

SMWの耐凍害性の検討および冬期施工時の壁体内温度履歴の測定

Frost Resistance and Curing Temperature in Wall at Cold Season Construction of Soil Mixing Wall

谷口 円 谷川 雅隆
Madoka Taniguchi Masataka Tanigawa

要 約

通常のコングリート比べて水セメント比が高いSMWを寒冷期に施工する場合、その表面が外気に曝されると、SMWの表面付近が凍害を受け、剥落などの問題の発生が懸念される。本報では、SMWの凍害防止対策の基礎資料を得るため、凍結融解試験および現場でのSMWの壁体内部の温度測定を行い、寒冷期におけるSMWの凍害調査を行った。凍結融解試験の結果から、SMWは数回の凍結融解作用によって、ひび割れが生じるなど耐凍害性能のあまり高くない材料であることが分かった。また、現場でのSMWの壁体内部の温度測定結果から、直接外気に曝されるSMWの壁体表面付近は、外気温の影響を受け易いことが分かった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 凍結融解試験
- § 4. SMWの壁体内部の温度測定
- § 5. まとめ

一般に、一軸圧縮強度の目標値を10kgf/cm² (0.98MPa)程度としているSMWは、通常のコングリートと比較して水セメント比が高い。そのため、寒冷期の地下掘削工事では、SMWの壁体表面が外気に曝されると、凍害を受け易く、壁体表面付近では剥落等の問題の発生が懸念される。寒冷期にSMWを施工する場合、現場では、これらの問題に対して、掘削直後にSMWの壁体表面を鉄板により覆う等の対策を講じているのが現状である。このようにSMWは、凍害を受け、止水性能や山止め性能等が損なわれる恐れがあるにも係わらず、SMWの耐凍害性に関する研究はこれまであまり行われておらず、また、それらに関する資料も少ない。

そこで、SMWの凍害防止対策の基礎資料を得るため、先ず、現場で採取したテストピースによる凍結融解試験を行った。次に、寒冷期における実際の施工現場でSMW

§ 1. はじめに

ソイルミキシングウォール（以下、SMW）は、止水壁と山止め壁等の性能を兼ね備えた地中壁であり、掘削土とセメント系懸濁液を孔壁内で攪拌・混合して造成する。

* 札幌(支)平岡(出)

** 札幌(支)北電室蘭(出)

の壁体内部の温度を測定し、SMWの冷却過程の温度履歴から、凍害の発生状況を調査した。

本報では、凍結融解試験結果および現場でのSMWの壁体内部の温度測定結果について述べる。

表-2 凍結融解試験に用いた供試体の諸元

| 名称 | サンプルの採取方法 | 養生時の条件 | | 凍結融解試験時の条件 | | |
|-----|-----------|--------|------|------------|----------------|----|
| | | 封緘 | 養生期間 | 試験前 給水 | 試験中 封緘 水分供給 | |
| D-1 | 打設時 | なし | 1ヶ月 | あり | なし | あり |
| C-1 | コア抜き | あり | 3ヶ月 | | なし | なし |
| C-2 | | | | あり | なし | |

§ 2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。また、SMWの施工状況を写真-1に示す。本工事で打設したSMWは、壁体深度が14m、壁体厚さが0.45mである。

§ 3. 凍結融解試験

3-1 試験方法

凍結融解試験に用いた供試体の諸元を表-2に示す。供試体は、打設時に採取したもの（以下、打設時サン

表-1 現場概要

| | |
|---------|---|
| 工事名称 | 北海道電力(株)室蘭支店改築工事 |
| 工事場所 | 北海道室蘭市寿町1丁目 |
| 発注者 | 北海道電力(株) |
| 施工 | 西松建設・黒光建設・岩倉建設・丸彦渡辺建設 北海電気工事・テクセル共同企業体 |
| SMW施工業者 | 成幸工業(株) |

ルと称す)と、打設後のSMWの壁体からコア抜きしたもの(以下、コア抜きサンプルと称す)の2種類である。打設時サンプルは、φ5cm×10cmの型枠から採取したものであり、脱型後水分が蒸発しないように、濡れウエスをかけ、恒温恒湿状態(気温20℃、湿度95%)で1ヶ月間養生した。コア抜きサンプルは、SMWを施工してから1ヶ月後に、SMWの壁体からφ5.2cmの大きさでコア抜きしたものであり、水分が蒸発しないようにポリエチレンフィルムで封緘し、恒温恒湿状態で3ヶ月間養生した。

