

発熱体を使用した寒中グラウトの養生方法の開発

坂西 馨*1・藤原 浩幸*2・正司 明夫*3・田中 友三*4

1. はじめに

PC鋼材のグラウトは、プレストレストコンクリート構造物の耐久性を確保するうえで重要な役割を有している。日平均気温が4℃以下となる時期は、寒中グラウトとして施工を行わなければならないが、適切な養生を行わなければグラウトの凍結により所定の強度を得ることができない、あるいは凍結によりグラウトが膨張し、シースに沿ってコンクリートにひび割れが発生することがある。

冬期間におけるグラウトの養生方法は、ジェットヒータを用いる方法やダクト内に電熱温床線を併設する方法などがあるが、とくにグラウト長が長い場合や、トラス橋のように内空部がなく外気に接する面が多い場合など施工現場の状況により養生温度を保つことは容易ではない。

そこで筆者らは、コンクリート内に電熱線を配置して、シース周辺のコンクリート温度を効率的に管理する方法を開発した。本稿はPC5径間連続複合トラス橋である志津見大橋で行った、発熱体を使用した寒中グラウトの実施状況について報告するものである。

2. 橋梁概要

志津見大橋の構造一般図を図-1に、全景写真を写真-1に示す。また、橋梁概要を以下に示す。

- 橋 梁 名：志津見ダム志津見大橋
- 発 注 者 名：国土交通省中国地方整備局
斐伊川・神戸川総合開発工事事務所
- 橋梁形式：PC5径間連続複合トラス橋
- 橋 長：280 000 m
- 橋梁所在地：島根県飯石郡飯南町志津見



写真-1 全景写真

3. 寒中グラウト養生概要

本稿で報告する寒中グラウトの養生方法は、図-2に示す発熱体となる電熱線をコンクリート内のシース近傍に設置し、電熱線に通電させることによりシース近傍のコンクリートをコンクリート標準示方書に示されている寒中グラウトの規定温度である5℃以上に保つ方法である。

使用した電熱線は、アスファルト舗装およびコンクリート舗装でロードヒーティングに使用される電熱線である。同電熱線はコンクリート舗装に多数の実績があり、また、電熱線の外周は2重被覆され、とくに中層のエチレンプロピレングムは耐アルカリ性に優れていることから、長期間埋設されてもコンクリートに与える影響はないと考えられる。

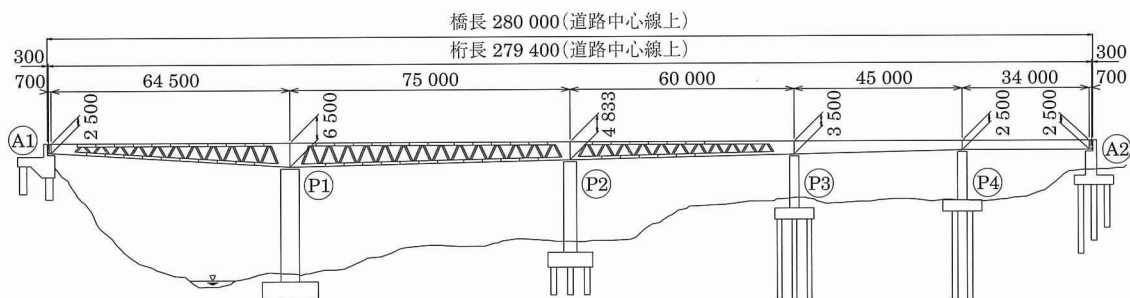


図-1 構造一般図

*1 Kaoru SAKANISHI：オリエンタル建設(株) 第二技術部
 *2 Hiroyuki FUJIHARA：国土交通省中国地方整備局 斐伊川・神戸川総合開発工事事務所
 *3 Akio SHOJI：オリエンタル建設(株) 第二技術部
 *4 Yuzo TANAKA：東亜電器(株)

養生温度の管理は、写真 - 2 に示す養生温度制御装置にシース近傍に設置した電熱線とコンクリート温度を常時計測するための熱電対を接続し、コンクリート温度が設定温度になるように電圧を制御することにより行う。

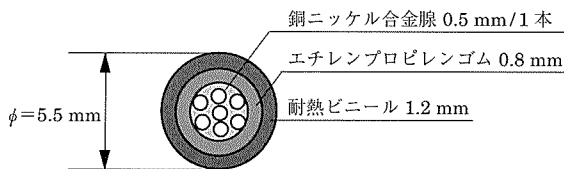


図 - 2 発熱体 (DK 6424)

