

# 報告 合成構造沈埋函側壁コンクリートの施工と温度応力について

田中英紀\*<sup>1</sup>、梅山和成\*<sup>2</sup>、渋谷晴夫\*<sup>3</sup>、上野敏生\*<sup>4</sup>

**要旨：**大阪南港トンネルの建設は、鋼とコンクリートの合成構造による沈理工法が採用されている。この沈埋函の側壁は、1m以上の部材厚を有するマスコンクリート構造であるので、セメントの水和に起因する温度応力によるひび割れを検討する必要がある。本報告は、この温度応力と直射日光による鋼殻の熱膨張の影響を考慮した事前検討とこれを反映した施工と計測結果について記述したものである。さらに、この計測結果を温度応力解析に適用し、比較検討を行った。その結果、合成構造マスコンクリートに関する温度応力の評価と日射への対策工の効果を得た。

**キーワード：**大阪南港トンネル、合成構造、ひび割れ、鋼殻の熱膨張、温度応力

## 1. はじめに

大阪南港トンネルは、都心に近い港区と南港地区を直結する交通路として施工される海底トンネルで、わが国では初めての道路・鉄道併用の沈理工法によるトンネルである。本トンネルは、延長1.025mで10函の合成構造沈埋函で構成されている。このうち、8函については、既に設置されており、ここでは、最終の2函を対象としている。

沈埋函は、側壁と下床版をオープンサンドイッチ構造とし、鋼殻に取付けたシアコネクタ等でコンクリートと一体化させる合成構造である。構成部材のうち、側壁コンクリートは、先に打設された下床版コンクリートによって拘束を受けるので、温度応力によるひび割れ発生が問題となっており、低発熱型セメントの使用等の温度応力低減対策を行っている。

本報告では、側壁コンクリートのひび割れを低減するために行った温度応力や鋼殻の熱膨張を考慮した事前検討、これを反映した施工と計測計画および得られた計測結果を用いた温度応力解析例について以下に述べる。

## 2. 事前検討

側壁コンクリートに発生するひび割れの主要原因として、温度応力と鋼殻の熱膨張による影響に着目して、以下のように事前検討を行った。

### 2. 1 沈埋函の形状およびブロック分割

今回検討した沈埋函の横断面図および縦断面図を図-1に示す。沈埋函1函の長さは、約102mで、施工上、全長を6ブロック（標準的1ブロックは、約17m）に分割し、鉛直方向は、下床版、側壁・隔壁、上床版の3リフトに分割した。下床版と側壁の打設工程を表-1に示す。

### 2. 2 ひび割れ抑制対策

- 
- \* 1 五洋建設（株）技術本部第一技術部（正会員）
  - \* 2 運輸省第三港湾建設局大阪港湾空港工事事務所所長
  - \* 3 運輸省第三港湾建設局大阪港湾空港工事事務所次長
  - \* 4 運輸省第三港湾建設局大阪港湾空港工事事務所建設専門官

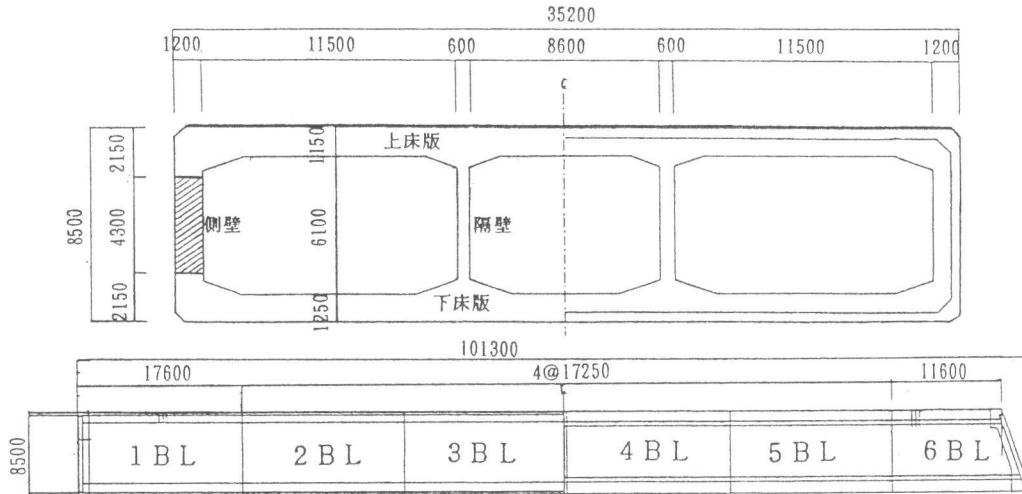


図-1 横断面および縦断面図(単位m)

