

岸壁上部エコンクリートにおける分割打設と 膨張材による温度ひび割れ抑制対策の適用

THE APPLICATION OF THE CONTROL MEASURES FOR A THERMAL CRACK
BY SEPARATE PLACING AND AN EXPANSIVE ADMIXTURE TO THE COPING
CONCRETE OF THE QUAY WALL

山村浩介¹・尾上博文²・本庄隆宣³・水谷征治⁴・平井義人¹・中川将秀⁵
Kousuke YAMAMURA, Hirofumi ONOUE, Takanobu HONSYO, Seiji MIZUTANI,
Yoshihito HIRAI and Masahide NAKAGAWA

¹東洋建設株式会社 大阪本店 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4-1-1)

²国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾事務所 (〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

³正会員 東洋建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒135-0064 東京都江東区青海2-43)

⁴正会員 東洋建設株式会社 技術本部美浦研究所 (〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領1033-1)

⁵正会員 東洋建設株式会社 大阪本店 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4-1-1)

In construction of the coping concrete of a quay wall, addition of an expansive admixture and separate placing (Heat Time Lag method) of concrete were applied as the control measures against a thermal crack. In separate placing, the steel pipe with a rib was installed in the inside of a structure, and in order to make the heat of hydration of the concrete placed outside radiate heat efficiently, water was poured inside the steel pipe. As a result, although the crack occurred in the non-coped with block and the block of only expansive admixture addition, the crack has been prevented in the block which implemented the above-mentioned measure.

Moreover, the effect of each measure could be checked also from the temperature measurement result and distortion measurement result inside a structure, and it has checked that this measure had been effective.

Key Words : Coping concrete, Expansive admixture, Separate placing, Thermal crack

1. はじめに

神戸港は、スーパー中核港湾の指定を受け、ポートアイランド(第2期)地区において、次世代高規格ターミナルとして、PC-18 岸壁(-16m)の整備が進められている。PC-18 岸壁は、超大型コンテナ船への対応や 24 時間フルオープン化が計画され、また大規模地震時に輸送機能を確保するため耐震強化岸壁として位置づけられている。

本工事の上部エコンクリートは超大型コンテナ船の接岸設備を配備するとともにガントリークレーンの基礎を兼ねるため、大型鉄筋コンクリート構造となり、温度ひび割れの発生が懸念された。特に海洋コンクリート構造物においては、このようなひび割れが早期の塩害劣化要因となるため、施工時のひび割れ抑制が非常に重要な課題であった。

そこで、本工事において、近年温度ひび割れ抑制に多くの実績がある膨張材に加え、新たに温度ひび割れ対策として開発した HTL (Heat Time Lag) 工法を採用した。HTL 工法は、一般に冷却水を内部に通水し、内部の蓄熱を強制的に放熱させるパイプ

クーリングなどと異なり、図-1 に示すように内部に中空材を設置し、中空材内外部のコンクリートを分割して施工することによって内部の蓄熱を低減し、温度ひび割れを抑制するものである。また、付加効果として中空材内部を強制的にクーリングすることで、内部から効率よく放熱させることもできる。中空材には鋼製のリブ付きスパイラル管を使用し、パイプクーリングに用いる管に比べて径が大きく、設置間隔が広いという特徴をもつ。

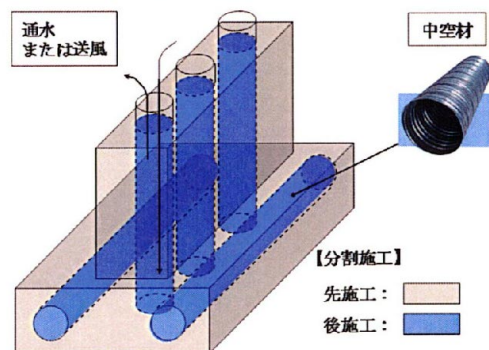


図-1 HTL 工法概念図

本論文では、本工事で実施した温度ひび割れ抑制対策方法を示し、本構造物における対策の有効性について評価した。

2. 施工概要

(1) 構造物の概要

本工事の上部工コンクリートは、既設ケーソン上部にケーソン1函あたり1ブロックとなるように計画されていた。1ブロックの形状・寸法は、幅4.4～4.9m、高さ2.3m、長さ15～16mであり、全30ブロックの施工を行った。コンクリートの設計仕様は24-12-20BBで、表-1に示す配合とした。配合Aは温度ひび割れ対策として膨張材を添加した配合で29ブロックに適用し、配合Bは効果比較のため1ブロックのみに適用した。なお、膨張材は石灰系低添加型膨張材（水和熱抑制タイプ）を使用した。