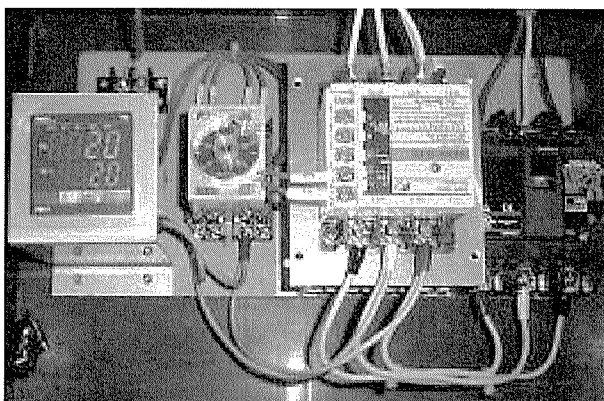


写真 - 2 養生温度制御装置設置状況

4. 非定常細線加熱法による供給熱量の推定

養生温度を所定の温度にするために、必要な発熱体の電力量を非定常細線加熱法¹⁾を用いて求める。

熱特性の均一な無限媒質に、熱容量のない無限長の針状熱源がある場合、初期温度 θ_0 [°C] の周囲媒質へ、熱源より一定熱量 q [cal / sec · cm] (時刻 t_0 より) を連続的に供給加熱すると、ある時刻 t_1 [sec] 経過後、熱源より距離 r (cm) 上の媒質中の温度 θ_1 [°C] は熱源を軸とする円柱座標をとれば、式 (1) のように表される。

一般に非定常細線加熱法は細線の発熱量とその温度応答から熱伝導率を測定する方法であるが、コンクリートの熱伝導率を既知として発熱体の発熱量と電力量を求めた。

$$\theta_{(r,t)} = \theta_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4kt}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \theta_0 - \frac{q}{4\pi\lambda} Ei \left(-\frac{r^2}{4kt} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

ここで、 λ : 媒質の熱伝導率 [cal / cm · sec · °C]
 k : 試料の熱伝播率 [cm² / sec]
 u : 積分変数

$$-Ei(-X) : \text{指数積分} = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

式 (1) は、 $t > r^2 / 4k$ となるように時間 t を充分大きな値にすると、近似的に次のようになる。

$$\theta \doteq \theta_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4kt}{r^2} - \gamma \right) \quad \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

ここで、 λ : オイラー定数 = 0.57721

式 (2) を用いて時間 t_1, t_2 の温度差 $\Delta \theta$ を求めれば

$$\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad \dots\dots\dots \text{式 (3)}$$

熱供給量 q [cal / sec · cm] は、電気抵抗の発熱量で与えられる。

$$q = VI / L = W / cm \quad \dots\dots\dots \text{式 (4)}$$

ここで、 V : 供給電圧 [V]
 I : 供給電流 [A]
 L : ヒーター全長 [cm]

5. 寒中グラウト実施手順

寒中グラウトを実施するにあたり、目標とする養生温度を得るための電熱線の必要本数と熱供給時間、必要電力量を以下の手順により検討した。

- 1) 寒中グラウト実施地域の冬期間の外気温を把握する。
- 2) 式 (4) よりグラウト長から必要な電圧および電流を把握し熱供給量 $[q]$ を求める。
- 3) 式 (3) より所定時間 $[t_2 - t_1 \text{ 時間}]$ に得られる電熱線の温度差 $\Delta \theta$ を求める。
- 4) 温度差 $\Delta \theta$ を温度解析モデルに与え電熱線の必要本数を決定する。
- 5) 温度解析によりグラウト実施前に所定の養生温度を得るまでの熱供給時間を求める。

6. 事前実験および温度解析

志津見大橋の寒中グラウトの養生方法に電熱線を使用するにあたり、電熱線の有効性を実験および温度解析により確認した。

実験は図 - 3 に示す志津見大橋の下床版を模擬した実験供試体を作成し、コンクリートの温度分布を計測することで電熱線の発熱効果を確認した。また、実験結果と温度解析結果を比較し、電熱線の効果を温度解析により表現できることを確認した。写真 - 3 に図 - 3 の断面を模擬した実験供試体を示す。

