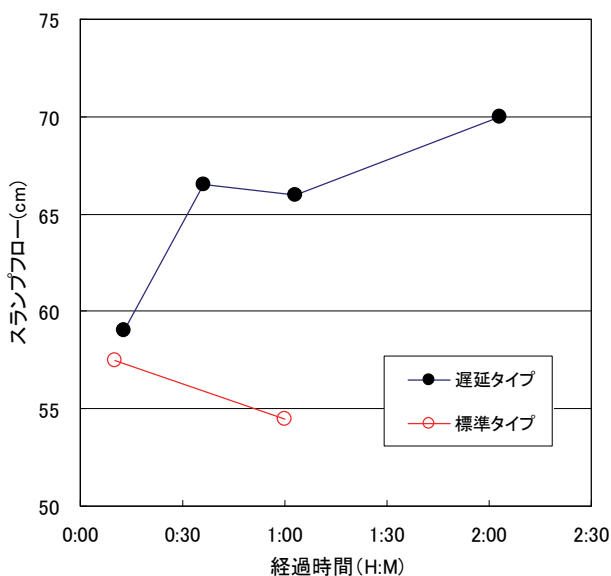


図-3 高性能 AE 減水剤の種類とスランプフローの経時変化

圧送前のスランプフローをできるだけ大きくするべきであると考え、スランプフローの目標値を 55 ± 5 cm から 65 ± 5 cm に変更した。図-3に標準タイプと遅延タイプの高性能 AE 減水剤使用時のスランプフローの経時変化を示す。標準タイプは、1時間経過後にスランプフローが減少しているのに対し、遅延タイプは、練混ぜ直後から2時間経過するまでに10cm程度伸びており、スランプ保持性能の違いが明瞭である。再試験は、まず遅延タイプの高性能 AE 減水剤を2.0%添加した配合で行った。その結果、圧送後のスランプフローロスがほとんどなく、最初の試験で問題となった流下による流動性の低下を改善することができた。次に、増粘剤の添加量は変えずに、高性能 AE 減水剤の添加量を1.8%、1.6%、1.5%と段階的に少なくしていった。図-4に高性能 AE 減水剤の添加量と圧送後のスランプフローロスの関係を示す。高性能 AE 減水剤の添加量が1.8%までは、圧送後のスランプフローロスは、ほとんど見られないが、1.6%で15cm程度、1.5%においては最大で31cmのスランプフローロスが生じた。この結果より、高性能 AE 減水剤の添加量は、1.7%以上必要であると判断し、示方配合を表-3に示すように決定した。なお、工事の進捗に合わせ骨材の採取場所が下部ダムサイトから上部ダムサイトが変わったが、示方配合を決定する上で大きく影響することはなかった。