(1) 配合および使用材料

側壁コンクリートの配合および使用材料を表-2に示す。セメントは、発熱温度を低減するため、超低発熱型高炉B種を使用している。コンクリートの設計基準強度は30MPaで、その発現材齢は91日である。

(2) 温度応力解析

図-1に示す斜線部を検討断面として、CP法で温度応力解析を行った。本解析では、外気温度や打設温度が最も高くなる6ブロックの側壁を対象とし、側壁打設時には下床版は硬化した吸熱体と仮定し、初期温度を打設予定日の外気温度の13.5℃とした。外気温については6ブロックを打設する11月の日平均気温から推定した。

(3) 鋼殻の熱膨張による影響

側壁コンクリートのひび割れは、温度応力の他に直射日光による外側の鋼殻の熱膨張の影響が考えられる。この影響を有限要素法で推定した。本解析では、鋼殻がコンクリートに対して、 $\Delta t = 23^\circ\text{C}$ だけ定常的に上昇した場合を仮定した。この温度差は、夏期施工におけるコンクリートと鋼製型枠の温度計測結果例を参考にして設定した。

表-1 打設工程

	67°ロック	57°ロック	47°ロック	37°ロック	27°ロック	17°ロック
下床版	H6.10.15	H6.10.27	H6.11.9	H6.11.21	H6.12.3	H6.12.15
側壁	H6.11.15	H6.11.29	H6.12.13	H6.12.25	H7.1.11	H7.1.25

表-2 コンクリートの配合および材料

セメント	超低発熱型高炉B種									
細骨材	香川県室木海砂70%、兵庫県西島砕砂30%									
粗骨材	兵庫県西島産碎石									
石粉	石灰石粉									
混和剤	高性能AE減水剤(ナフタリン系)									
最大寸法(mm)	スラップ(cm)	空気(%)	W/C(%)	S/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					C	W	S	G	石粉	混和剤
20	18	4	55	41	284	156	755	1065	30	4.83

表-3 材料特性値

鋼殻	ポアソン比 $\nu$	0.3
	弾性係数 $E_s$ (MPa)	$2.1 \times 10^5$
	せん断弾性係数 $G_s$ (MPa)	$8.1 \times 10^4$
	板厚 $t$ (mm)	9.0
コンクリート	ポアソン比 $\nu$	0.17
	弾性係数 $E_c$ (MPa) <sup>1)</sup>	$2.2 \times 10^4$
	せん断弾性係数 $G_c$ (MPa)	$9.4 \times 10^4$

1) 材齢7日の圧縮強度から推定した値

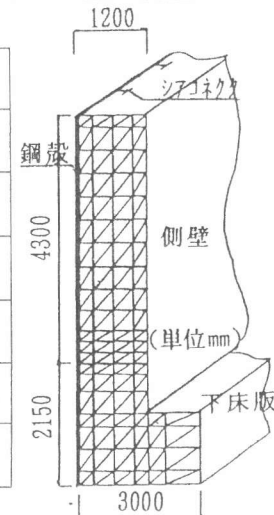
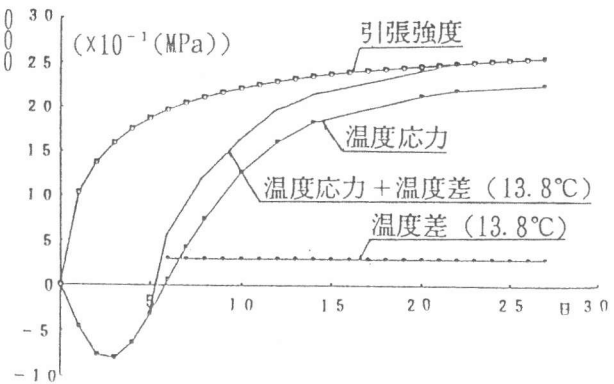
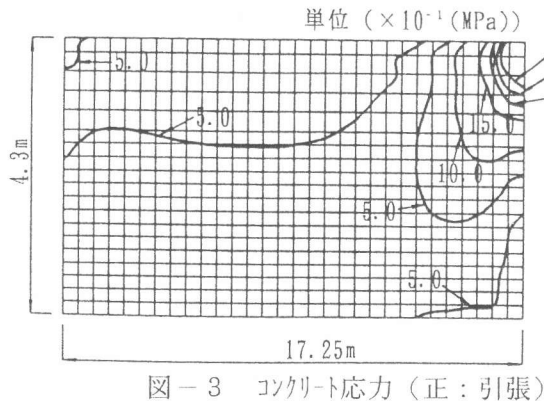