実験は室内で行い外気温度と供試体温度を同じ温度にしてから通電し約 84 時間発熱させた。供試体は側面に断熱材を貼り付けることにより、熱の橋軸方向および橋軸直角方

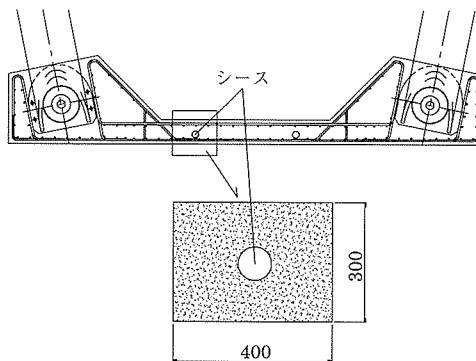


図 - 3 実験対象断面図

向の広がり を考慮した。温度解析に用いたコンクリートの物性値は、土木学会コンクリート標準示方書に示されるコンクリートの設計基準強度 40 N/mm^2 の値を用いた。

図 - 4 に温度解析結果を示す。電熱線の発熱効果によりシース周辺のコンクリートが温められているのがわかる。図 - 5 にシース中心位置の実験結果と解析結果の比較を示す。実験値と解析結果の差は最大で約 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ であり温度解析で電熱線がコンクリートの温度に与える影響を表現できることが確認された。

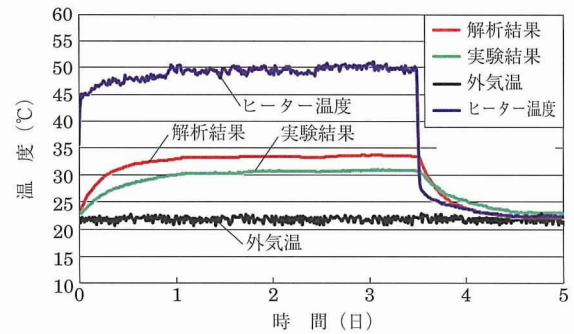


図 - 5 実験結果と解析結果の比較

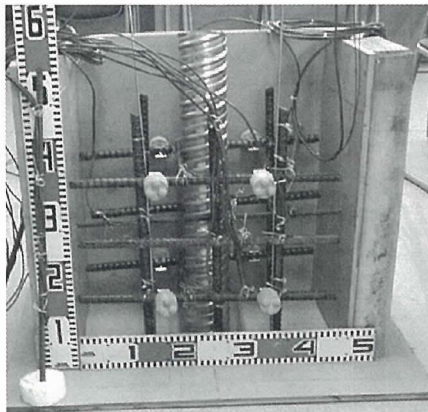


写真 - 3 実験供試体

7. 志津見大橋・寒中グラウト実施概要

志津見大橋において寒中グラウトとして施工が必要な PC 鋼材の配置位置を図 - 6 に示す。とくに P1 - P3 径間の CL 03 ケーブルは、グラウト長が約 130 m あり一般的な養生が困難な個所である。図 - 7 に電熱線を配置した下床版の断面図を示す。また、写真 - 4 に電熱線配置状況を示す。