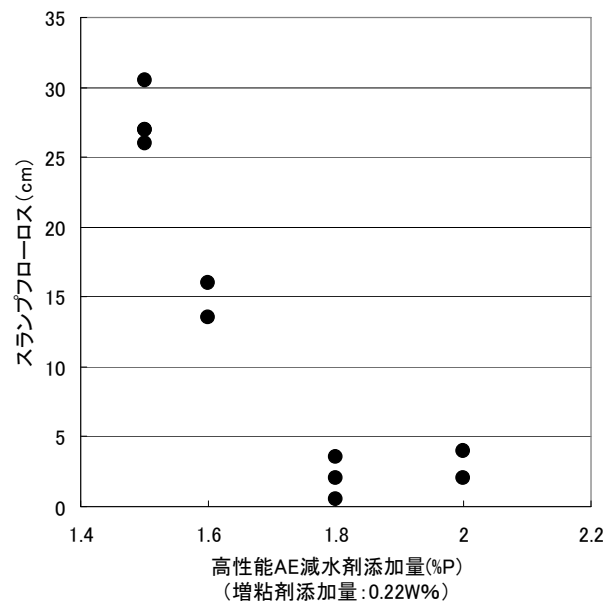


図-4 高性能 AE 減水剤添加量とスランプフローロスの関係

表－3 示方配合および変更した使用材料

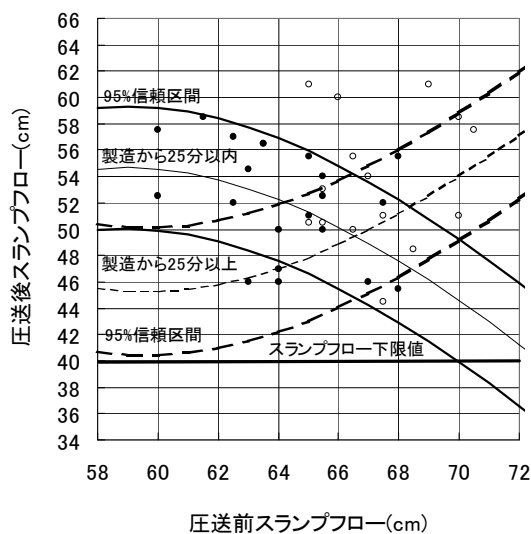
W/P %	F/P %	粗骨材容積 m ³ /m ³	空気量 %	単位量 kg/m ³						
				W	C	FA	S	G	SP	VA
47	30	0.31	4.5	180	266	114	843	846	6.5 1.7%P	0.40 0.22%W

使用材料 セメントC：普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm³、フライアッシュ：FA：常磐火力7号炉産、密度 2.10g/cm³
 細骨材S：川上村川砂、密度 2.58g/cm³、粗骨材G：神流川上部ダム（玄武岩、石灰岩）、最大寸法 20mm、密度 2.73g/cm³
 高性能 AE 減水剤 SP：レオビルド SP8SBLL、ポリカルボン酸系、増粘剤 VA：SFCA2000、水溶性セルロースエーテル

5. 品質管理基準

5.1 フレッシュコンクリートの品質管理基準

品質管理試験は、圧送後に行うことが困難なため、全て圧送前の試験で評価することとした。そこで決定した示方配合で、圧送試験を行い 50 以上の圧送前後の試験データを採取した。この試験結果を重回帰分析を実施し、圧送前の測定値から圧送後の性状を予測した。スランプフローは、全体で分析してもよい結果が得られなかったが、製造から圧送までの時間を 25 分以内と以上で分けて分析することによって、自由度調整済決定係数が 0.8 を越える良好な結果が得られた（目的変数：圧送後スランプフロー、説明変数：圧送前スランプフロー、圧送前 50cm 到達時間、製造から圧送までの時間）。図－5 に圧送前のスランプフローと圧送後スランプフローの関係を示す。図中には、重回帰分析による予測値と 95%信頼区間を示した。製造から圧送までの時間が 25 分以内の場合、圧送後のスランプフローは圧送前のスランプフローに対して単調減少する。しかし、製造から圧送までの時間が 25 分以上の場合、逆に単調増加する傾向がある。図－5 より、圧送後のスランプフローの下限値を 40cm とし



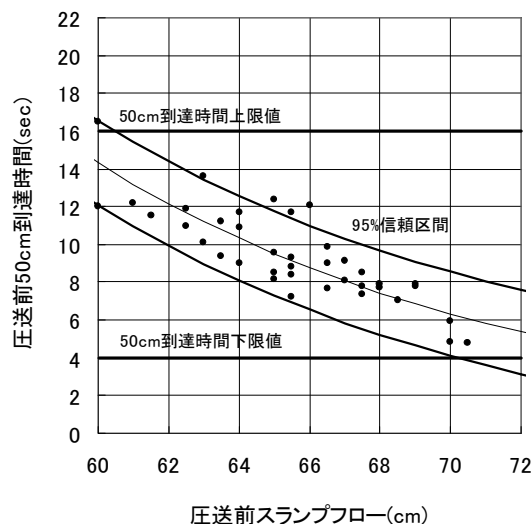
図－5 圧送前後のスランプフローの関係

た場合、圧送前のスランプフローを 60cm～70cm の範囲内で管理すればよいと判断した。

図－6 に圧送前のスランプフローと 50cm 到達時間の関係を示す。圧送前のスランプフローと 50cm 到達時間には比較的強い負の相関（相関係数：-0.835）が見られる。図中には、近似曲線（ $y=1939.1e^{-0.0818x}$ ）と 95%信頼区間を示した。図－6 より、スランプフロー60cm～70cm に対応する 50cm 到達時間は、4 秒～16 秒となる。空気量およびコンクリート温度については、圧送することにより空気量が 1～2%増加し、コンクリート温度が 2～3℃上昇する結果となった。この結果より、圧送前の管理基準は、圧送後の目標値から流下による増加分を差し引いて、空気量を 0.5～3.5%、コンクリート温度を 5～30℃とした。以上のことより、品質管理基準を表－4 に示すように決定した。

