

新北九州空港連絡橋コンクリート橋脚の 耐久性設計と温度ひび割れ制御

松下博通¹・原田哲夫²・添田政司³・龍良平⁴・吉竹豊尚⁵

¹フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

³正会員 工博 福岡大学大学院助教授 工学研究科資源循環・環境専攻 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

⁴正会員 福岡県田川土木事務所主任技師 (前 福岡県新北九州空港連絡道路建設事務所) (〒800-0315 福岡県京都郡苅田町苅田28-2)

⁵正会員 工修 大成建設株式会社 名古屋支店土木部課長代理 (前 大成・三井・日本国土開発特定建設共同企業体) (〒450-6047 名古屋市中村区名駅1-1-4)

新北九州空港連絡橋の海中橋脚を対象として第1種防食法による耐久性設計およびマスコンクリートとしての温度ひび割れ制御の検討を実施した。アルカリ骨材反応性試験で無害と判定される粗骨材であっても高アルカリ環境下では異常膨張を示すこと、これに対して高炉スラグ微粉末を置換率50%で使用すればアルカリ骨材反応が抑制されることを確認した。高炉スラグ微粉末高添加の低発熱セメントによるコンクリートの発熱量の低減と保温型枠による放熱量の制御とを併せて実施することで、ひび割れ指数を感潮帯では1.0以上、海中・海上大気中では0.7以上としひび割れ幅を0.1～0.3mmに抑制できた。また、ひび割れ幅・間隔には配力鉄筋比および構造体温度と外気温との温度差の影響が大きいことを明らかとした。

Key Words: durability design, alkali-aggregate reaction, thermal cracking control, mass concrete

1.はじめに

新北九州空港は、現在の北九州空港の代替として、北九州・京築圏域200万人の航空利便性の確保と北九州地域活性化のため、周防灘沖約2kmの海上に約370haの埋立てによって建設される海上空港である(2005年開港予定)。空港島と対岸の新松山埋立地(福岡県京都郡苅田町)を結ぶ新北九州空港連絡道路は、橋長2,100mの海上連絡橋を含む全長約8.0kmを県道新北九州空港線として整備し国道10号および東九州自動車苅田IC(仮称)に接続する計画としている(図-1)。新北九州空港連絡橋は写真-1に示す鋼モノコードバランスドアーチ橋を中心に10径間および11径間連続鋼床版箱げた橋により橋長2100mの海上連絡橋を構成している。下部工はコンクリート橋脚および橋台25基からなり、そのうち22基が海中橋脚である(図-2)。

コンクリート橋脚は、橋脚躯体そのものが海中～

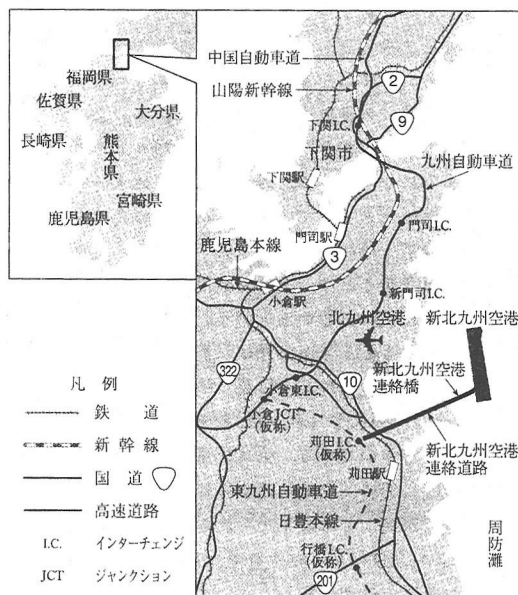


図-1 連絡道路位置図

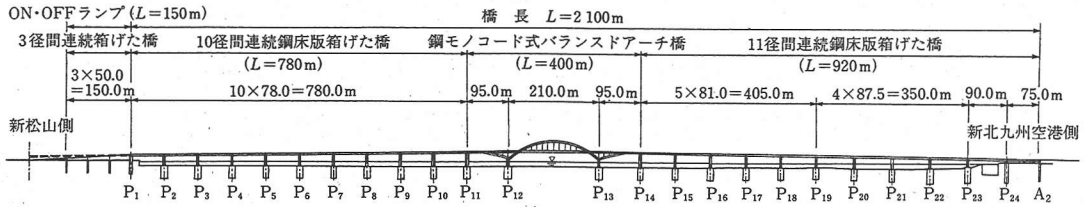


図-2 新北九州空港連絡橋一般図

飛沫帯～海上大気中に位置し、1)海洋環境であること、2)供用後の維持管理・補修が困難であること、3)空港への唯一の連絡施設であることといった特徴がある。このため設計・施工計画の段階において海洋コンクリート構造物としての耐久性確保について種々の検討を重ねてきた¹⁾。

本報告は、これらの検討のうち、橋脚躯体の耐久性設計および橋脚躯体マスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する一連の検討結果をまとめたものである。

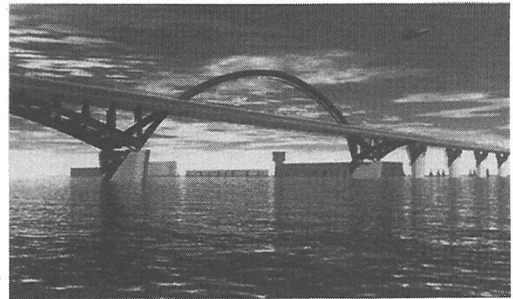


写真-1 鋼モノコードバランスドアーチ橋完成イメージ

2.橋脚コンクリートの耐久性設計

(1) 耐久性の検討条件

コンクリート橋脚構造の設計および施工検討を行なうにあたり、以下の事項を考慮した。

1) 海洋環境下の構造物

本構造は、飛沫帯またはそれと同等な非常に厳しい環境条件下において供用される海中橋脚であることから、コンクリートの耐久性および鋼材を保護する性能を確保するため、海水の作用に対して耐久的な材料を用いて施工を行なう必要がある。