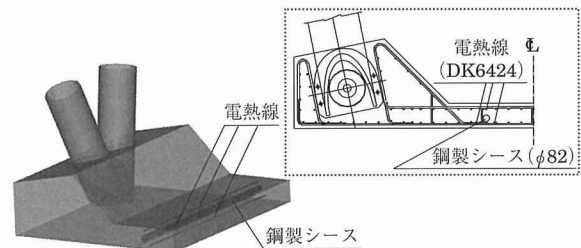


図 - 7 電熱線設置断面図

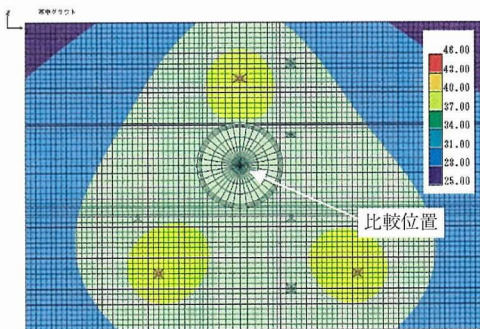


図 - 4 温度解析結果

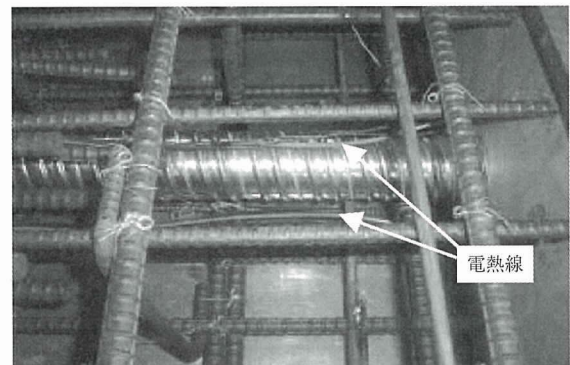
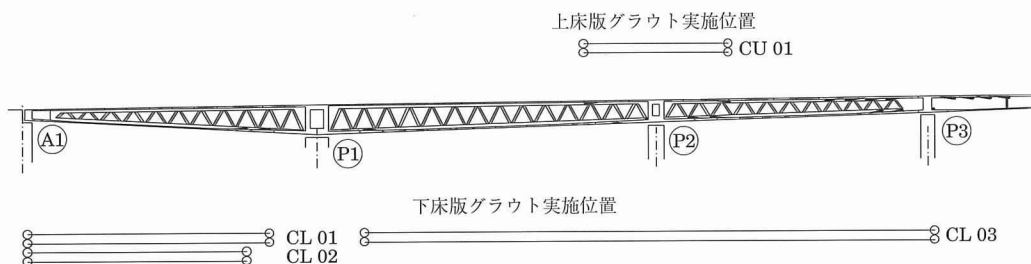


写真 - 4 電熱線設置状況



CU 01 : P2 橋脚上上床版, 約 $25 \text{ m} \times 2$ 本 CL 02 : A1-P1 下床版, 約 $50 \text{ m} \times 2$ 本
CL 01 : A1-P1 下床版, 約 $55 \text{ m} \times 2$ 本 CL 03 : P1-P3 下床版, 約 $130 \text{ m} \times 2$ 本

図 - 6 電熱線配置位置

○ 研究報告 ○

志津見大橋のP2橋脚上に配置(図-6:CL03)した電熱線について必要配置本数および必要電力量を5節にしたがって算出した手順を以下に示す。

- 1) 外気温は架設地点付近の図-8に示す過去のアメダス観測データから-5℃一定に設定した。
- 2) 熱供給量 [q] を式(4)から求めた計算結果を解(1)に示す。
- 3) [t₂-t₁時間]に得られる電熱線の温度差Δθを求めた計算結果を解(2)に示す。
- 4) 温度差Δθ [31.5℃]を温度解析モデル(図-9)のヒーター位置に固定温度として入力した。

温度解析モデルは2次元モデルとし、境界条件として側面は熱の授受が無いと考えられることから断熱温度境界とし、上下縁は熱伝達境界とした。初期条件となるコンクリートの初期温度は外気温から-5℃に設定した。温度解析に用いたコンクリートの熱特性値は土木学会コンクリート標準示方書を参照した。図-9に温度解析結果から最高温度分布図を示す。

温度解析結果からシース周辺のコンクリート温度が5℃以上になることを確認し、1本のシースに対して電熱線の配置本数を3本配置することとした。図-10に温度履歴図を示す。これによりグラウト施工実施1日前から電熱線によって熱を供給すれば、シース周辺のコンクリート温度が定常状態になることが確認できる。

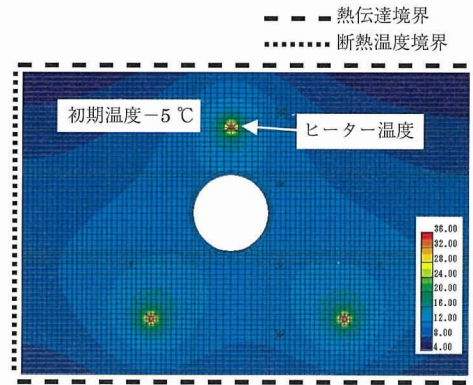


図-9 最高温度分布図

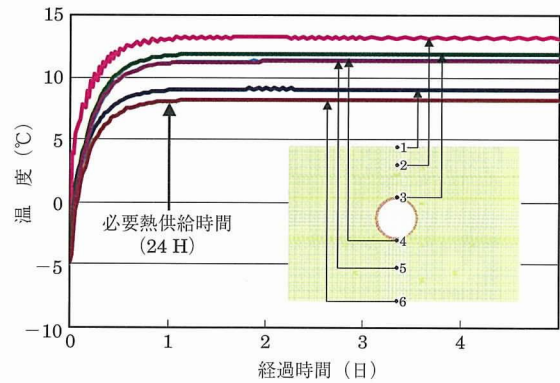


図-10 温度履歴図

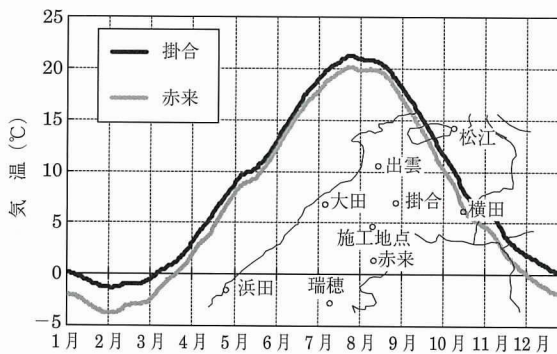


図-8 アメダス観測データ

以下に計算に用いた諸数値を示す。

コンクリート初期温度 -5 [℃]