表－4 品質管理基準

品質管理項目	管理基準
スランプフロー	65±5cm
50cm 到達時間	4～16 秒
空気量	2±1.5%
コンクリート温度	5～30℃



図－6 圧送前のスランプフローと 50cm 到達時間の関係

5.2 硬化コンクリートの品質管理基準

硬化コンクリートの要求性能は、静弾性係数が20.6kN/mm²以上であることである。現場で静弾性係数試験を適宜行うことは難しいため、圧縮強度と静弾性係数に相関があることを利用して、品質管理試験には圧縮強度試験を適用した。神流川地点の骨材を用いた配合試験実績に基づく圧縮強度と静弾性係数の関係および、現場で採取した試料による静弾性係数試験の結果より、圧縮強度として21N/mm²以上あれば静弾性係数20.6kN/mm²以上を確実にクリアすると判断し、品質管理基準を決定した。

6. 施工結果

6.1 配管の中のコンクリートの流れ

実施工で最も心配されたのは、材料分離に起因する配管の閉塞である。施工前は、粗骨材が分離し先行して流下していく途中でアーチングを起こし閉塞する可能性があると考えていた。しかし、実際には、48°の下り配管内では、粗骨材だけが自然流下したとしてもアーチングが生じることはなく、逆に粘性が大きく材料分離抵抗性の高いコンクリートを圧送した場合に配管が閉塞ぎみになる現象が当初見られた。これは、粘性が大きすぎると斜坑部での流れが安定せず配管内でコンクリートが疎密状態になり、空気弁より空気を供給しているにも関わらず、負圧が発生し、コンクリートの性状に悪影響を与えるためであると考えられる。

斜坑頂上部の配管に設けた空気弁は、当初自然に給気する構造としていたが、打設中にコンクリートが固着し、弁としての機能が失われるため、圧縮空気を入

れる構造にした。このため、コンクリートの流下速度に合わせた空気量の調整が必要であると思われたが、コンクリートが比較的流動性がよく流下速度が速い場合、コンクリートの性状に多少のばらつきはあっても、施工上問題はなかった。しかし、粘性がある程度大きくなると極端に流れが悪くなり、流入している空気量を調整する必要があった。このため、打設中は、打設箇所と連絡をとり必要に応じて空気量を調整した。

6.2 フレッシュ試験結果

図-7にフレッシュ試験結果を示す。試験回数170回（第13リフト、7月初旬）よりスランプフローが10cm以上大きくなった。しかし、材料分離抵抗性の指標である50cm到達時間、コンクリート温度、および空気量にはほとんど変化がなかった。流下後のコンクリートには、特に材料分離の傾向が見られなかったため、スランプフローの管理基準値を見直し施工を続けた。コンクリートの塑性粘度の変化が小さく、降伏値のみが小さくなったことは、原料炭の違いによるフライアッシュの品質変動が原因と考えられた。