凍結融解試験は、ASTMの標準試験方法C666-B法の気中凍結水中融解法¹⁾に準じて行った。打設時サンプルおよびコア抜きサンプルとも、通常のコンクリート試験の時と同様に24時間の給水後、封緘をしない状態で水分を供給しながら凍結融解試験を行った(以下、この条件での打設時サンプルを供試体D-1、コア抜きサンプルを供試体C-1と称す)。また、コア抜きサンプルについては、実際の現場の状態を考慮し、外部からの水分の供給がない状態を再現するため、凍結融解試験前の給水を行わずにポリエチレンフィルムで封緘し、水分を供給しない状態での凍結融解試験も行った(以下、この条件でのコア抜きサンプルを供試体C-2と称す)。

凍結融解のサイクルは、周辺環境を-18℃に設定して2時間凍結させ、5℃に設定して2時間融解させる、4時間1サイクルで行った。測定は、凍結融解開始前と凍結融解のサイクルが1、2、3、6サイクルの各サイクル終了時に、各3本ずつ、目視観察および一軸圧縮試験を行った。

3-2 試験結果

凍結融解試験結果を表-3に示す。

(1) 打設時サンプル

凍結融解試験開始前の平均圧縮強度は、13.2kgf/cm²(1.29MPa)であった。

凍結融解試験の結果、供試体D-1は、1サイクル後に全ての供試体にひび割れが発生した。ひび割れの発生状況を写真-2に示す。このひび割れによって、供試体は崩壊するだけの凍害劣化に至ったと判断し、一軸圧縮試験は行わなかった。

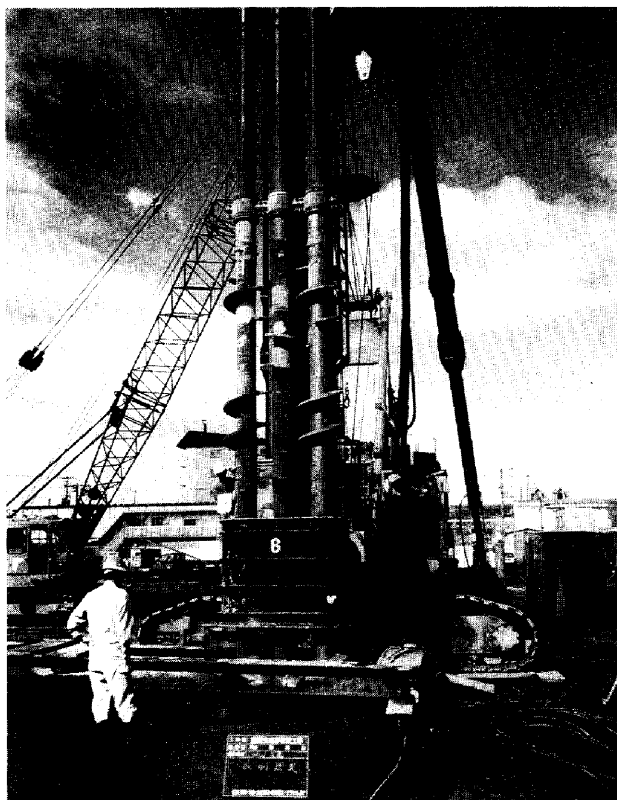


写真-1 SMWの施工状況

表-3 凍結融解試験結果

| 名称 | 凍結融解の サイクル数 | 平均圧縮強度 (kgf/cm ²) | 強度比 (%) | 目視観察 |
|-----|----------------|----------------------------------|------------|-----------|
| D-1 | 0 | 13.2 | 100 | |
| | 1 | — | — | 全供試体にひび割れ |
| C-1 | 0 | 26.1 | 100 | |
| | 1 | — | — | 全供試体にひび割れ |
| C-2 | 0 | 26.1 | 100 | |
| | 1 | 22.2 | 85 | |
| | 2 | 23.5 | 90 | |
| | 3 | 17.5 | 67 | |
| | 6 | 13.5 | 52 | 1本にひび割れ |