(2) 温度ひび割れ抑制対策の検討

当該構造物は、前述の通りマッシブな形状であり、ケーソンの隔壁および蓋コンクリート上部に直接打設するため、温度ひび割れの発生が懸念された。

そこで、施工前に3次元有限要素法による温度応力解析を実施して、温度ひび割れ抑制対策の検討を行った。解析に用いた諸元を表-2に示す。

解析の結果を表-3に示す。標準的な施工を実施した場合、長期材齢においてひび割れ指数が1.0を下回った。また、長期材齢に発生する温度ひび割れ（外部拘束ひび割れ）に対して有効であるとされ、その使用実績も多い膨張材の添加によっても、ひび割れ指数は1.22となり、高い確率で温度ひび割れが発生することが懸念された。

このため、膨張材の添加に加えてHTL工法の採用を検討した。HTL工法で用いる中空材の形状・配置は、鉄筋の最小間隔以下の径でひび割れ指数が1.45以上確保できるように、φ150のスパイラルダクトを1.5m以下で配置した。また、中空材の内部は放熱効率が良い通水によるクーリングとした。

(3) 施工方法

ケーソン上面を清掃後、鉄筋架台の設置、鉄筋の組立に合わせて中空材を配置し、鉄筋架台に鋼線により固定した。中空材は、鋼製のリブ付きスパイラル管を使用し、コンクリートとの接着性が十分確保でき、構造的に悪影響を与えないよう配慮した。その設置間隔は、配筋間隔や埋込み金物などの障害とならないよう配慮し、図-2および写真-1に示す通り標準ピッチを1.4mとした。また、後打ち部の充てん性を確保するために、注入口側が上方となるよう傾斜させた。

先打ちコンクリートの打設は、3層に分けて1日の打設で行い、特に中空材周囲は入念に締固めを行った。コンクリート打設の翌日にコンクリート上

表-1 コンクリートの配合

名称	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	EXP	S	G	Ad
配合A	54.0	49.3	174	302	20	878	896	3.22
配合B	54.0	49.3	174	322	0	878	896	3.22

※)W/B：水結合材比，EXP：膨張材，Ad：AE減水剤

表-2 温度応力解析の諸元

項 目		配合A	配合B
コンクリートの熱特性	熱伝導率	2.7[W/m ² °C]	
	密度	2400[kg/m ³]	
	比熱	1.15[kJ/kg°°C]	
断熱温度上昇特性	Q _∞	54.31[°°C]	
	γ	0.6121	
線膨張係数		7 [μ/°°C]	10 [μ/°°C]
圧縮強度推定式	f' _c (28)	24[N/mm ²]	
	a	6.2	
	b	0.93	
	d	1.15	
ヤング係数の補正係数	φ(0-3日)	0.73	
	φ(5日-)	1	
熱伝達係数	外気	14[W/m ² °°C]	
	型枠(鋼製)	14[W/m ² °°C]	
	養生マット	5[W/m ² °°C]	
	中空材(通水中)	64[W/m ² °°C]	—
	中空材(通水無)	0[W/m ² °°C]	—
クーリング水温(一定)		15[°°C]	—