写真-1 品質管理試験

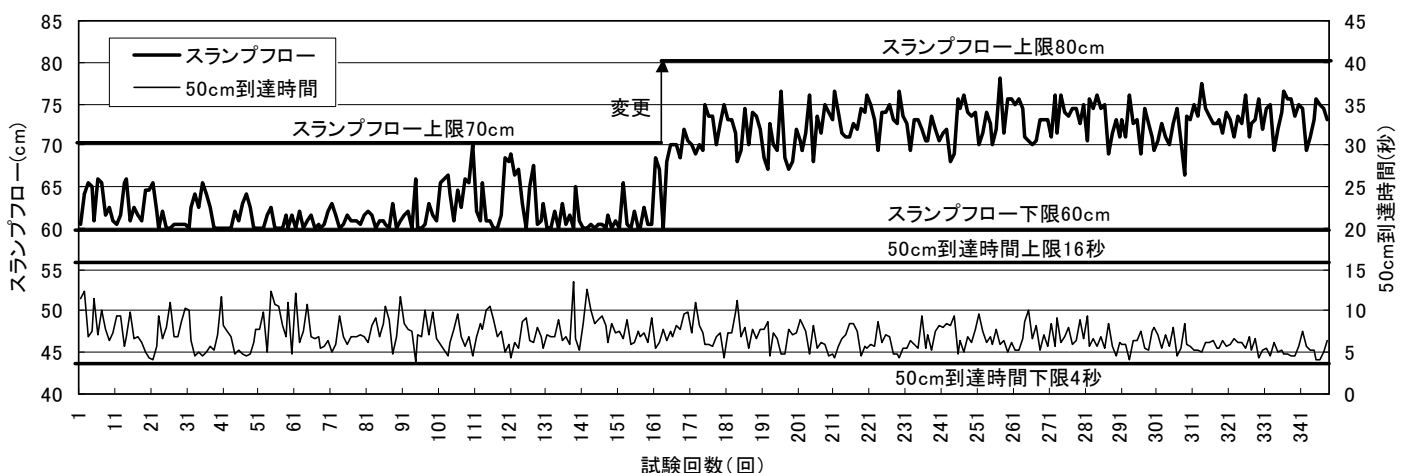


図-7 品質管理試験結果

6.3 圧縮強度試験結果

表-5に圧縮強度試験結果を示す。28日強度の平均値は40.4、N/mm²であり管理基準値21N/mm²を大幅に上回る結果となった。

表-5 圧縮強度試験結果

	σ_7	σ_{28}
試験回数(回)	5	107
平均値(N/mm ²)	21.0	40.4
最大値(N/mm ²)	24.1	48.5
最小値(N/mm ²)	16.6	25.7
標準偏差(N/mm ²)	2.47	3.89
変動係数(%)	11.75	9.64

6.4 配合調整について

a. 流下距離短縮に伴う配合調整

当初、工事が進捗しコンクリートが打ち上がってくると流下距離が短くなるため、コンクリート中の高性能 AE 減水剤および増粘剤の添加量を少なくできると考えていた。しかし、高粘性により閉塞気味になることがしばしばあったため、混和剤を少なくすると閉塞の危険性が高まると判断し、流下距離が短くなることによって配合を調整することはなかった。

b. 品質変動に伴う配合調整

第13リフト施工時(流下距離570m)より、フライアッシュの品質変動に起因すると考えられるスランプフローの増大が見られ、圧送前のスランプフローが品質管理基準の70cmを超えた。そこで、増粘剤の添加量は変えずに、高性能 AE 減水剤の添加量を段階的に減少させていったところ、添加量を1.5%まで下げたときに圧送圧が高くなり配管が閉塞気味になった。このため、高性能 AE 減水剤の添加量を1.6%に調整して施工を続けた。

6.5 圧送中断による品質への影響について

当初、コンクリート運搬車を入れ替えるため4.5m³圧送する毎に1分程度圧送を中断していた。この間に上流の配管内のコンクリートが斜坑内の配管に流れ出し、自然流下していた。自然流下するコンクリートは流量が少ないため一部の粗骨材が分離して打設箇所まで落ちてくる現象が見られた。落下してくる粗骨材の量は極僅かであり、配管が閉塞したり打設されたコンクリートの均質性が損なわれるようなものではなかった。しかし、配管長を10m程度延長することによって

コンクリート運搬車を2台並べることができたので、入れ替えの時間ロスをなくし、圧送を中断することなく打設できるようにした。



写真-2 コンクリート打設状況

7. 今後の課題

高流動コンクリートの施工は、締め固め作業の必要がなく、打設箇所ではコンクリートの状態の確認と配管の切離し作業を行うだけであり、作業の省力化という面で非常に優れた施工方法であると思われる。

今回、材料分離抵抗性を上げるため斜坑内の配管を4インチ管としたが、ポンプの圧力が限界に近かったため打設速度を思うように上げることができなかった。ポンプの吐出量には十分余裕があったので斜坑内の配管を5インチ管にしても、ほぼ満管の状態での打設することが可能であったと思われる。今後同様の施工を行う場合には、配管径の検討を改めて行うことによって、施工サイクルの短縮を図ることができると考えられる。

8. あとがき

水圧鉄管背面の充填コンクリートは材料分離や閉塞によるトラブルもなく、平成16年3月無事施工を完了することができた。1リフトの打設量は450m³であり、総打設量は14,240m³、月打設量は最大1,350m³であった。

最後に、斜坑高流動コンクリートの開発および現場施工に、ご指導いただきました東京電力(株)神流川水力建設所上野第二工事事務所の皆様に謝意を表します。