2) 空港への唯一の連絡施設

本構造は空港への唯一の連絡施設であることから重要度の高い構造物である。現計画では代替のない道路のため、本構造物の設計耐用年限について十分検討したうえで耐久性に関する仕様を設定する必要がある。

3) アルカリ骨材反応抑制対策

事前に行なった本構造物建設周辺地域における既設構造物の劣化状況調査²⁾によると、この地域にはアルカリ骨材反応を呈していると思われる構造物が多々存在していることから、周辺地域から産出される骨材はアルカリ骨材反応性骨材の可能性があると考えられた。また本構造物は海上橋であり、外部か

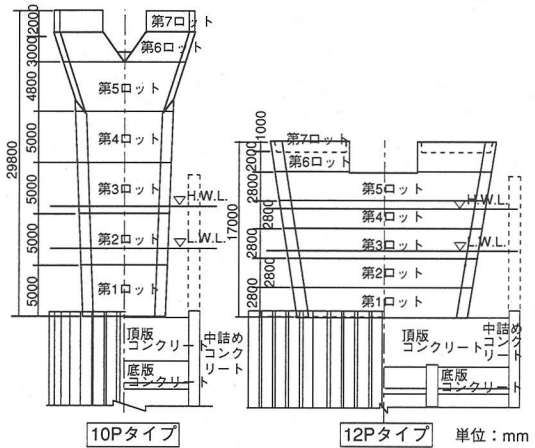


図-3 橋脚の構造概要

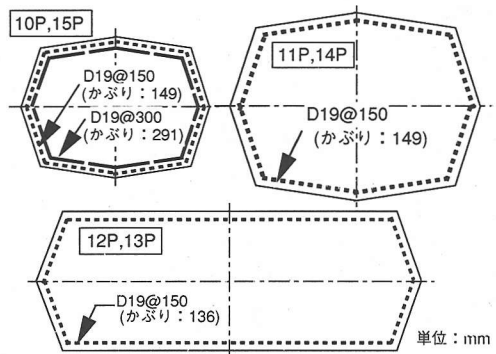


図-4 断面形状の例および配力筋の概要

ら浸透する塩化物によって高アルカリ環境になるこ

表-1 橋脚構造の諸元

区分(呼称)	形式	諸元	配力鉄筋(鉄筋比)	摘要
基礎構造	鋼管矢板 井筒式基礎	杭基礎+頂版 (厚さ4.0~4.5 m)	-	-
躯体構造 (10Pタイプ)	ブロック状構造 (10P,15P)	最大壁厚:6.0m 平均壁厚:5.0m 壁長:7.7~8.1m 打上高さ:3.0~5.5m	D19@150 D19@300 (0.115%)	感潮帯 第2~3 ロット
	ブロック状構造 (11P,14P)	最大壁厚:8.0m 平均壁厚:7.0m 壁長:8.6~10.0m 打上高さ:3.0~5.5m	D19@150 (0.055%)	感潮帯 第2~3 ロット
躯体構造 (12Pタイプ)	壁柱構造 (12P,13P)	壁厚:6.0m 壁長:13.7~17.0m 打上高さ:2.0~3.0m	D19@150 (0.064%)	感潮帯 第3~4 ロット

とが十分に考えられた。したがって、アルカリ骨材反応を確実に抑制できる対策を選定する必要がある。

4) 温度ひび割れの検討

本構造物の代表的な構造概要および断面形状・寸法は図-3、図-4および表-1に示すものである。橋脚躯体は非常にマッシュであることから温度ひび割れの発生を完全に抑制することが困難なことが予想された。したがって、温度ひび割れ指数とひび割れ幅の制御を考慮したマスコンクリートとしての施工検討を行ない、耐久性確保のために必要な対策を検討する必要がある。

(2) 耐久性設計

a) 設計耐用年限と防食法

1) 設計耐用年限

コンクリート工学協会「鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方」³⁾では、高度の耐久性を要求される構造物として、

○社会的条件から高度の耐久性を要求されるもの

- ・国家的プロジェクトに関連する構造物
- ・劣化、損傷によって人命などに重要な危険を生ずる恐れのあるもの

○経済的条件から高度の耐久性を要求されるもの

- ・劣化、損傷した場合に修理・更新による経済的な損失が大きい構造物
- ・躯体の耐用年数の伸長が経済的に有利になると考えられる構造物

が示されている。

本構造物は上記事項に該当し高度の耐久性を要求される構造物と考えられ、かつ海洋構造物で補修・補強が困難であるため、耐久性設計では設計耐用年数100年を基本とした。

2) 防食法

コンクリート工学協会「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」⁴⁾に示される第1種防食法を基本とし、防食の区分および施工条件に応じ、防食に必要なかぶり、許容のひび割れ幅およびコンクリートの品質を選定した。

b) かぶり

塩害・中性化に対して、コンクリート工学協会「鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方」に基づき、海岸からの距離:0.0km(飛沫体)、セメントの種類:高炉セメントB種、骨材の種類:普通、水セメント比:45%、単位水量:149kg/m³、単位セメント量:330kg/m³、型枠:普通型枠の各条

件において、設計耐用期間100年の劣化深さを算定したところ10.49cmを得た。また「コンクリート標準示方書(設計編)[平成8年制定]」⁵⁾では「特に厳しい腐食環境では10cm以上が望ましい」となっており、これらから判断して本構造物では10.5cm以上のかぶりを確保することとした。

c) ひび割れ

許容ひび割れ幅について、土木学会「コンクリート標準示方書(設計編)[平成8年制定]」7.4.2の許容ひび割れ幅の規定に従えば、特に厳しい腐食性環境の場合は $0.0035c=0.0035 \times 100 (<105) = 0.35\text{mm}$ となるが、本構造物では、より厳しい条件となるコンクリート工学協会「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」3.3を準用して設定した。すなわち、防食の区分A種(飛沫帯またはそれと同等な非常に厳しい環境条件下)において、施工条件がよい場合で荷重頻度がまれを参照し、最大ひび割れ幅を0.2mmとすることとした。

d) コンクリートの品質

海洋環境を考慮して、セメントには高炉セメントB種(高炉スラグ微粉末置換率50%以上)を使用し、水セメント比と単位セメント量は土木学会「コンクリート標準示方書(施工編)[平成8年制定]」の海洋コンクリートの規定にしたがって決定した。