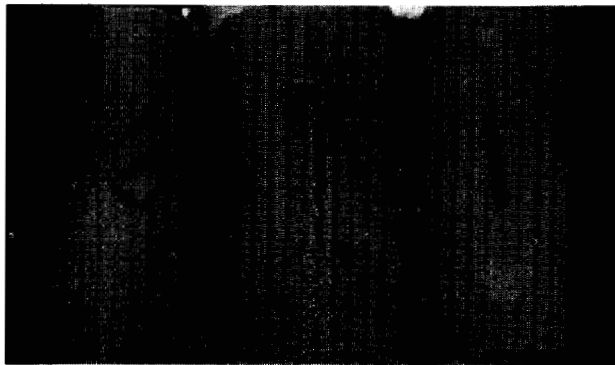


写真-2 ひび割れ状況 (供試体D-1)



写真-3 ひび割れ状況 (供試体C-1)

(2) コア抜きサンプル

凍結融解試験開始前の平均圧縮強度は、26.1kgf/cm² (2.56MPa) であった。この値は、打設時サンプルのほぼ2倍であり、供試体の養生条件の違いによる影響と考えられる。

凍結融解試験の結果、供試体C-1については、1サイクル後に、全ての供試体にひび割れが発生した。ひび割れの発生状況を写真-3に示す。このひび割れによって、供試体は崩壊するだけの凍害劣化に至ったと判断し、一軸圧縮試験は行わなかった。

供試体C-2については、6サイクル後に、3本の供試体中1本にひび割れが発生した。ひび割れが発生していない供試体の圧縮試験結果を見ると、凍結融解サイクルが増加するに従って、平均圧縮強度は減少することが分かる。6サイクル後で13.5kgf/cm² (1.32MPa) であったが、凍結融解試験開始前と比較すると、その強度は50%程度に低下している。

以上のことから、SMWは、耐凍害性能のあまり高くない材料であることが分かった。

§ 4. SMWの壁体内部の温度測定

4-1 SMWの壁体内部の温度分布の数値計算

温度測定に先立ち、数値計算によるSMWの壁体内部の温度分布を検討した。

(1) 計算方法

計算は、以下に示すような一次元不定常熱伝導の数値解法²⁾により行った。

図-1に示すように、壁体を厚さΔx (m) の薄層に分割し、任意の分割線上およびその両端の温度を、各々θ₀ (°C)、θ₁ (°C)、θ₂ (°C) とし、θ₀ (°C) の面の任意の時間Δt (sec) 後の温度をθ₀Δt (°C) とする。

一般に、一次元不定常熱伝導の微分方程式は、下式のように仮定される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \tag{1}$$

ここで、

θ : 温度 (°C)

t : 時間 (h)

x : 距離 (m)

a : 温度伝導率 (m²/h)

である。

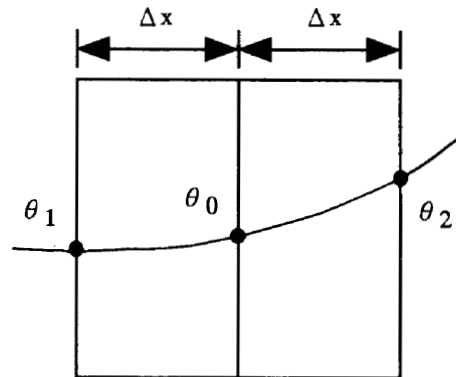


図-1 計算モデル

(1) 式を下式のような階差方程式に置き換える。

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = a \frac{\Delta^2\theta}{(\Delta x)^2} \quad (2)$$

Δt (sec) 後の分割線上の温度 $\theta_{0\Delta t}$ は、(2) 式を用いて、下式のような近似式で表される。

$$\theta_{0\Delta t} = p \left\{ \theta_1 + \theta_2 + \left(\frac{1}{p} - 2 \right) \theta_0 \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$p = a \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4)$$

ただし、

$$p \leq 0.5 \quad (5)$$

である。

計算条件を表-4に示す。なお、計算条件の中の外気温は、室蘭の1月の日最低気温の平均値であり、地盤温度は、室蘭の凍結深度以下の年平均地盤温度である。

(2) 計算結果

表-4 計算条件

| 要因 | 条件 | |
|----------------------------------|------|--------|
| 外気温 (°C) | -4.7 | |
| SMWの壁体温度 (°C) | 8.7 | |
| 地盤温度 (°C) | 8.7 | |
| 熱伝達率 λ (kcal/mh°C) | SMW | 1.30 |
| | 土 | 0.79 |
| 温度伝導率 a (m ² /h) | SMW | 0.003 |
| | 土 | 0.0013 |
| 厚さ (mm) | SMW | 450 |
| | 土 | 5000 |
| Δt (hr.) | 1.0 | |
| Δx (mm) | SMW | 100 |
| | 土 | 500 |