表-3 温度応力解析結果

項目	無対策	膨張材のみ	膨張材+HTL
最小ひび割れ指数	0.91	1.22	1.67
発生時期	90日	90日	90日

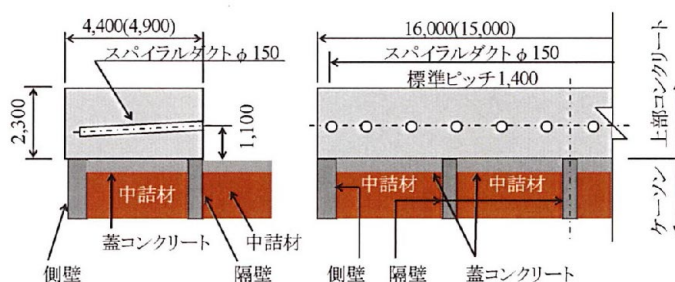


図-2 中空材配置図

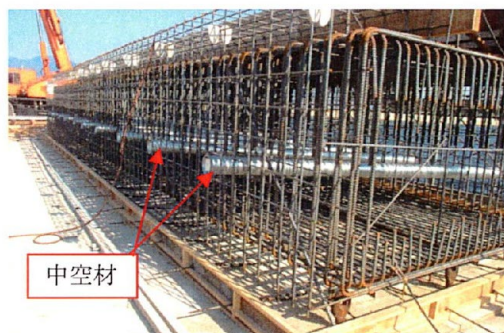


写真-1 中空材設置状況

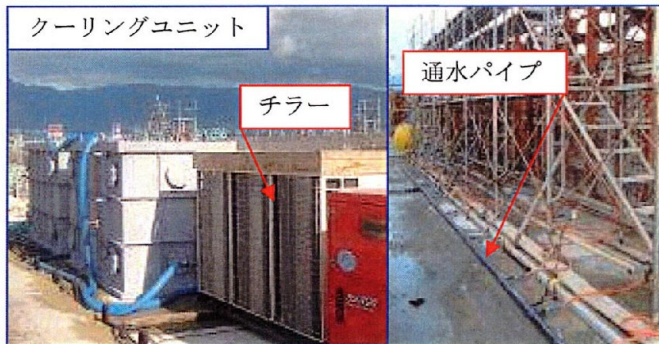


写真-2 クーリング状況

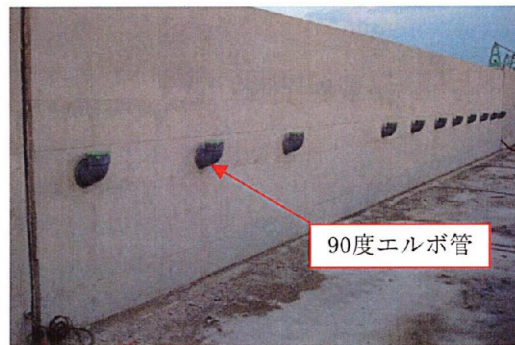


写真-3 中空材内部の充てん状況

面は養生マットを敷設し、散水による湿潤養生を所要期間実施した。また、中空材内部は、打設翌朝から温度応力解析で有効と判断された材齢3日まで通水を実施した。なお、通水温度は写真-2に示すクーリングユニットにより、常時10℃～15℃に保持し、通水流量はこれまでの知見および実績¹⁾から効果を確認している10ml/sec以上を確保した。

中空材内部の打設は、今回中空材が小口径であったことや配置が水平に近いことから、充てん性を確保するために、写真-3に示すように塩ビ管の90度エルボ管を設置し、設計基準強度以上の強度を有するセメント系無収縮グラウト材により充てんした。なお、充てん時期は先打ちコンクリートの温度が十分降下した時期に実施した。

(4) 計測方法

本工事では、対策工法の効果を定量的に評価する目的で、ひび割れの影響が小さい岸壁端部に“無対策ブロック”および“膨張材のみの対策としたブロック”を各1ブロック設けた。HTL工法と膨張材添加の併用対策の1ブロックと合わせ、3ブロックで温度およびひずみの計測を行った。

温度の計測は熱電対、自由ひずみの計測は無応力計、実ひずみの計測は埋込み型ひずみ計により行った。各計測器の設置位置を図-3に示す。なお、実ひずみの計測点は、事前の温度応力解析で最もひび割れ指数が小さくなった点とした。