図-2 解析モデル

解析領域は、側壁コンクリートを3ブロックまで打設した施工状態とし、鋼殻の熱膨張が全ブロック長の中心から対称になると仮定して、1/2モデル（鋼殻を1から3ブロック、側壁コンクリートを3ブロック）とした。鋼殻およびシアコネクタはシェル要素、側壁コンクリートはソリッド要素でモデル化し、拘束条件は、鋼殻端部と側壁下部に設定した。表-3に材料物性値、図-3に3ブロックのコンクリート応力を示す。



#### (4) 事前検討のまとめ

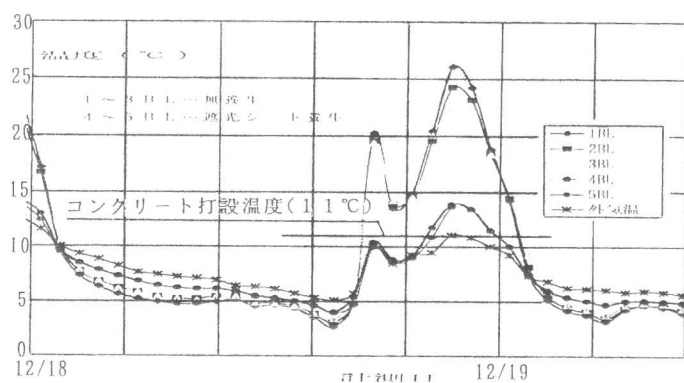
温度応力の結果と鋼殻の熱膨張を考慮した結果を図-4に示す。鋼殻の熱膨張による応力は、図-3より、拘束条件周辺に局所的な値を示しているが、23°Cの温度差に対し、均一に0.5MPaの引張応力が発生していると仮定した。鋼殻の熱膨張による影響は、3ブロックについて検討しているが、拘束条件を考慮すれば、6ブロックにも適用できると推定し、この結果を用いて温度応力との重ね合わせを行った。鋼殻の熱膨張については、温度差と発生応力との比例関係から、引張強度と発生温度応力との差が最小となる材齢22日において、重ね合わせた応力のひび割れ指数が、1.0以上になるように温度差を設定した。

事前検討の結果より、側壁コンクリートのひび割れ発生を抑制するための項目を以下に示す。

- ・コンクリートの打設温度を13.5°C以下にする。
- ・鋼殻の熱膨張による応力と温度応力を重ね合わせた応力が、材齢22日以降でひび割れ指数が1.0以下とならないように、鋼殻のコンクリートに対する温度上昇量を13.8°C以下にする。

### 3. 施工

施工では、事前検討で得られた結果を考慮して、鋼殻の熱膨張については、直射日光の影響が予想される鋼殻の遮光シート養生を計画した。図-5は、コンクリート打設前の鋼殻に関して、遮光シート養生を4と5ブロックだけに実施した場合の温度分布を示す。この結果より、遮光シートによって、最大約13°Cの温度低減を図れることがわかったので、直射日光による影響が考えられる鋼殻全体を遮光シートで養生した。



### 3. 1 計測計画

遮光シートによる鋼殻の温度上昇抑制効果、シアコネクタの有無による影響、下床版からの拘束度等を確認するために6ブロックについて計測を行った。計測箇所および計測機器例を図-6に示す。図中のA-1およびA-2断面側については、直射日光の影響が想定されるので、全面に遮光シート養生したが、A-3断面側については、日陰部になることを考慮して、遮光シート養生は対象外とした。

