

# 論文 高強度地中連続壁の温度ひび割れ制御に関する一考察

戸栗智仁\*1・高木健次\*2・木村克彦\*3

要旨：地中連続壁は、構造物の大型化に伴い大深度化，大壁厚化，高強度化している。山留め壁に用いる場合，耐久性，止水性の観点からひび割れ制御が重要になる。ひび割れ検討は，打込み後のコンクリート温度変化に伴う温度応力をもとに行う。ひび割れ制御対策の主なものに配合面からの対策がある。しかし，地中連続壁のひび割れ制御に関する十分なデータがないのが現状である。本論文は，地中連続壁のひび割れ制御についてひび割れの程度，ひび割れ指数などの関係について検討し，既往の施工実績を踏まえて検討した。

キーワード：地中連続壁，高強度コンクリート，温度ひび割れ，ひび割れ指数，ひび割れ密度

## 1. はじめに

地中連続壁（以下，連壁）は，構造物の大型化，経済性の面から大深度化し，壁厚が大きく，高強度化している<sup>1)</sup>。連壁を止水壁として用いる場合，水和熱によるひび割れ（以下，ひび割れ）を制御し，ひび割れからの漏水を少なくすることが重要となる。また，連壁を高強度化することによって単位セメント量も多くなり，ひび割れ発生の可能性が高くなるので，耐久性，止水性の観点から特にひび割れ制御が重要になる。

ひび割れ制御においては，コンクリート打込み後のセメントの水和熱による温度変化を予測し，次にコンクリートの温度変化に伴って発生する温度応力を求め，これらの結果をもとに検討を行う。ひび割れ制御対策として配合面から低熱ポルトランドセメント，高性能AE減水剤の使用，高強度化による薄壁厚化などが実施されている<sup>2)~4)</sup>。さらに対策が必要な場合には水循環式のひび割れ制御などが検討されている。しかし，連壁のひび割れ制御に関するひび割れの評価方法<sup>5)</sup>，制御に対する基準が必要となるが，十分なデータがないのが現状である。

本論文は，A-LNG地下タンク（以下，A工事）の連壁のひび割れ制御についてひび割れの程度，

ひび割れ指数などの関係について既往の施工実績も踏まえて検討した。

## 2. 検討条件

連壁のひび割れ検討は，ひび割れ測定結果（掘削段階毎に測定したひび割れ長さ）と温度および温度応力解析結果から求めたひび割れ指数をもとに行う。以下におもな検討条件を示す。

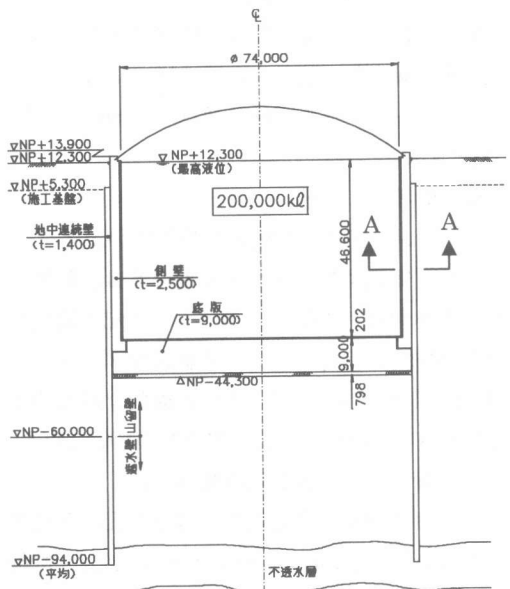


図-1 地下タンクの構造概要

\*1 清水建設（株）土木本部技術第1部（正会員）

\*2 東邦ガス（株）知多緑浜工場建設部（正会員）

\*3 清水建設（株）技術研究所 建設技術開発部 工博（正会員）

## 2.1 施工条件

A工事の構造概要を図-1に示す。連壁は、長さが約100m、壁厚1.4m、幅は先行エレメントが4.5m、後行エレメントが8.24mで、これに用いた山留め壁用コンクリートの配合を表-1に示す。このコンクリートは、設計基準強度が51N/mm<sup>2</sup>の高強度・高流動コンクリートで、ひび割れ低減の面から低熱ポルトランドセメント(C<sub>2</sub>S=56%)、高性能AE減水剤を用いた。なお、高性能AE減水剤には増粘剤を加えて1液とした。ひび割れ分散に関する縦筋の鉄筋比は、約0.2~0.6%である。漏水量に影響する地下水位は、GL-2.0mである。