計測期間は、打設開始時から工事竣工までの約1.5ヶ月とした。なお、各ひずみの零点は、各ブロック打設時に実施した凝結時間試験の結果における終結時とした。

3. 対策工法の効果の検証

(1) クーリング効率の検証

事前の温度応力解析では、中空材内部の通水による放熱効率の向上効果に対して、熱伝達率を大きくする(64W/m²℃)ことで評価した。

そこで、実施工において事前解析で想定した放熱効果が確保できていたことを確認した。図-3のa部に示す熱電対で計測した結果から見かけの伝達率

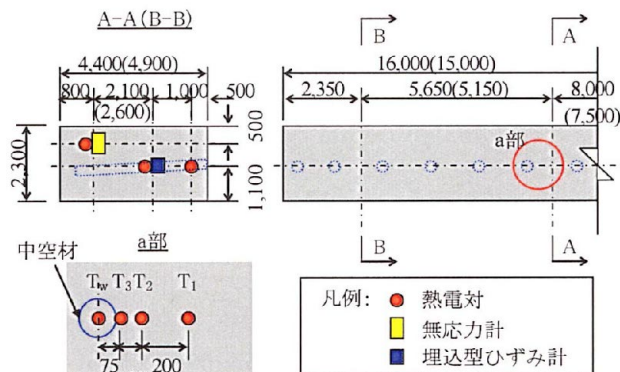


図-3 計測器配置図

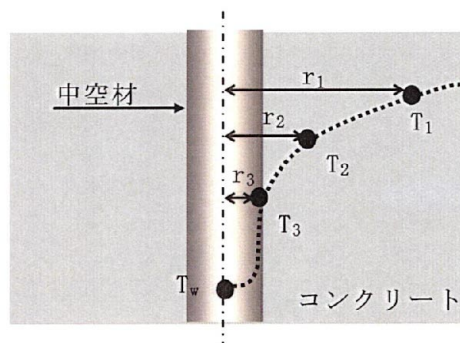


図-4 温度分布モデル

を推定した。推定手法は笹倉ら²⁾の手法を参考とし、図-4に各部の温度等を式(1)および式(2)に代入し、熱の収支から見かけの熱伝達率を求めた。

推定式から求めた見かけの熱伝達率の経時変化を図-5に示すが、通水期間中の見かけの熱伝達率は150W/m²℃以上を確保しており、非常に放熱効率が高かったことが確認された。この結果は、本工事で使用した水循環用のポンプ能力が高く、10ml/secよりも流速が速かったことに起因すると考えられる。

$$q = \lambda \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (1)$$

$$q = \eta(T_3 - T_w)2\pi r_3 \quad (2)$$

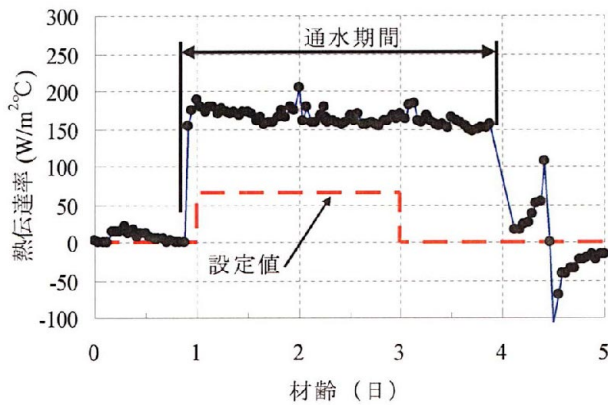


図-5 見かけの熱伝達率の経時変化

ここで、

q : 熱流束 $[W/m]$
 λ : 熱伝導率 $[W/m^{\circ}C]$
 η : 熱伝達率 $[W/m^2^{\circ}C]$

(2) 対策工法の温度に与える影響

膨張材と HTL 工法を併用したブロック (CASE①)、膨張材のみの対策としたブロック (CASE②)、無対策ブロック (CASE③) で計測した上部工コンクリート内部と側面で計測した温度の経時変化を図-6 に示す。なお、CASE①の計測結果は隣り合う中空材の中央で計測したものとした。

上部工コンクリート内部の最高温度を比較すると、CASE②と CASE③はほぼ同程度であり、水和熱抑制タイプの膨張材を使用しても、コンクリートの熱特性は変わらなかった。また、CASE①は他の CASE に比べ最高温度が $5^{\circ}C$ 程度低い結果となっており、HTL 工法の分割打設によるクーリングが有効であったと考えられる。