熱伝達率¹⁾ α = 0.03346 [cal/cm·sec·℃]

熱伝導率²⁾ λ = 0.00692 [cal/cm·sec·℃]

ヒーター全長 L = 5000 [cm]

供給電流 I = 10 [A]

供給電圧 V = 100 [V]

式(4)より

熱供給量 q = 0.26 [W/cm] 解(1)

式(3)より

[t₂-t₁]時間に得られる電熱線の熱量Δθは

Δθ = 31.5 [℃] 解(2)

8. 寒中グラウト実施状況

写真-5は積雪時にP2橋脚上(CU01)の橋面状況を撮影したものであるが、電熱線を設置したコンクリート上縁において発熱効果により雪が融けているのが確認できる。

また、電熱線による発熱効果を確認するためサーモグラフィを使用して橋体の温度分布の撮影を行った。写真-6はP2-P3径間の下床版下縁に設置されている電熱線の位置を示したものである。同じ位置でサーモグラフィを使用して温度分布を撮影した画像を写真-7に示す。電熱線を配置した位置周辺でコンクリート温度が5℃以上に保たれ



写真-5 電熱線による雪融け

ているのが確認できた。

9. ま と め

本稿では、志津見大橋にて適用した発熱体を使用した寒中グラウトの養生方法の開発について報告した。本方法は発熱体となる電熱線をコンクリート内のシース近傍に配置してシース周辺のコンクリートを暖める方法である。

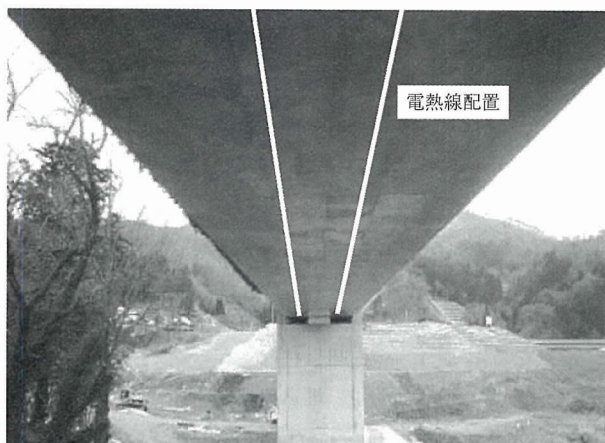


写真-6 電熱線配置位置

この養生方法は、検討した範囲で非定常細線加熱法と温度解析により必要電熱線数および電力量を容易に算出でき、

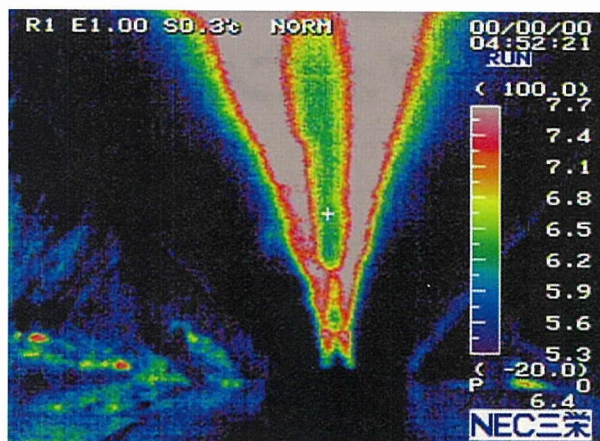


写真-7 サーモグラフィ画像

サーモグラフィの撮影結果からわかるように効率的にシース近傍のコンクリート温度を管理できることが確認できた。本方法はとくにグラウト長が長く養生範囲が広がる場合や、志津見大橋のようにトラス断面を有しているため内部空気がなく、外気に接する面が多いため養生するのが容易ではない場合に有効な方法であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 朝倉書店：熱計測技術，日本機械学会編

【2005年7月8日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成17年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去3年間の試験問題、正解及び解説が掲載されています。

(平成17年6月)

頒布価格：3500円(送料を含む)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会