## 2.2 解析条件

### (1) 解析上の仮定

温度および温度応力（以下、応力）解析上の主な解析条件を以下に示す。

- ・既設エレメント、地盤の初期温度および境界の固定温度は18℃（地盤安定温度）とした。
- ・コンクリート打込み温度は、施工時期を考慮して8, 18, 27℃とする。
- ・既設エレメントは左右対称に存在する。  
連壁の縦方向の温度分布は一樣である。
- ・既設エレメントの弾性係数は37N/mm<sup>2</sup>の一定値とする。
- ・自重は考慮しない。
- ・エレメント間に相対変形は生じない。

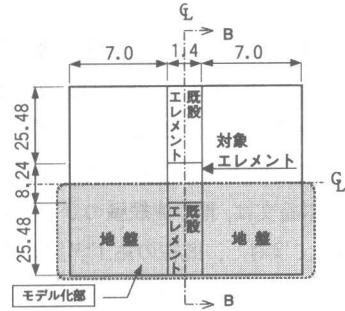
なお、既設エレメントの初期温度は、材齢にもよるが大略約25℃と予想され、上記の設定は温度ひび割れ検討からは、解析対象エレメント（以下、対象エレメント）との相対的な温度降下量を大きく見積もっており安全側の評価となる。

### (2) 解析モデルおよび境界条件

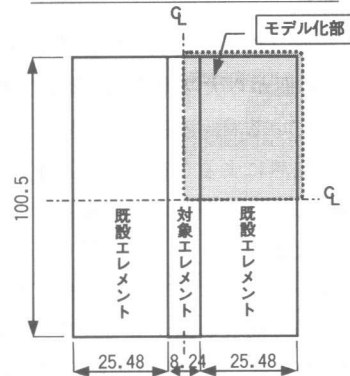
温度および温度応力解析には2次元有限要素法を用い図-2に示す範囲をモデル化した。解析モデルは、文献<sup>6)</sup>から拘束体比（対象エレメントと既設エレメントの幅の比）が約0.3以下の場合、既設エレメントによる拘束がほぼ一定となることから、既設エレメントの幅を対象エレメントの3倍の25.48mとした。温度解析では連

表-1 配合

MaxSize (mm)	スランプロ- (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (%)
					W	C	S	G	
25	60	4.5	35.6	48.7	160	450	819	900	2.1

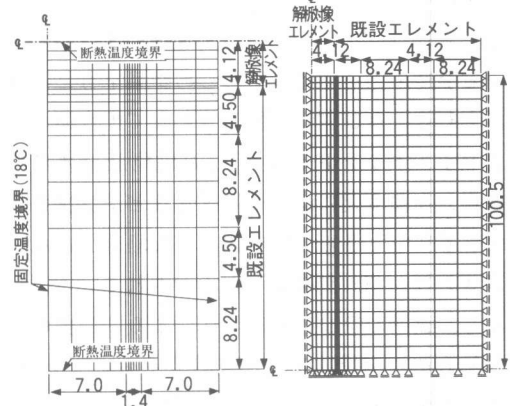


温度解析モデル(A-A断面)



温度応力解析モデル(B-B断面)

図-2 モデル化(単位:m)



温度解析モデル 温度応力解析モデル

図-3 要素分割の例(単位:m)

壁を水平に切った断面をモデル化し、応力解析では連壁を鉛直方向に切った断面をモデル化した。応力解析では、温度解析モデルの壁厚方向の平均温度を求めてこれらを長さ方向に一定値

として与えて温度荷重とした。それぞれの解析に用いた要素分割を図-3に示す。

### (3) 解析に用いる定数

温度および温度応力解析に用いる定数を表-2に示す。断熱温度上昇特性は、3.で述べる先行エレメントのシュミレーション結果から、断熱温度上昇試験結果に比べ $Q_{\infty}$ は1.0倍、 $\gamma$ は約1.5倍の補正を行っている。その他の熱定数は文献<sup>7)</sup>による。また、応力解析に用いる力学定数は、試験により得られたものである<sup>8)</sup>。