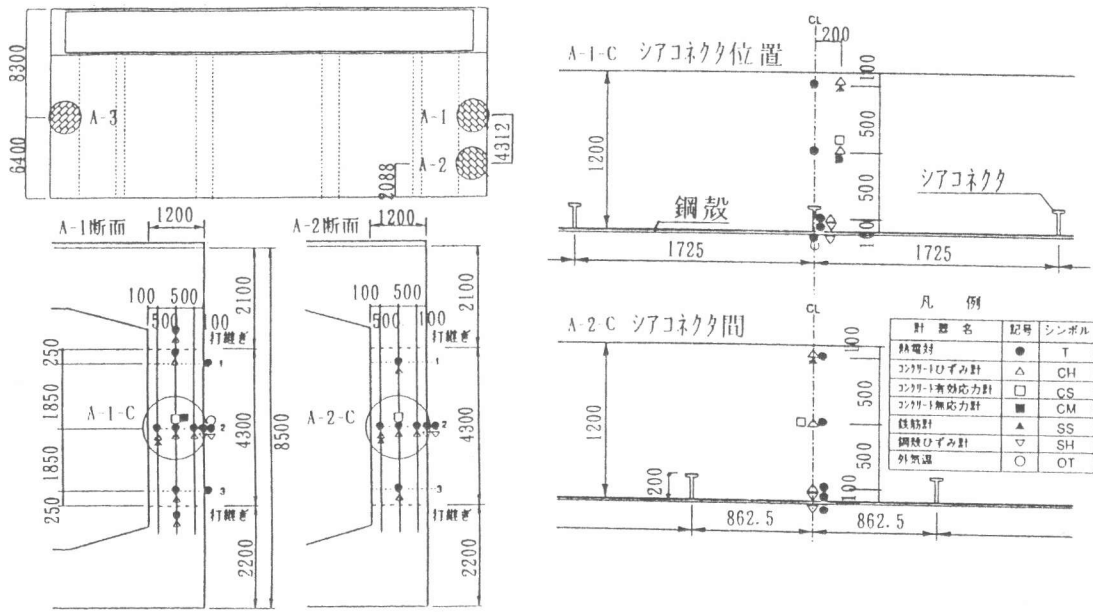


図-6 計測機器配置図(6ブロック) 単位(mm)

### 3. 2 計測結果

A-1断面のコンクリート温度分布例を図-7に、有効応力計によるコンクリート応力分布例を図-8に示す。計測結果より、以下のことが得られた。

- ・側壁中心部の温度は、材齢3日で約23℃の最大値を示した。
- ・各断面中心のコンクリート応力は、いずれも材齢18日で最大値を示し、その値は、A-1断面で0.74MPa、A-2で0.55MPa、A-3断面で0.9MPa程度となっており、遮光シート養生をしていない日陰部のA-3断面が最も大きかった。
- ・同材齢時のA-1断面の応力は、シア

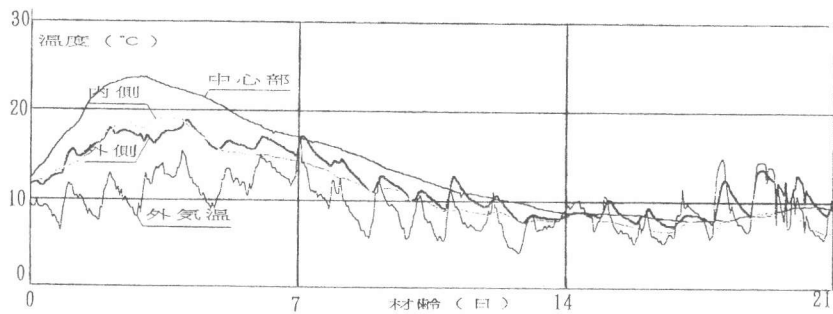


図-7 コンクリート温度分布

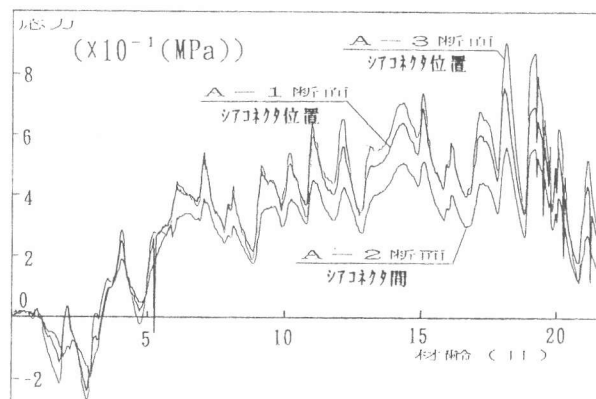


図-8 有効応力の計測結果

コネクタの影響で、A-2断面の応力より35%程度大きくなっている。

また、遮光シート養生の有無による側壁コンクリートのひび割れ状況を図-9および図-10に示す。図中のひび割れについては、その発生時期と最大ひび割れ幅を記述している。