実測値と解析値を比較すると、何れもやや最高温度が実測値の方が高く、最高温度の発生時期が実測の方が早い結果となった。この結果については、主に図-7 に示すようにコンクリートの断熱温度上昇特性が解析で用いた「2007 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編]」³⁾ に示される推定式 (図-7 中に記載) と実際に差が見られたことによると考えられた。また、CASE①では、材齢 4 日程度までの温度降下速度にも差が見られたが、この結果は前述のクーリング効率が解析での設定値よりも実施工の効率が高かったことによるものと考えられた。

上部工コンクリートの内部と外部の温度差を比較すると、CASE①では他 CASE に比べ最大の温度差を $5^{\circ}C$ 以上抑えることができている。部材の内部と外部の温度差に起因する内部拘束型の温度ひび割れに対しても有効に働くと考えられる。この効果についても HTL 工法による効果と考えられた。なお、CASE②では、材齢 4 日～7 日に温度差が大きくなっているが、この結果は同時期に外気温が低温となり、側面の温度が急激に低下したことによると考えられた。

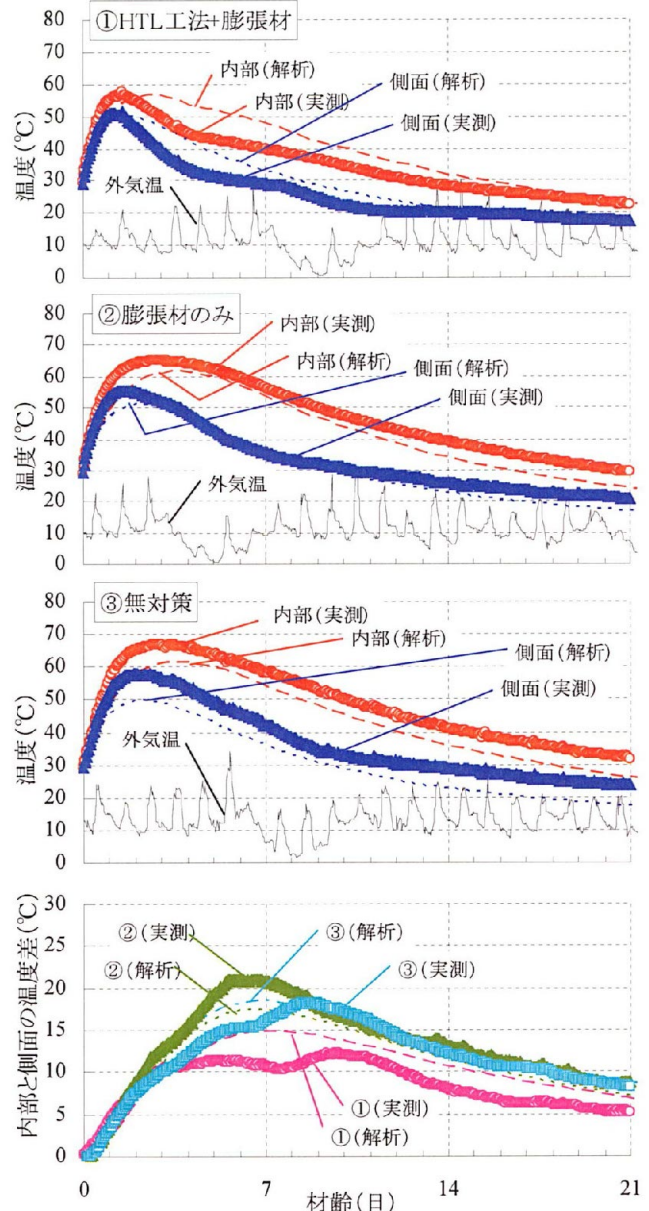


図-6 温度計測結果

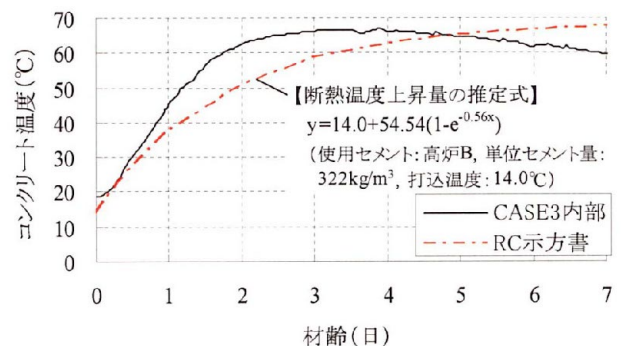


図-7 断熱温度上昇特性の比較

(3) 対策工法の線膨張係数に与える影響

CASE①と CASE③の無応力計により計測した自由ひずみと無応力計設置位置での温度の関係を図-8 に示す。また、温度降下時における自由ひずみと温

度は比例関係にあるとして、図中に直線近似した結果を示した。この直線の傾きを線膨張係数とした。なお、CASE②については、無応力計の計測値が欠損していたため、線膨張係数は得られなかった。

線膨張係数の値は、計測断面によって異なったが、CASE①の値は CASE③の値に比べて 5～10%程度小さな値となった。CASE①は、膨張材の添加と HTL 工法を実施しているが、HTL 工法はコンクリート温度の蓄熱を低減させる工法であり、線膨張係数に影響を与える効果はないと考えられるため、同影響は膨張材の添加によるものと考えられる。