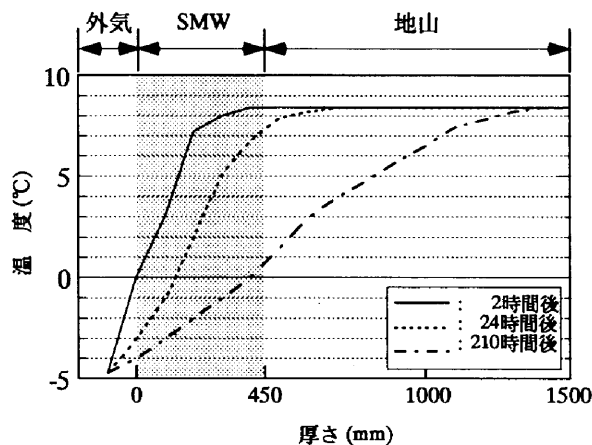


図-2 SMWの壁体内部の温度分布の計算結果

計算結果を図-2に示す。SMW壁体表面に着目すると、掘削によりSMW壁体表面が外気に曝され、SMW壁体表面が0°Cまで冷却されるまでの時間は約2時間である。また、SMW壁体と地山との境界面に着目すると、SMW壁体と地山との境界面が0°Cまで冷却されるまでの時間は約210時間であり、比較的長時間にわたって壁体内部に温度勾配が生じることが分かった。

4-2 施工現場でのSMWの壁体内部の温度の測定

(1) 測定方法

工事および測定日程を表-5に示す。測定は、第二次掘削の終了後、壁体表面を鉄板により覆った後に行った。

測定箇所を図-3および表-6に示す。平面的に見ると、図-3に示すように、SMWの壁体だけの部分と、それと隣り合う壁体内のH型鋼部分の2箇所を1組とし、3組6箇所で測定を行った（以下、各々の組を測定箇所A、B、Cと称する）。高さ方向には、表-6に示すようにGL-0.5m、GL-1.5m、GL-3.5mの3箇所で測定を行った。壁体内部の測定は、上述の測定箇所全てについて、壁体表面から0mm（SMWの壁体表面と外気との境界）、50mm、225mm（SMWの壁体の中央）および450mm（SMWの壁体と地山との境界）の4箇所とした。なお、外気温

表-5 工事および測定日程

| 日付 | 項目 |
|--------------|---------------------------|
| 1995年 10月 8日 | SMW打設開始 |
| 27日 | 〃 打設終了 |
| 11月 18日 | 第一次掘削開始 |
| 30日 | 〃 掘削終了 |
| 12月 4日 | 第二次掘削開始 |
| 8日 | 温度測定開始 (測定箇所の周辺の掘削は終了) |
| 21日 | 第二次掘削終了 |
| 1996年 1月 10日 | 温度測定終了 |

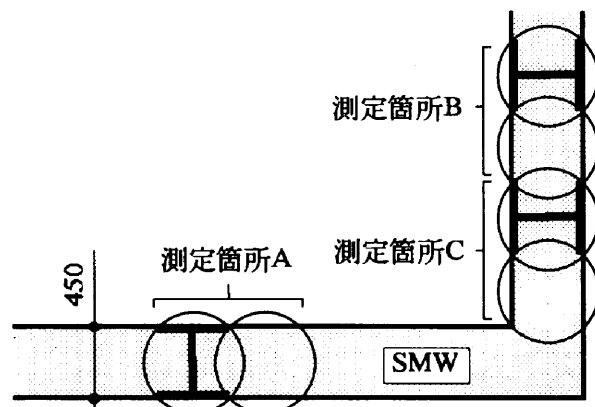


図-3 測定箇所 (部分略図)

表-6 温度測定箇所一覧

| 測定箇所 | 深さ GL- (mm) | 温度計測箇所 | | | |
|------|-------------------|--------|----|--------|----|
| | | SMWのみ | | H鋼+SMW | |
| | | 表面 | 内部 | 表面 | 内部 |
| A | 500 | ○ | ○ | ○ | - |
| | 1500 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 3500 | - | - | - | - |
| B | 500 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 1500 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 3500 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C | 500 | ○ | ○ | - | ○ |
| | 1500 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 3500 | - | - | - | - |