使用する骨材については、アルカリ骨材反応を確実に抑制するために詳細な調査・検討を行なった。

e) 施工上の対策

そのほかに、橋脚躯体により高い耐久性を期待できるように、打継目モルタルの施工、透水型枠の使用も併せて実施した。

3. アルカリ骨材反応抑制対策

(1) 既設構造物の劣化状況調査

本構造物の建設周辺地域（南北約7km, 海岸から内陸へ約2km）を調査エリアとして既設コンクリート構造物の外観を観察した²⁾。このうち侵出物が観察されたものと大きなひび割れが発生しているものを詳細調査の対象とし30地点を選定した。その内訳は、橋梁・水門・護岸壁など河川に関連したものが23か所、建築物やその基礎が5か所、観覧席と防波堤が各々1か所である。

構造物の概要としては名称・位置・地域区分・完成年月・補修状況を、劣化状態としては鉄筋の腐食状況（錆汁の有無・露出か所数）、ひび割れ状況（ひび割れパターン・幅）および侵出物の有無・色を調査した。調査結果の一例を表-2に示す。

多くの構造物から白色の侵出物が見られ、ひび割れのパターンとしてはアルカリ骨材反応特有の亀甲状のひび割れも散見された。このようなひび割れの状況などから判断して調査対象となった全構造物の10%弱にアルカリ骨材反応の疑いがあることが判った。その中でも竣工時期が昭和30年代から50年代半ばにかけての古い構造物ほどひび割れが著しく発生し、そのひび割れ幅も大きい傾向にあった。またこの傾向は海岸からの距離が小さいものほど顕著であった。

実際に、亀甲状の異常ひび割れが生じた構造物（擁壁）から採取したコアから粗骨材を抽出しアルカリ骨材反応性試験の化学法（JIS A5308-1993付属書7）によって試験を行なったところ（表-3）、ひび割れの多少に関わらずSc/Rc>1となり「無害でない」と判定された。さらに、このコアを室内で促進養生（湿度95±5%、温度40±5℃）し、6か月めに骨材の周辺部に確認された白色析出物をX線マイクロアナライザー（EPMA）を使用使用して分析したところ、この白色析出物はアルカリ骨材反応特有の反応生成物であるシリカゲル（アルカリ-カルシウム-シリカ型）であると判断された。

このコアに使用されている粗骨材は硬質砂岩であるが、偏向顕微鏡観察の結果では、微細な石英粒子や絹雲母などの微細な粘土鉱物が最大3割程度含まれており、これらの存在がアルカリ骨材反応を引き起こしたものと推察される。

表-2 周辺構造物劣化状況調査

構造物概要 *海岸からの距離		劣化状況				
構造物 完成年	地域 距離*	侵出物 (色)	はが れ	鉄筋 露出	錆汁	ひび割れ 状況・幅
橋梁 S40年	郊外 1.6km	無 (白色)	有	多い	多い	鉄筋に沿う 1.40mm
水門 不明	郊外 2.2km	有 (白色)	無	無	無	縦方向に1本と 微細な亀甲状
橋梁 S61年	市街地 1.4km	有 (白色)	無	無	有	縦方向
橋門 不明	海岸 0.02km	有 (白色)	無	無	無	亀甲状 2.0mm
水門 不明	工場地帯 1.4km	有 (白色)	無	無	無	縦方向 0.15mm
支柱 不明	市街地 1.4km	有 (白色)	有	有	無	微細な亀甲状 0.35mm
橋梁 S56年	工場地帯 1.1km	有 (白色)	無	無	無	亀甲状 0.4mm
橋梁 S47年	工場地帯 0.5km	有 (灰色)	無	無	無	亀甲状1.4mm
擁壁 S48年	工場地帯 0.02km	有 (白色)	有	無	無	亀甲状 6.0mm
橋梁 S58年	住宅地 3.3km	有 (灰色)	有	無	無	亀甲状 0.65mm

表-3 化学法試験結果および岩種判定結果

採取か所	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	判定	岩種判定
上部	152	106	無害でない	砂岩
下部	81	69	無害でない	砂岩

表-4 骨材の岩種および化学法試験結果

試料 番号	試料 名	岩種	産地	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	判定
1	砕石	変輝緑岩	A	33	39	無害
2	砕石	硬質砂岩	B	68	52	無害でない
3	砕石	石英斑岩 硬質砂岩	C	44	82	無害
4	砕石	石英斑岩	C	49	90	無害
5	砕石	硬質砂岩	C	123	46	無害でない
6	海砂	—	D	24	104	無害
7	砕石	石英斑岩 硬質砂岩	C	60	97	無害
8	砕石	硬質砂岩	E	132	39	無害でない
9	砕石	硬質砂岩	F	41	55	無害
10	海砂	—	G	19	52	無害
11	砕石	硬質砂岩	F	39	51	無害
12	砕石	硬質砂岩	E	87	54	無害でない
13	砕石	硬質砂岩	E	33	43	無害
14	砕石	石灰石	H	3	6	無害
15	砕石	花崗岩	I	10	33	無害

(2) 骨材のアルカリ反応性試験

建設周辺地域の複数の生コンクリート工場のストックヤードから粗骨材(砕石2005)13試料および細骨材(海砂)2試料（産地はA～Iの9産地）をサンプリングし、アルカリ骨材反応性試験の化学法による試験

と偏向顕微鏡観察および粉末X線回折による岩種判定・鉱物の鑑定とを行なった。試験結果を表-4に示す。海砂についてはいずれも無害であったが、碎石については4試料が無害でないと判定された。この4試料の岩種はいずれも硬質砂岩と判定された。

次に化学法で無害でないと判定された4試料(No.2,5,8,12)と無害と判定された1試料(No.11)とをアルカリ骨材反応性試験のモルタルバー法(JIS A5308-1993付属書8)によって試験した。ここで、モルタルバー法のアルカリ量は、JISに規定される $R_2O=1.2\%$ と高アルカリ環境を想定した $R_2O=2.0\%$ との2通りとした。6か月後の膨張率の測定値を表-5に示す。