(4) 対策工法のひずみに与える影響

CASE①～③の事前の温度応力解析で最小ひび割れ指数が発生した B-B 断面における埋込み型ひずみ計設置位置での自由ひずみおよび実ひずみの経時変化を図-9 に示す（正：膨張，負：収縮）。なお、同位置における自由ひずみは、以下の手順で算出した。

無応力計の計測結果から得られる温度-ひずみ関係から温度降下時の線膨張係数を算出する。無応力計で計測したひずみから温度ひずみを減じたひずみ（硬化ひずみ）を算出する。なお、温度ひずみは先に算出した線膨張係数に無応力計設置位置における温度変化量に乗じたものとした。硬化ひずみに埋込み型ひずみ計設置位置における温度変化量に線膨張係数を乗じたものを加えたものを埋込み型ひずみ計設置位置での自由ひずみと定義した。CASE②については、線膨張係数が得られなかったが、コンクリートの配合が同じ CASE①の値を用いることとした。

また、実ひずみは埋込み型ひずみ計で計測したひずみを示す。

自由ひずみを比較した場合、CASE③は CASE①および CASE②よりも初期の膨張が小さく、長期的な収縮が大きい結果となっている。この結果は、CASE①および CASE②において膨張材の効果によって初期に膨張ひずみが導入され、長期的な収縮が補償されたことによるものと考えられる。また、CASE①と CASE②の違いは、温度ひずみの違いによるもので、CASE①では HTL 工法の効果により、温度変化量が CASE②に比べ小さかったことによると考えられる。

実ひずみを比較した場合、自由ひずみに比べ各ケースにあまり大きな違いが見られなかった。実ひずみは鉄筋や既設ケーソンなどによる拘束の効果に影響するため、自由ひずみに比べ差が小さくなったと考えられる。ただし、CASE①では、他の CASE に比べ早期に膨張傾向から収縮傾向に変わる傾向が見られた。この結果は、自由ひずみ同様、CASE①の HTL 工法の効果によると考えられる。