注) ○：測定箇所

は、SMWの壁体上部のGL+1.2m程度の高さで測定した。

(2) 測定結果

以下では、SMWだけの部分についてのみ考察する。各測定点の測定期間中の平均温度の変化を図-4に示す。各図から、地表面からの距離が増すに従って、平均温度が高くなっている。また、外気と接している壁体表面からの距離が増すに従って、平均温度が高くなっている。これらは、地表面や壁体表面からの距離が増すに従って、外気の影響が少なくなり、かつ周辺の熱容量が増加するためと考えられる。

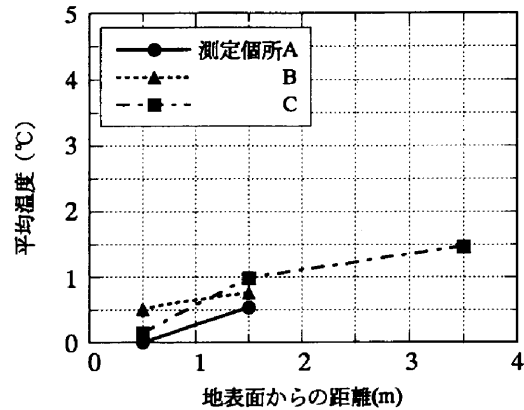
外気温が氷点下のデータだけを抽出し、壁体温度 θ_{IN} と外気温 θ_{OUT} との温度差 $\theta_{IN} - \theta_{OUT}$ の平均値の変化を図-5に示す。各図から、平均温度の場合と同様に、地表面からの距離が増すに従って温度差が高くなっている。また、外気と接している壁体表面からの距離が増すに従

て温度差が高くなっている。外気と直接接している壁体表面からの距離が0mmのところ注目すると、温度差は0℃に近い。これより、外気に直接曝されるSMWの壁体表面付近は、外気温の影響を受け易いことが分かった。

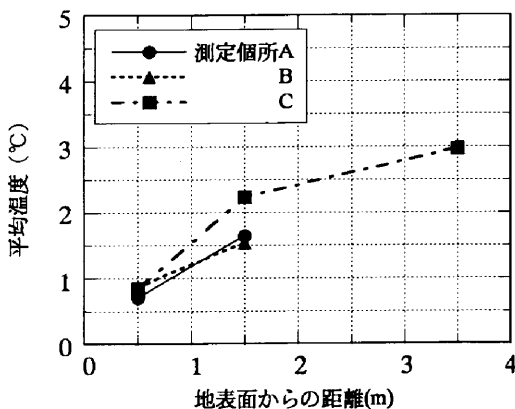
§ 5. まとめ

凍結融解試験結果および現場でのSMWの壁体内部の温度測定結果をまとめると以下のとおりである。

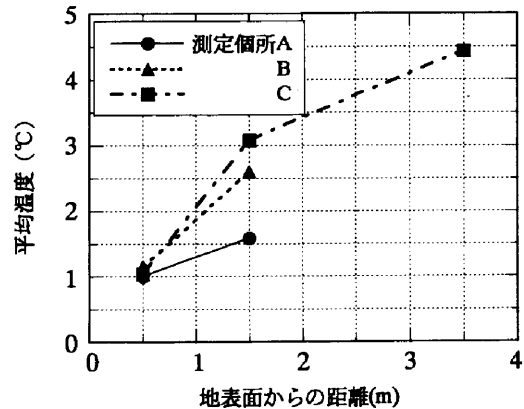
- ①水分の供給を行いながら凍結融解試験を行った供試体は、凍結融解サイクルが1サイクル後に、全ての供試体にひび割れが発生した。
- ②水分の供給を行わずに凍結融解試験を行った供試体は、凍結融解サイクルが6サイクル後に、3本の供試体中1本にひび割れが発生した。また、一軸圧縮試験結果を見ると13.5kgf/cm² (1.32MPa) と、凍結融解試験開始前の約50%に強度が低下した。
- ③現場でのSMWの壁体内部の温度の測定の結果、平均温度、外気との温度差とも、地表面からの距離が増すに従ってその値が高くなった。