$R_2O=1.2\%$ の場合の膨張率は、いずれの試料でも0.025%前後であり全て無害(0.100%未満)と判定されるのに対して、 $R_2O=2.0\%$ の場合は、化学法で無害でないと判定されたNo.2,5,8の試料は0.114~0.376%の異常膨張を示した。また化学法で無害とされたNo.11の試料も高アルカリ環境下では異常膨張を示すことが明らかとなった。

これらのことから、現在生コンクリート工場で使用されている骨材は、通常環境に構築される構造物に使用しても全く問題ないと判断されるが、外部から浸透する塩化物(NaCl)によって高アルカリ環境になることを想定される本構造物にこれらの骨材を使用する場合には、何らかのアルカリ骨材反応防止対策を講ずる必要があるものと判断された。

(3) アルカリ骨材反応抑制効果の確認試験

アルカリ骨材反応対策として、高炉スラグ微粉末の使用による抑制方法をコンクリートバー法試験(コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法(コンクリート法) JCI-AAR-3-1987)により検討した。

粗骨材にはアルカリ骨材反応性試験(化学法)で無害でないと判定された2種類(Ga(試料番号8): Sc29, Rc24, Gb(試料番号2): Sc48, Rc42, 各々サンプリングロットが異なるのでSc, Rcは再測定値)を使用した。結合材には普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末(比表面積4000 cm^2/g)を使用し、結合材の全アルカリ量が $R_2O=2.0\%$ となるように水酸化ナトリウムを添加した。高炉スラグ微粉末の置換率は0%および50%である。

コンクリートバーの膨張率を図-5に示す。高炉スラグ微粉末で置換しない場合、いずれの骨材も試験開始から2か月めまでは収縮しているがその後徐々に

表-5 モルタルバー法試験結果

試料番号	岩種	産地	膨張率(%) $R_2O=1.2\%$	判定	膨張率(%) $R_2O=2.0\%$
2	硬質砂岩	B	0.022	無害	0.144
5	硬質砂岩	C	0.024	無害	0.240
8	硬質砂岩	E	0.026	無害	0.376
11	硬質砂岩	F	0.023	無害	0.257
12	硬質砂岩	E	0.025	無害	0.057

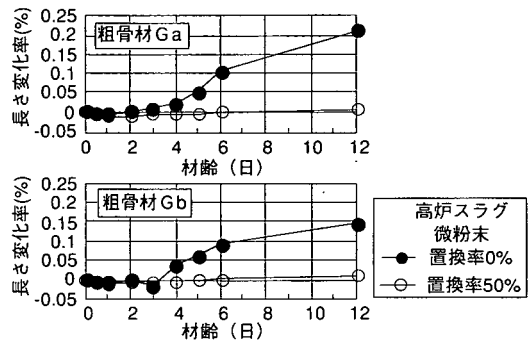


図-5 コンクリートバーの膨張率

に膨張し始め、6か月めでは0.1%以上の膨張率を示している。このとき供試体表面にはアルカリ骨材反応特有の亀甲状のひび割れも確認されているので、これらの骨材は、高アルカリ条件下では異常膨張を起こす骨材であると判断される。

一方、高炉スラグ微粉末で50%置換した場合には、いずれの骨材でも、高アルカリ条件下にもかかわらず1年めにおいても全く膨張しておらず供試体表面にもひび割れは認められなかった。したがって、高炉微粉末の使用はアルカリ骨材反応の抑制に対する効果が極めて高い対策であると判断できる。

以上のことから、本工事におけるアルカリ骨材反応の防止対策として高炉スラグ微粉末を添加する方法を選定した。さらにその置換率は、土木学会「高炉スラグ微粉末設計施工指針(案)」にもあるように、50%以上とすることとした。

4. 温度ひび割れ制御計画

(1) 温度ひび割れ制御目標

本構造物はマッシュプであり、加えて工程上の制約から打ち込み時期が夏場にならざるを得ない。このような状況から温度ひび割れの発生を完全に抑制することが困難と考えられたため、温度応力の事前解析を行なってひび割れ指数とひび割れ幅の制限を考

表-6 耐久性に関する仕様

分類	項目	仕様	摘要
設計	かぶり	105mm以上	実際136~146mm
材料配合	セメント種別	高炉セメントB種(高炉スラグ微粉末置換率50%以上)	耐海水性・アルカリ骨材反応対策
	骨材	アルカリ骨材反応性がないこと	
配合	水セメント比	45%以下	海洋コンクリートの規定に準拠
	単位セメント量	330kg/m ³ 以上	
温度	セメント種別	低発熱高炉セメント(低熱ポルトランドセメントベース)	高炉スラグ微粉末置換率60%、比表面積:6000cm ² /g
ひび割れ制御	温度ひび割れ指数	海中部、海上大気中:0.7以上 感潮帯:1.0以上	温度応力事前解析による評価
	ひび割れ幅	0.2mm未満に制限	0.2mm以上はエポキシ樹脂注入補修

表-7 コンクリートの配合

設計基準強度 N/mm ²	粗骨材の最大寸法 mm	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
27	20	8 ± 1.5	4.5 ± 1.5	45	40	149	330	717	1165	1.17

慮したマスコンクリート対策を採用した。耐久性確保に関連するコンクリート等の仕様・ひび割れ制御の仕様を表-6に、コンクリートの配合を表-7に示す。温度ひび割れ低減のために、低熱ポルトランドセメントと比表面積の大きい(6000cm²/g)高炉スラグ微粉末とを組み合わせた発熱量の極めて小さいタイプの高炉セメントB種(高炉スラグ微粉末置換率は60%、以下このセメントを低発熱高炉セメントと呼ぶ)を使用した。これは、事前の温度応力解析によって温度ひび割れ指数の低減効果が確認されたことによる。