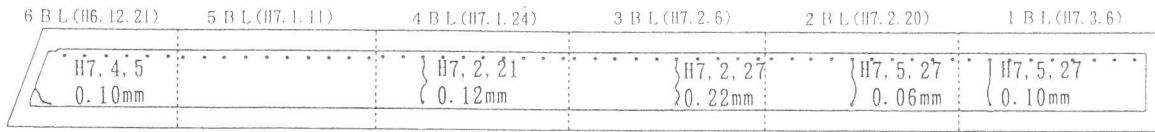


図-9 ひび割れ発生図（遮光シート有：上カッコ内は打設日）

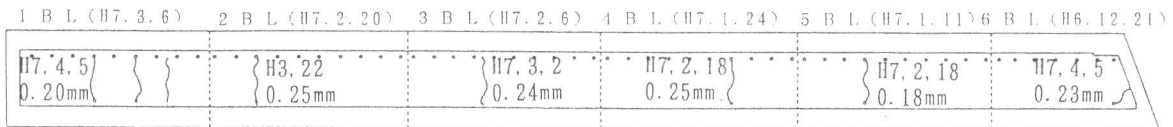


図-10 ひび割れ発生図（遮光シート無：上カッコ内は打設日）

#### 4. 計測結果に基づく検討

ここでは、各計測結果は、遮光シート養生や日陰により、鋼殻の熱膨張の影響がなく、コンクリートの水和熱による温度応力を示していると仮定し、コンクリートの熱膨張係数、有効弾性係数等を計測結果から算定し、これらを用いてCP法による温度応力解析を行った。

##### 4.1 計測結果による条件の算定

A-1断面中心部の無応力計より、コンクリートの熱膨張係数を算定した（図-11参照）。側壁コンクリートが下床版から受ける拘束度は算定した熱膨張係数と側壁下部に設置したひずみ計で得られた値より次式で算定した〔1〕。

$$R_N = (\alpha - \beta) / \alpha \quad (1)$$

$R_N$  : 拘束係数 (0.336)

$\alpha$  : 熱膨張係数 (0.0000883/°C)

$\beta$  : ひずみ変化率 (0.00000586/°C)

計測した有効ひずみと有効応力との関係の一例を図-12に示す。図中の曲線群を材齢に応じて6グループに分けて、有効弾性係数を表-4のように算定した〔2〕。

##### 4.2 温度応力解析例

次に、この有効弾性係数を用いて、CP法で温度応力解析を行った。計測結果より算定した解析条件を表-4に、有効応力と解析例を図-13に示す。外気温度については、計測値を用いた。