(a) 壁体表面からの距離 50mm



(b) 壁体表面からの距離 225mm



(c) 壁体表面からの距離 450mm

図-4 地表面からの距離と平均温度の関係

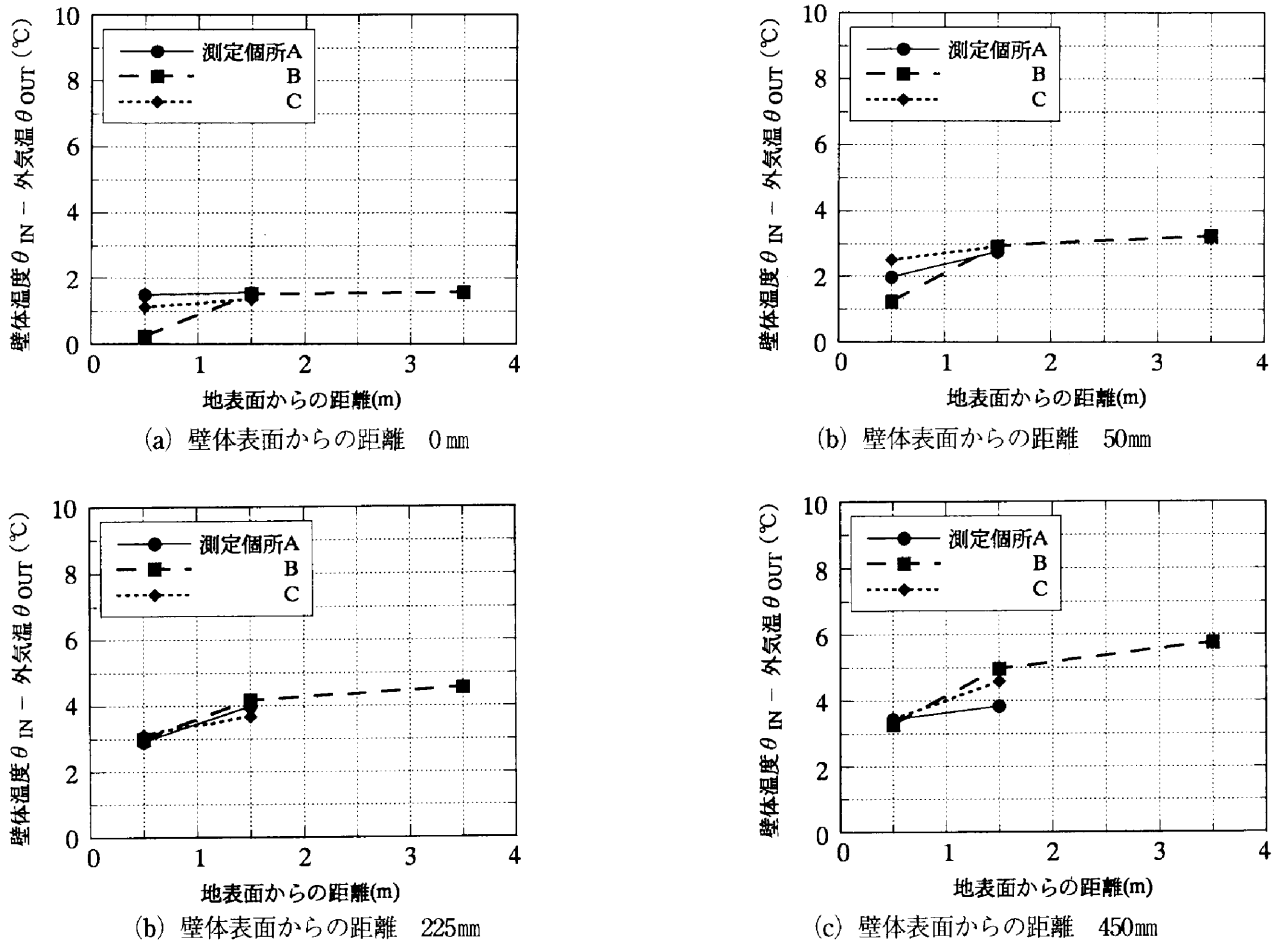


図-5 地表面からの距離と温度差の関係

④外気と接している壁体表面からの距離が増すに従ってその値が高くなった。

今後は、これらの知見を踏まえて、SMWの耐凍害性を向上させることが重要である。このため、材料面からは、セメント系懸濁液の最適調合の検討および新しい混和剤の開発等を行う予定である。また、施工面からは、SMWの壁体表面の養生方法等の検討を行う予定である。

最後に、北海道電力(株)室蘭支店建築サービスセンター所長 福沢清治氏、同担当技官 長谷敏昭氏、北海

道大学教授 鎌田英治氏ならびに同助手 浜幸雄氏には、今回の実験を行うにあたり、御指導、御協力を賜りました。ここに記して、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Annual Book of ASTM Standards, Sec.4, Vol.0402: American Society for Testing and Materials, pp.406-413, 1986.
- 2) 建築学大系 第8巻: 彰国社, pp.313-315, 1969.