温度ひび割れ指数としては、橋脚全体として0.7以上(ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制御したい場合に相当)を、感潮帯については、より高い耐久性が要求されることからさらなるひび割れ発生の制限を考慮し、1.0以上を確保することを目標とした。加えて、ひび割れ幅が0.2mmを超えて発生したものについては、エポキシ樹脂による注入補修を行なうことも併せて計画した。

(2) 事前解析におけるひび割れの評価

a) 事前解析検討条件と対策のフロー

事前解析においては、低発熱高炉セメントを使用

表-8 事前解析の検討条件(セメント種類の相違)

対象:12Pタイプ(幅6.0m,長さ15.2m,2.8m×5ロット) (地盤厚10m+底版6.5m厚×23.7×14m) 橋脚躯体打込み開始:8/15		
温度解析:FEM法、応力解析:CP法(JCI)		
外気温、打込み温度		現場実績、外気温+5℃
セメント種類	高炉セメントB種(高炉スラグ微粉末置換率40~50%)	低発熱高炉セメント(低熱ポルトベース、高炉スラグ微粉末置換率60%)
単位セメント量(kg/m ³)	340	340
断熱特性(20℃打込み)	Q _∞ (℃)	55.1
	γ(ℓ/日)	0.577
比熱(kJ/(kg・℃))	1.26(示方書の標準値)	
熱伝導率W/(m・℃)	2.67(示方書の標準値)	
単位容積質量(kg/m ³)	2350(配合表から)	
表面熱伝達率(W/(m ² ・℃))	8.1(型枠・養生面、示方書の標準値)	
地盤比熱(kJ/(kg・℃))	0.84(一般的な値を仮定)	
地盤熱伝導率W/(m・℃)	3.49(一般的な値を仮定)	
地盤密度(kg/m ³)	1700(現場状況から)	
地盤安定温度(℃)	16.3(平年気温の平均値)	
圧縮強度(N/mm ²)	a=11.6, b=0.87, C=63.4	a=13.6, b=0.85, C=44.6
引張強度(N/mm ²)	ft(t) = 0.35 × f'c(t) ^{0.50}	
ヤング係数(N/mm ²)	Ec(t) = 4700 × f'c(t) ^{0.50}	
クリープ考慮	材齢~3日:φ(t)=0.73 材齢5日~:φ(t)=1.00	
Ee(t)=φ(t)×Ec(t)		
線膨張係数(1/℃)	1.0×10 ⁻⁵	
外部拘束度	地盤を拘束体(拘束度係数:0)	

表-9 事前解析の検討条件(型枠養生条件の相違)

12Pモデル: 幅6.0m,長さ15.2m, 2.8m×5ロット (6/15打設開始)		10Pモデル: 幅6.0m,長さ7.0m, 5.0m×5ロット (5/15打設開始)	
保温型枠養生(1~4ロット)	保温型枠なし	保温型枠養生(2~3ロット)	保温型枠なし
セメント種類	低発熱高炉セメント(低熱ポルトベース、高炉スラグ微粉末置換率60%)		
単位セメント量	340(kg/m ³)		
表面熱伝達率(W/(m ² ・℃))	型枠面・養生面		8.1
	保温型枠:発泡スチロール5cm		1.7
	海水接触面		116

*上記以外の条件は表-8と同様

する効果の検討および実際の施工条件を考慮したひび割れ指数とひび割れ幅の評価とそれらの改善方法の検討の2段階の解析検討を行なった。検討条件を表-8および表-9に示す。

セメントの相違については、12Pタイプ(壁柱構造、表-1の分類を参照)の橋脚における夏場施工条件での比較を行なった。実際の施工条件を考慮したシリーズでは、12Pタイプ(壁柱構造)・10Pタイプ(ブロック状構造)の橋脚形状の相違および保温型

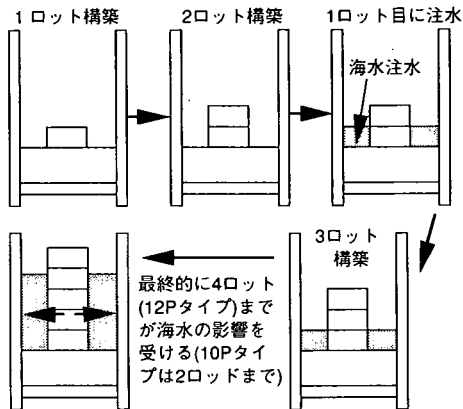


図-6 井筒内への海水注入状況

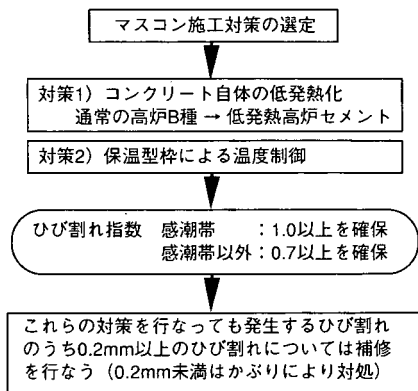


図-7 温度ひび割れ対策のフロー

枠養生の有無の影響を組み合わせて検討した。

型枠材料による境界条件の制御を計画したのは、橋脚の施工過程において、図-6に示すように、鋼管矢板井筒内部にコンクリート打設後注水がなされ、この注水によって躯体側面からの放熱が大きくなり、この結果 温度ひび割れの発生確率が大きくなる現象が解析上で確認されたことによる。これに対して、注水までの期間に側面を保温型枠（木製パネル+発泡スチロール5cm）で覆い、構造体の温度の降下速度を緩やかにし上方リフトとの温度差を小さくする、また海水が注入された場合の構造体温度低下の程度をできるだけ小さくする両効果を型枠材料に期待する方法を検討したものである。

結果的に、12Pタイプの橋脚では、ひび割れ指数0.7以上を確保するために第1～第2ロットに、感潮帯で1.0以上を確保するために第3～第4ロットに、各々保温型枠を適用した。また10Pタイプの橋脚では、感潮帯で1.0以上を確保するために第2～第3ロットに保温型枠を適用した。