(5) 対策工法の応力に与える影響

先に示したひずみと同位置における CASE①～③の有効ひずみおよび有効応力の経時変化を図-10 に示す（正：引張，負：圧縮）。有効ひずみは、コン

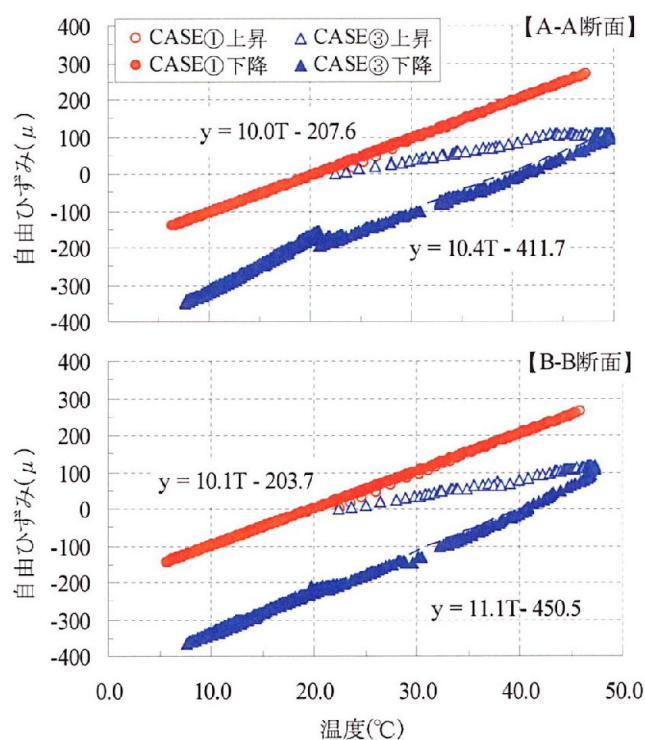


図-8 自由ひずみと温度の関係

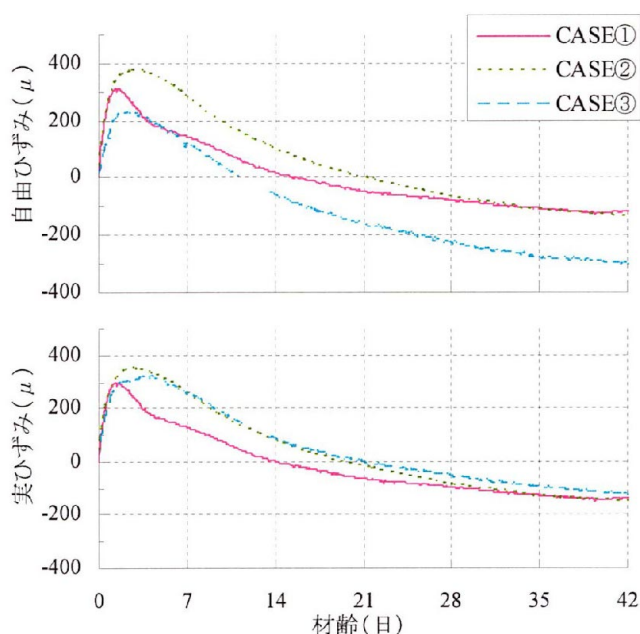


図-9 自由ひずみおよび実ひずみの経時変化

クリートの応力発生に有効なひずみとし、実ひずみから自由ひずみを減じたひずみで表される。

また、コンクリートの発生応力である有効応力は、有効ひずみにコンクリートの有効弾性係数を乗じて算出されるが、特に若材齢時の有効弾性係数は材齢の経過に伴い増大するため、式(3)により算定した。

なお、有効弾性係数および図中のコンクリートの引張強度は、「2007 年度制定コンクリート標準示方

書[設計編]」³⁾に示される式により算出した。

$$\sigma_e(t) = \sum_{i=1}^t [E_e(i) \{ \varepsilon_e(i) - \varepsilon_e(i-1) \}] \quad (3)$$

ここで、

$\sigma_e(t)$: 材齢 t 日の有効応力(N/mm^2)

$E_e(i)$: 材齢 i 日の有効弾性係数(N/mm^2)

$\varepsilon_e(i)$: 材齢 i 日の有効ひずみ

CASE①および CASE②の有効ひずみは、若干ではあるが、負の値を示しており、圧縮側のひずみとなった。この結果は、膨張材による膨張ひずみが鉄筋や既設ケーソンなどの拘束により内部に圧縮ひずみとして蓄積されたものと考えられる。一方、CASE③の有効ひずみは、引張側のひずみとなっており、温度降下による温度収縮やコンクリートの自己収縮・乾燥収縮が拘束されて引張ひずみとして蓄積されたものと考えられる。

また、CASE①および CASE②の有効応力は、若干圧縮応力が発生しており、CASE③の有効応力は、材齢 25 日程度で引張強度よりも大きな引張応力が発生した結果が得られた。