コンクリートの温度変化に伴う地盤による連壁の変形拘束は、地盤のせん断バネにより評価し<sup>9)</sup>、施工位置の地盤(堆積軟岩)の層厚さを考慮した加重平均値の $5.4\text{MN/m}^3$ とした。

### 2.3 ひび割れの評価方法

連壁に発生するひび割れは、木村らの提案している方法<sup>5)</sup>、すなわち、ひび割れが発生するかどうかではなく、ひび割れ指数と漏水を伴うなど不具合のあるひび割れの密度との関係を用いて評価する。なお、ひび割れ密度とは発生したひび割れ長さの合計を床付け深さまでの対象エレメント面積で除したものである。ただし、文献<sup>5)</sup>とは応力算定方法が異なる。さらに、連壁のひび割れ測定は、気中の構造物と異なり表面に泥膜が付着しているため測定が難しい。したがって、ここでは測定が容易であり連壁にとって不具合となる、漏水を伴うひび割れを対象にする。ひび割れ指数 $I_{cr}$ は式(1)で与える。なお、 $\sigma_{te}(t)$ は圧縮応力が最大値になってからの引張応力増分であり、コンクリート標準示方書での定義とは異なる。

$$I_{cr} = f_t(t) / \sigma_{te}(t) \quad (1)$$

ここに、

$f_t(t)$ : 材齢 $t$ でのコンクリートの引張強度

ひび割れ指数は、コンクリート打込み後の温度変化に伴う温度応力を対象にして、前述のように圧縮応力が最大値を示してからの増加応力を用いて算定する。なお、掘削の影響(土圧・水圧および掘削に伴う温度変化)による応力は考慮しない。

表-2 解析定数

解析種類	項目	定数			
		8℃	18℃	27℃	
温度	コンクリート	$Q_{\infty}$	46.3	47.2	44.4
		$\gamma$	0.54	0.62	0.90
		熱伝導率 <sup>7)</sup>	2.7 W/m·K		
		熱容量 <sup>7)</sup>	2.67 MJ/m <sup>3</sup> ·hr·K		
	地盤	熱伝導率	1.8 W/m·K		
		熱容量	3.2 MJ/m <sup>3</sup> ·hr·K		
応力	コンクリート	ヤング係数 <sup>8)</sup>	$\frac{10,000 \times t}{12.51 + 2.383t}$ N/mm <sup>2</sup>		
		クリープ係数 <sup>8)</sup>	$\frac{t}{4.035 + 0.941t}$		
		引張強度 <sup>8)</sup>	$\frac{t}{1.685 + 0.1975t}$ N/mm <sup>2</sup>		
		線膨張係数 <sup>7)</sup>	$10 \times 10^{-6}$ °C		
		ポアソン比 <sup>7)</sup>	0.2		

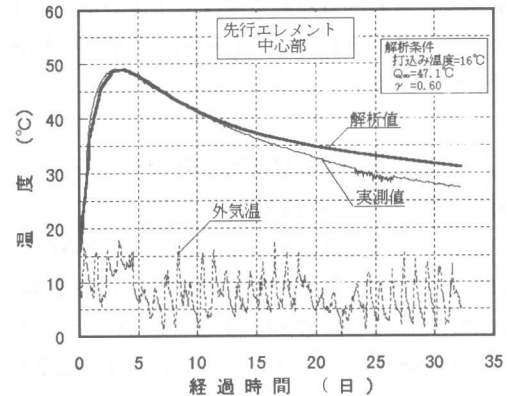


図-4 温度解析結果と実測の比較

### 3. 温度解析および実測結果

実測値とこれに対応する温度解析結果を比較した例を図-4に示す。なお、この結果は先行エレメントのもので、解析期間は30日である。図のように実測と解析結果はよく一致している。とくに、コンクリート打込みから約10日まではよい一致が見られる。それ以降は、実測値に比べて解析値は、温度が高い傾向を示しており、約1ヶ月後で解析値が約4℃高い。この原因は、実施工では先行エレメントの端部に余堀部があり、この部分に滞留している安定液の対流によりコンクリート温度が低下する<sup>10)</sup>が、解析では対流の影響などを考慮していないためと考えられる。