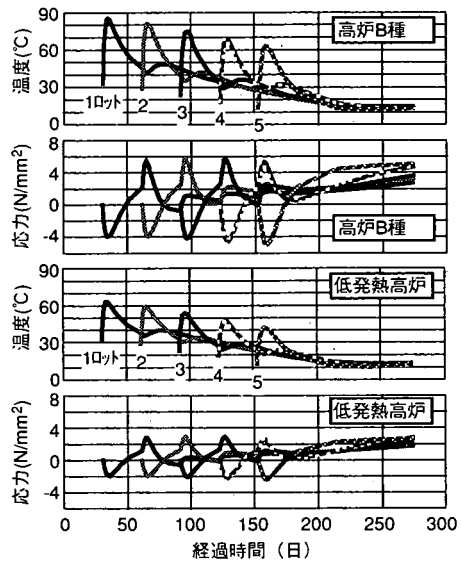


図-8 ロット中心部における温度と応力の履歴(12P)

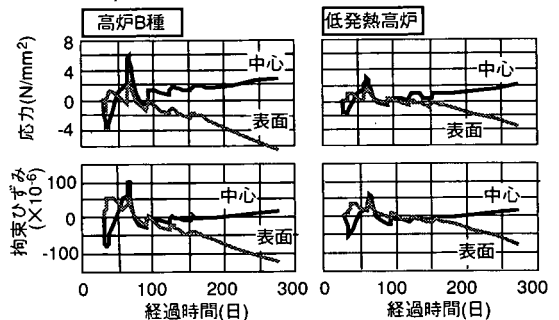


図-9 中心部と表面部の応力とひずみの履歴(12P)

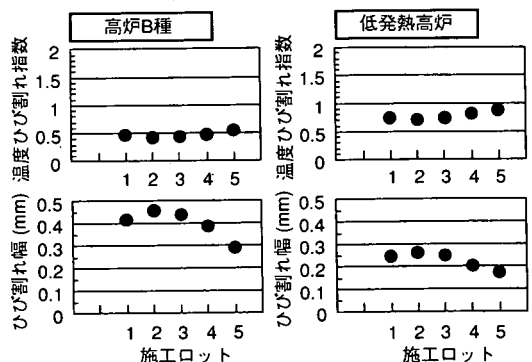


図-10 セメントの種類によるひび割れ現象の相違の予測

したがって、温度ひび割れ対策およびひび割れに対する耐久性の確保のフローは図-7に示すものとなった。

b) セメント種類の影響

図-8には、通常の高炉セメントB種（高炉スラグ

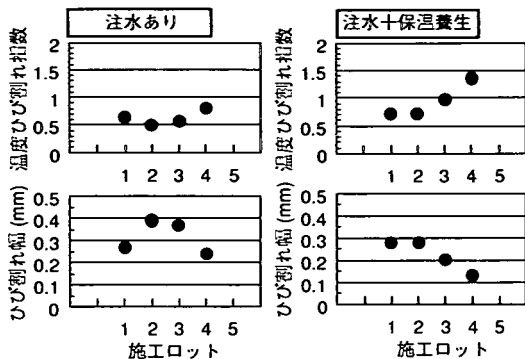


図-11 施工条件を考慮したひび割れ予測 (12P)

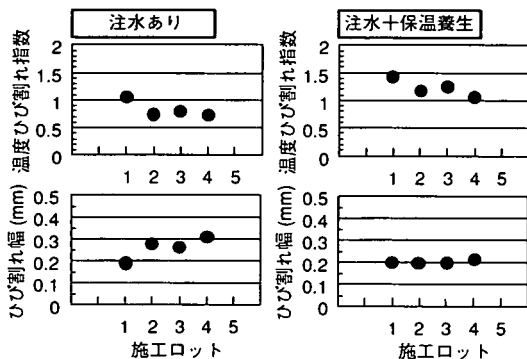


図-12 施工条件を考慮したひび割れ予測 (10P)

微粉末の置換率40~50%)を使用した場合および低発熱高炉セメントを使用した場合の温度と応力の履歴を各々示す。図-9には、第1ロットの中心部と表面部の応力とひずみの履歴を、図-10には、温度ひび割れ指数とひび割れ幅の算定結果を示す。これらの解析では井筒内への注水の影響は考慮されていない。

ここで温度ひび割れ幅は、解析で求めた最大のひずみ量がひび割れの発生によってすべて解放され4.2m (ロット高さ2.8mの1.5倍の間隔) ごとにひび割れが発生すると仮定して算出したものである。

ロット中心部の温度応力は、打込み直後の温度上昇期に圧縮となるが温度が降下するのに応じて引張側に転じ、さらに次ロット打設後に最大引張応力を示す。ロット表面部では逆に温度上昇期に引張応力が生じ温度降下時に圧縮に転ずるが次ロット打設によって再度引張応力を呈するようになる。次ロット打設後時点での中心部の最大引張応力は、材齢初期あるいはその後に表面部に発生する応力より大きい。ため、この時点でのロット中心部がひび割れ指数最小となる。

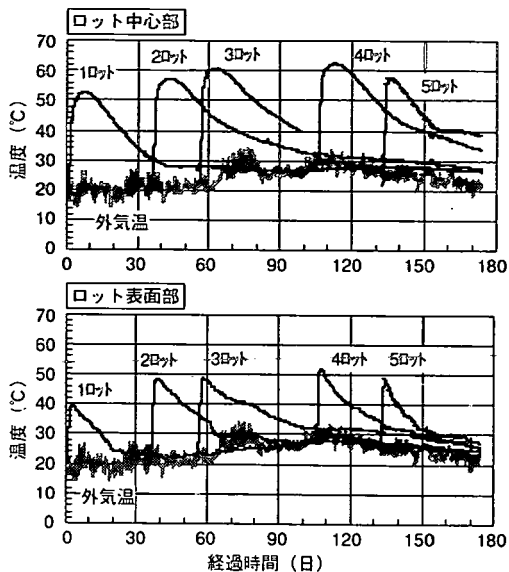


図-13 中心部・表面部の温度履歴

表-10 各ロットの施工履歴と温度測定値

ロット	ロット高さ (m)	打込み日	打込み温度 (°C)	最大温度 (°C)	最大温度材齢 (日)	温度上昇量 (°C)	次ロット材齢 (日)	温度降下量 (°C)	中心表面温度差 (°C)	最大温度差材齢 (日)
1	4.4	4/22	19.1	52.5	6.3	33.4	36	22.0	18.8	17.2
2	5.1	5/28	24.5	57.0	6.2	32.5	20	8.1	14.5	12.1
3	5.0	6/17	26.9	60.7	6.1	33.8	40	24.7	16.6	10.1
4	5.0	8/6	31.8	62.3	3.6	30.5	27	14.4	19.5	12.0
5	3.0	9/2	28.0	57.8	3.3	29.8	19	15.3	15.4	6.2