したがって、この結果によれば、CASE①および CASE②については、既設ケーソンなどの外部の拘束によるひび割れの発生は無かったと考えられた。CASE③については、同様なひび割れが発生した可能性があると考えられた。

(6) 外観観察から見た対策工法の効果

型枠の脱型および養生終了以降、計測したブロックの上面および法線方向の側面に対して外観観察を定期的実施した。

型枠の脱型および養生終了時点で実施した観察では、何れのブロックにおいてもひび割れは見られなかった。しかし、打設から約 1 ヶ月経過した時点で実施した観察では、CASE②および CASE③のブロックにおいて法線方向の側面に 0.2mm 以下の縦方向のひび割れが数本見られた。また、発生したひび割れは、CASE②では陸側側面だけに見られたのに対し、CASE③ではほぼ同位置の海側・陸側両面に見られた。

したがって、先に述べた上部工コンクリート内部の有効応力の算出結果と合わせて考えた場合、CASE②に発生したひび割れは、表層部のひび割れの可能性が高いと考えられる。一方、CASE③に発生したひび割れは、内部まで貫通したひび割れの可能性があると考えられた。CASE①でひび割れが発生しなかった要因は、内外部の温度差の低減により、表層部の引張応力が低減でき、かつ長期的な温度収縮ひずみなどの低減により、内部の引張応力も低減できたことによると考えられる。

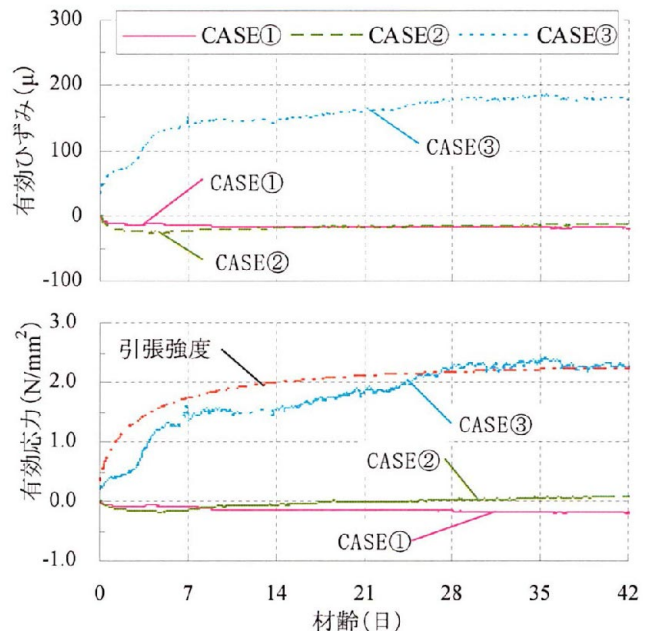


図-10 有効ひずみおよび有効応力の経時変化

4. まとめ

本岸壁上部工コンクリートの施工を通じて以下の知見が得られた。

- (1) HTL 工法は、中空材の適切な配置と通水によるクーリングにより、部材の内外部の温度差を低減でき、内部拘束型の温度ひび割れに対して有効である。
- (2) 膨張材の添加のみの対策および HTL 工法併用の対策は、部材内部に長期的に発生する引張応力を低減でき、外部拘束型の温度ひび割れに対して有効である。
- (3) HTL 工法と膨張材添加の併用対策を実施することで、岸壁上部工コンクリートの内部拘束型および外部拘束型の温度ひび割れを防止することができた。

謝辞：本工事は、(株)吉田組との特定建設工事共同企業体で施工したものであり、施工に際して様々な協力頂いた。紙面を借りてここに深謝致します。

参考文献

- 1) 水元誠司, 竹中寛, 白石哲也, 清宮理: コンクリートの分割施工による温度ひび割れ抑制効果とその適用について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30/No. 2, pp. 151-156, 2008.
- 2) 笹倉伸晃, 伊藤始, 三島徹也, 中島良光: エアパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24/No. 1, pp. 981-986, 2002.
- 3) (社)土木学会: 2007 年度制定コンクリート標準示方書[設計編], pp. 340-343, 2008.