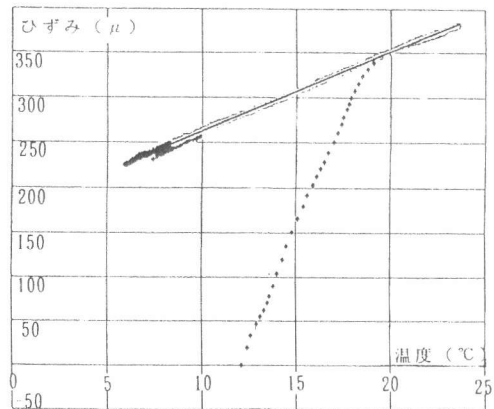


図-11 熱膨張係数の算定図

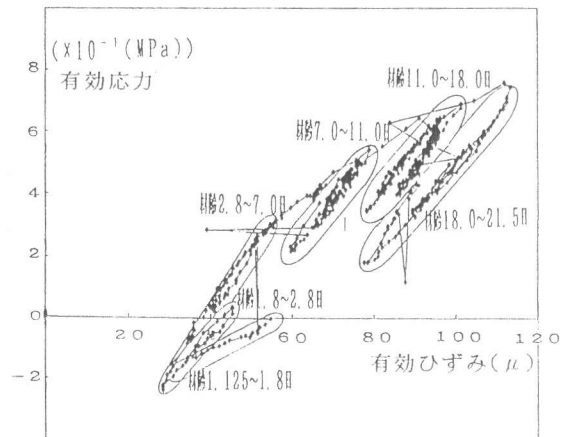
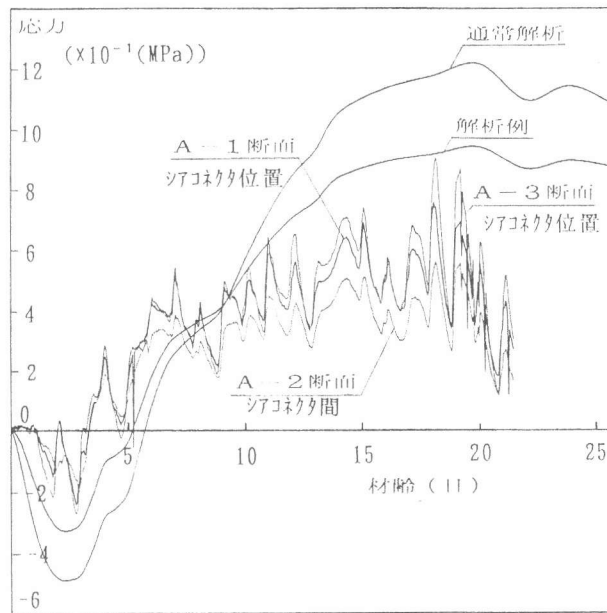


図-12 有効弾性係数

表一 4 解析条件 (事前検討、計測結果)

材料特性	事前検討	計測結果
単位体積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	284	284
打設温度 (°C)	16.5	11.0
断熱温度上昇式 (°C) T = K (1 - e <sup>-αt</sup> )	K α 29.93 0.50	29.51 0.56
比熱 (kJ/(kg·°C))	1.05	1.05
熱伝導率 (W/(m·°C))	2.56	2.56
単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	2300.0	2300.0
表面熱伝達率 (W/(m <sup>2</sup> ·°C))	外側 内側 14.0 9.3	14.0 9.3
圧縮強度 (材齢91日)(MPa)	39.0	34.0
弾性係数 (×10 <sup>-1</sup> MPa)	参考文献 [3]	材齢3日まで 5000t 材齢3日以降 15000
熱膨張係数 (1/°C)	1.1 × 10 <sup>-6</sup>	8.8 × 10 <sup>-6</sup>
拘束係数	R <sub>n</sub> R <sub>m1</sub> R <sub>m2</sub> 0.6 1.0 1.0	0.336 1.0 1.0

弾性係数における t は材齢 (日) を示す。



図一 1 3 有効応力と解析例 (各断面の中心)

## 5. まとめ

合成構造沈埋函側壁コンクリートのひび割れを抑制するために行った事前検討、これを反映した施工、計測結果および温度応力解析例を整理すると以下ようになる。

① 12月中旬の施工時でも、遮光シート養生の有無で最大13°C程度鋼殻の温度上昇を抑えることができた。

② 側壁コンクリートの有効応力は、事前検討したものより小さく、実測に基づいた結果では、ひび割れ指数は2以上であった。

③ 材齢18日でのシアコネクタ位置での応力は、シアコネクタ間の応力より35%程度大きな値を示した。これは、シアコネクタによる側壁コンクリートの断面欠損による影響であると推定される。本合成構造では、シアコネクタによって約17%側壁コンクリートの断面が小さくなっており、シアコネクタ位置での応力増分率は、この断面欠損率の2倍程度となっている。

今回の施工は、コンクリートの温度応力に関して、比較的有利な初冬に実施された。今後は、暑中施工における遮光シートの効果、温度応力等と本報告を比較するとともに、ブロック間の打継ぎによる影響等についても検討して行きたい。

最後に、本報告を作成するに当たって、御助言を頂いた関係者の皆様に深謝いたします。

### 〈参考文献〉

- [1] 横田季彦・三橋郁雄・小泉哲也・信田佳延：沈埋函コンクリートの側壁における拘束度に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，pp. 1207～1210, Vol. 15, No. 1, 1993
- [2] 田辺忠顕・原口 晃・石川雅美：マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの外部拘束効果，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp. 83～90, 1982
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年度版】・施工編，1991