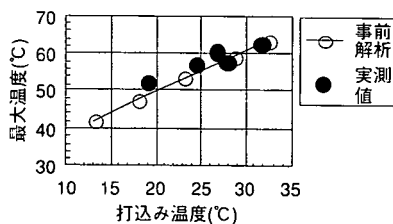


図-14 解析値と実測値の比較 (ロット中心部)

最大の引張応力は通常の高炉B種が $5.2\sim 5.8\text{N/mm}^2$ で、この時の温度ひび割れ指数が $0.43\sim 0.55$ を示したのに対して、低発熱高炉を使用することによって、最大温度・引張応力とも相対的に低減しひび割れ指数が $0.71\sim 0.87$ のレベルまで上昇する効果が確認された。

c) 型枠養生条件の相違

井筒内への注水を考慮した場合およびこれに保温

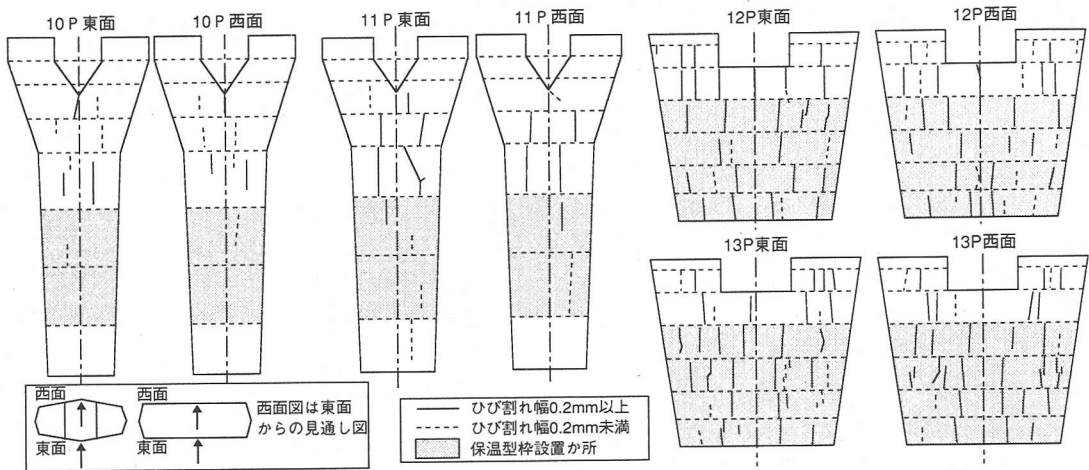


図-15 温度ひび割れの発生状況の例

型枠による養生対策を加えた場合の温度ひび割れ指数および温度ひび割れ幅の解析結果を、12Pタイプ橋脚について図-11に、10Pタイプ橋脚について図-12に示す。

12Pタイプの橋脚において養生対策を行わない場合には温度ひび割れ指数が0.4~0.8となり0.2~0.4mmのひび割れ幅が推定されたのに対して、保温型枠による養生対策を加えることによってひび割れ指数が0.7以上、ひび割れ幅が0.1~0.3mmに抑制される効果が算定された。さらに感潮帯となる3~4リフトではひび割れ指数がおおよそ1.0を上回る予測となった。10Pタイプの橋脚についても養生対策を加えることによって橋脚全体のひび割れ指数が1.0~1.5の範囲になり、ひび割れ幅を0.2mm以下に抑えることが期待できる予測を得た。

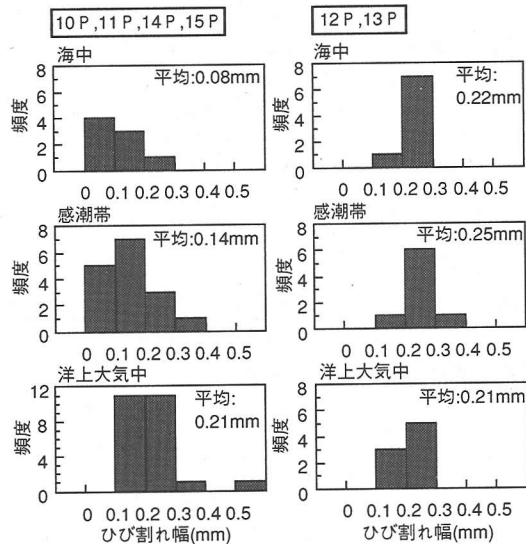


図-16 ひび割れ幅の発生頻度

5. 温度ひび割れの発生状況とその影響要因評価

(1) 実測の温度履歴

図-13および表-10には、10P橋脚における各ロットの部材中心部および表面部の温度履歴の実測結果を示す。第1ロットの施工は4月から開始されたので、施工ロットが後になるほど打込み温度と最大温度が高くなり第4ロットでは62.3℃の最大温度が記録された。各ロットの温度上昇量は30~34℃程度ではほぼ同等である。次ロットまでの温度降下量は8~25℃で打継ぎの材齢が長くなるほど温度降下量が大きくなる傾向を示した。

事前解析と実施工では打込みスケジュールが異なる

表-11 事前解析と実施工のひび割れ幅の比較

橋脚	解析開始	分類	ひび割れ幅(mm)			実際の施工開始日
			海中	感潮帯	海上大気中	
12P 13P	6月	事前予測	0.28	0.21~0.24	0.23	12P: 8/4
		実施工	0.22	0.25	0.21	13P: 7/27
10P 11P 14P 15P	5月	事前予測	0.20	0.20	0.21~0.28	10P: 4/22
		実施工	0.08	0.14	0.21	11P: 5/13
						14P: 6/15
					15P: 6/25	