なお、対象エレメントでは既設エレメントに直接接するのでこの問題は生じない。

温度解析は、打込み温度 $T_c$ を8, 18および27℃で、解析期間をコンクリート打込みから掘削終了までの平均期間である250日として行った。応力解析に用いた温度解析結果の一例を図-5に示す。 $T_c$ が18℃の場合、温度の最高値は材齢約3日で約49℃、中心部と表面部の温度差(点1と点2の差)は約9℃である。このように内外の温度差が小さいのは地盤の保温効果によるもので、連壁の一般的な傾向である。また、材齢80日以降のコンクリート温度の解析値は20～25℃であるが、実際のコンクリート温度は連壁の内部掘削が夏季であり、解析結果より高い温度であると考えられる。このことから、実際の連壁では材齢80日以降の温度降下は小さいと考えられ、ひび割れ発生面からみると解析の結果は安全側の評価になっている。

#### 4. 温度応力およびひび割れ解析

##### 4.1 温度応力解析結果

図-5の温度荷重をもとに行った打込み温度18℃の応力解析結果の例を図-6に示す。なお、図示した応力は、最大応力を示すエレメントの中央部の値であり、コンクリートの引張強度も併記した。コンクリート応力は、初期材齢で約2N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力を示しており、温度降下に伴って引張側に移行しており、材齢250日では約2N/mm<sup>2</sup>の引張応力が発生している。圧縮応力最大時の応力を0とすれば、引張応力の最大値は約4N/mm<sup>2</sup>となる。他の打込み温度の場合も同様の結果が得られた。

##### 4.2 ひび割れ指数の算定結果

応力解析結果から算定した打込み温度とひび割れ指数の関係を図-7に示す。図示のように、打込み温度とひび割れ指数の関係は、ほぼ直線で与えられることがわかった。図には既設と同規模のB, C工事の連壁について前述の方法で温度および応力解析して得られた結果を併記した。なお、B, C工事の連壁はそれぞれおもに

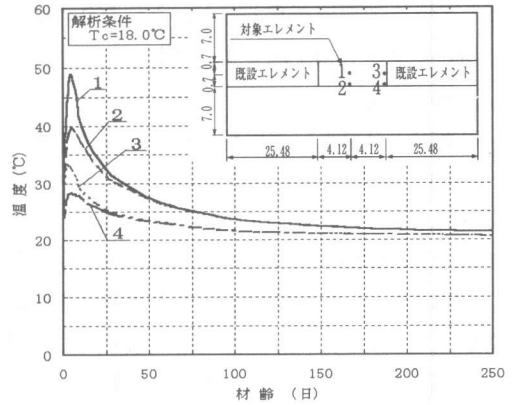


図-5 温度応力解析に用いる温度解析結果

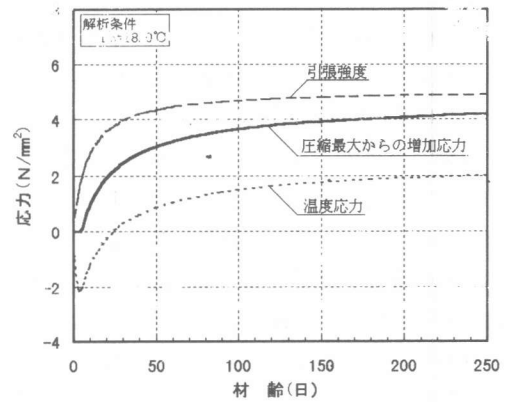


図-6 温度応力解析結果

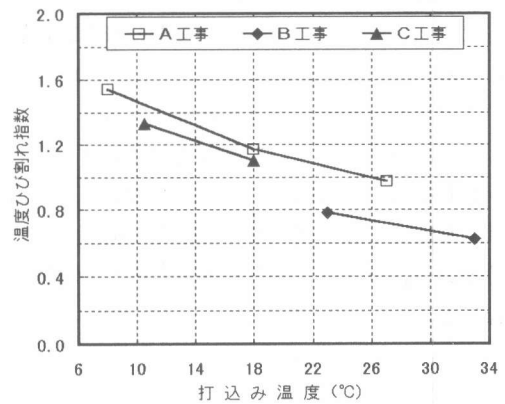


図-7 温度ひび割れ指数と打込み温度の関係

夏期、冬期に施工しており、壁厚は1.5m, 1.2mで、使用セメントは3成分系の高炉B種である。これらの関係を比較すると、施工時期が同じA工事およびC工事では、同じ打込み温度に対してひび割れ指数がほぼ同じ傾向を示している。しかし、夏期に施工したB工事では、同じ打込

表-3 ひび割れ測定結果

ひび割れ指数	ひび割れ長さ(m)	ひび割れ密度(m/m <sup>2</sup> )	既設エレメント幅(m)		拘束体比	
			右	左	右	左
1.16	63	0.161	30.0以上	4.5	0.3以下	1.8
1.09	61	0.155	30.0以上	30.0以上	0.3以下	0.3以下
1.13	39	0.100	4.5	30.0以上	1.8	0.3以下
1.17	38	0.097	30.0以上	30.0以上	0.3以下	0.3以下
1.23	36	0.092	30.0以上	4.5	0.3以下	1.8
1.12	36	0.092	30.0以上	4.5	0.3以下	1.8
1.10	28	0.072	30.0以上	30.0以上	0.3以下	0.3以下
1.12	50	0.128	4.5	30.0以上	1.8	0.3以下
1.24	30	0.077	4.5	30.0以上	1.8	0.3以下

み温度に対してひび割れ指数が幾分小さい傾向がある。これらは、使用したセメント(種類, 銘柄), 壁厚, 施工時期などの影響と考えられる。

### 5. ひび割れ測定結果

A工事のひび割れ長さ測定結果(幅4.5m, 長さ50m当り), ひび割れ密度の計算結果および既設エレメント幅を表-3に示す。なお, ひび割れ長さは, 各掘削段階で測定した漏水を伴うひび割れの測定結果である。A工事の連壁壁面の状態を写真-1に示す。ひび割れ長さから求めたひび割れ密度は, A工事では0.07~0.16m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>である。

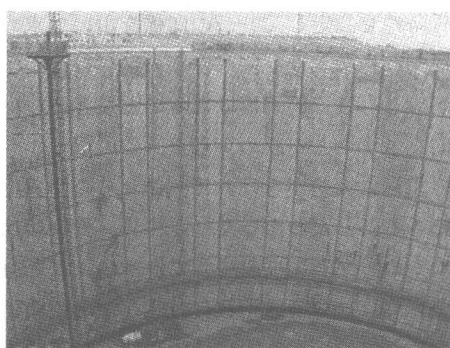


写真-1 地中連続壁面状況

### 6. ひび割れ密度とひび割れ指数の関係

A工事の各エレメントの打込み温度から図-7を用いてひび割れ指数を求め, ひび割れ密度との関係を表-3および図-8に示す。なお, BおよびC工事についても図-7を用いてひび割れ指数を算定し, 左右いずれかの拘束体比が約0.3以下のエレメントの結果を示した。図-8には床付け深さが50mで, 対象エレメントに発生するひび割れ長さが1本当たり8mとした時のひび割れ本数を縦軸に併記した。ひび割れ密度が0.05~0.10m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の場合には, ひび割れ本数が2~5本(幅8m, 長さ50m当り)と少なく, ひび割れをほぼ制御できたと考えられる。このときのひび割れ指数は約1.1~1.3である。

これらの工事で内部を掘削し床付け時でのひび割れ密度とひび割れ指数の関係を全データを

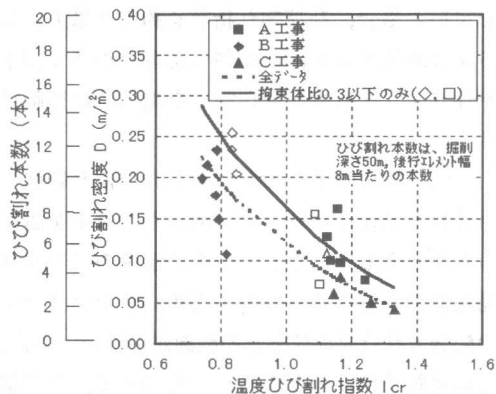


図-8 温度ひび割れ密度とひび割れ指数の関係

対象にした場合, 左右の拘束体比が0.3以下のエレメントを対象にした場合の2ケースについて双曲線回帰を行った。それぞれの回帰結果を式(2)および式(3)に, ひび割れ密度とひび割れ指数の回帰結果を図-8に示す。相関係数rは, それぞれ0.81(n=20)および0.88(n=7)で, ひび割れ密度とひび割れ指数の間には相関が認められる。式(2)と式(3)の回帰結果を

比較すれば式(3)の方が解析条件に近いデータが用いられており、回帰精度もよい。

$$D_T = 0.300 / I_{cr} - 0.182 \quad (2)$$

$$D_{0.3} = 0.365 / I_{cr} - 0.207 \quad (3)$$

ここに、

$D_T$ : GL ± 0 から掘削床付けまでのひび割れ密度 ( $m/m^2$ ) (全データ)

$D_{0.3}$ : GL ± 0 から掘削床付けまでのひび割れ密度 ( $m/m^2$ ) (拘束体比 0.3 以下のデータ)

$I_{cr}$ : 温度ひび割れ指数

本研究では、実施工に比べ比較的単純化した解析条件を設定し、図-7の関係を用いて求めたひび割れ指数とひび割れ密度の関係は、いずれの工事ともほぼ同規模であることなどから同じ傾向を示すことが認められた。このことから連壁の規模に大差がなければ、これらの関係を適用できることがわかった。さらに、拘束体比を幾つかのパターンに設定して温度および応力解析を行い、ひび割れ指数と打込み温度の関係を求めておけば、実施工に近い条件でひび割れを予測でき、その精度も高くなる。また、本方法を用いる場合、ひび割れ指数を約 1.2 以上になるよう制御すれば、ひび割れ密度が小さく漏水を伴うような有害なひび割れを施工時に抑制できる。

一方、施工時期などの面からひび割れ制御の目標値を満足しない場合、何らかの対策を講じる必要がある。しかし、一般に連壁のひび割れ発生原因が外的拘束であるため、コンクリートの配合や材料でひび割れの制御ができない場合、その対策費は高価となる。したがって、ひび割れ発生後の補修も含めた対策を総合的に検討することが合理的であると考られる。

## 7. まとめ

連壁のひび割れについて施工実績をもとにひび割れの程度、ひび割れ指数などの関係について検討した。そして得られた主な結果を以下に示す。

(1) ひび割れ密度が  $0.05 \sim 0.10 m/m^2$  の場合に

は、ひび割れ指数は約 1.1 ~ 1.3 で、ひび割れ本数が 2 ~ 5 本 (幅 8m, 長さ 50m 当り) と少なく、ひび割れをほぼ制御できた。

(2) 比較的単純化した解析条件で求めたひび割れ密度とひび割れ指数の関係をほぼ同規模の連壁に適用でき、さらに、既設エレメント幅を幾つかのパターンに設定して温度、応力解析を行えばより高い精度でひび割れを予測できる。

(3) 本方法を用いる場合にはひび割れ指数を約 1.2 以上になるように制御すれば、ひび割れ密度は小さく、漏水を伴うような有害なひび割れを施工時に抑制できる。

## 参考文献

- 1) 中村修ほか: 高強度連壁による大空間の施工 - 14 万 KL LNG 地下タンク工事 - , 土木学会第 8 回施工体験発表会, pp. 73 ~ 82, 1989. 2, ほか
- 2) 大友健ほか: 高性能連壁のコンクリートの実大規模実証実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1239 ~ 1244, 1994
- 3) 横田和直ほか: 超高強度・高流動コンクリートの連壁への適用 - 硬化コンクリートの性質 -, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集 V, pp. 1156 ~ 1157, 1995. 9
- 4) 三浦律彦ほか: 高ベライトセメントの高強度連壁への適用性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 271 ~ 276, 1994
- 5) 木村克彦ほか: 地下連続壁の温度ひび割れ評価方法に関する研究, 土木学会論文集第 585 号 / V - 38, pp. 19 ~ 29, 1998. 2
- 6) 木村克彦ほか: 二面拘束されたコンクリート構造物の外部拘束に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9-2, pp. 13 ~ 18, 1987
- 7) 土木学会コンクリート標準示方書 (平成 8 年版) 施工編, pp. 185 ~ 186, pp. 190 ~ 191
- 8) 熊野知司ほか: 低発熱形セメントを用いた高強度コンクリートの基本クリープ, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集 V, pp. 586 ~ 587, 1996. 9
- 9) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, IV 下部構造編, 日本道路協会, pp. 200 ~ 203, 1994. 2
- 10) 木村克彦: 地中連続壁の温度ひび割れ制御に関する研究, 名工学位論文, 1993. 3