るので温度履歴の適合性を直接比較はできないが、図-14に示すようにロット中心部の最大温度を打込み温度との関係として整理した場合には、事前解析値と実測値がほぼ一致する傾向を示している。

(2) 温度ひび割れの発生状況

実際に橋脚に発生したひび割れの状態の測定例を図-15に示す。このひび割れ状態は、各ロットとも打込みから30～60日経過後の時点で観測したものである。

ここで示すひび割れ幅は、1本のひび割れの中で最も大きい幅をそのひび割れの代表値としたものである。ひび割れの観測は0.04mm～0.20mmの軽微なひび割れについてもすべて行ない、各々1本のひび割れとしてカウントした。図中には0.20mmを上回るものを実線により、0.2mmに満たないものを破線により示している。

ひび割れは垂直方向に一定の間隔で、ロットの中で幅が大きいいわゆる「なかわれ」の状態となって発生した。したがって上下ロット間でのひび割れの連続は認められなかった。また、壁正面と背面のひび割れ発生位置の対応から推定すると貫通ひび割れではないことが推察されるものであった。このようなひび割れの発生状態は、温度応力を原因とする表面ひび割れに特有な発生状況であると見受けられた。

全ての橋脚におけるひび割れ幅と発生頻度の関係を、海中・感潮帯・海上大気中の部位ごとにまとめて図-16に示す。ひび割れ幅は当然のことながら一定の範囲でばらついて観測されているが、各部位でのひび割れ幅の平均値は、表-11に示すように、解析で予測したひび割れ幅（ばらつきは考慮されていない予測値）と同等かそれ以下のものとなっていた。

(3) ひび割れ発生に及ぼす影響因子の評価

各橋脚のすべてのロットについて、そのロットの打込み温度・そのロットの打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差・次のロットまでの打継ぎ間隔日数（以下打継ぎ材齢という）・拘束度要因（壁高さに対する壁長さの比、以下L/Hと表す）・配力鉄筋比が、そのロットに発生する平均のひび割れ幅と解放ひずみ量とに及ぼす影響を図-17に示す。また、打上がり高さで平均のひび割れ間隔の関係を図-18に示す。

温度ひび割れは基本的には、水和熱により温度が上昇した構造体が放熱によって冷却する過程でコンクリートの長さ変化が拘束されて生ずるので、温度ひび割れの発生状態を表わす指標を概念的には式(1)～式(3)のように示すことができる。

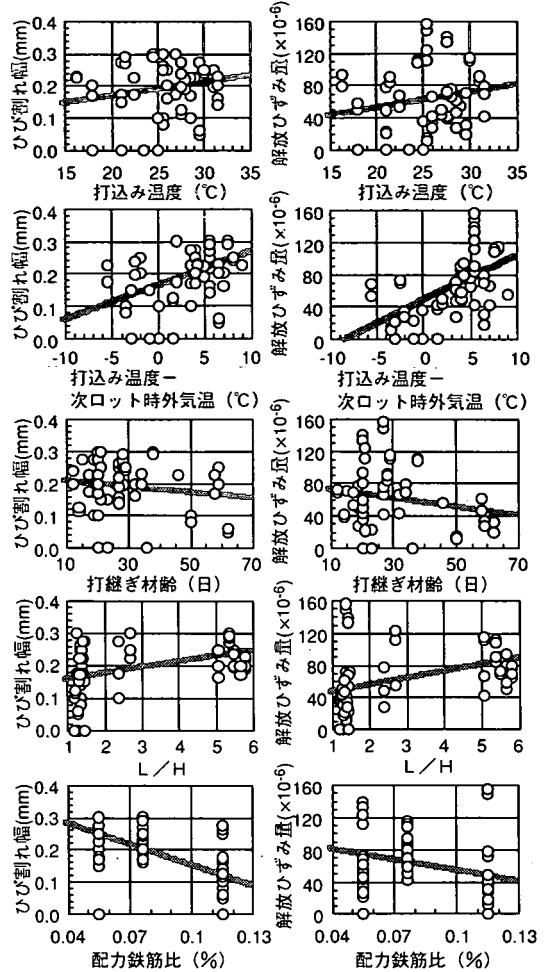


図-17 各ロットの要因が解放ひずみ量と平均ひび割れ幅に及ぼす影響

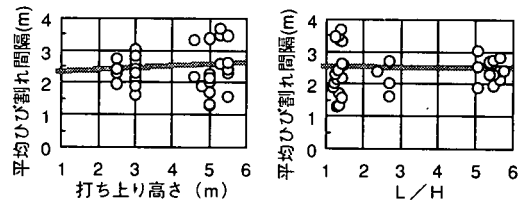


図-18 打上がり高さで平均ひび割れ間隔の関係

解放ひずみ量＝

ひび割れの発生に寄与する温度差×熱膨張係数
×拘束度×ひび割れ解放率

(1)

平均ひび割れ幅＝総ひび割れ幅／ひび割れ本数

ここで、総ひび割れ幅＝解放ひずみ量×部材長

(2)

平均ひび割れ間隔＝部材長／（ひび割れ本数＋1）

(3)

ここで、打込み温度、打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差および打継ぎ材齢はひび割れの発生に寄与する温度差に関係する指標となる。すな

表-12 重回帰分析結果一覧

目的変数 Y	重相関 係数	項目	K0	X1	X2	X3	X4	X5	X6
			切片	打込み 温度 (°C)	打込み温度 -次ロット 時外気温(°C)	次ロット までの打継 材齢 (日)	壁長/ 打上り高さ (L/H)	配力 鉄筋比 (%)	表面 熱伝達率 (W/(m ² C))
解放 ひずみ量 (10 ⁶)	0.69**	単相関	—	0.20	0.56**	0.18	0.41**	0.34**	0.11
		t 値	0.93	0.97	3.36	-1.70	0.90	-2.42	1.21
		係数K	42.3	1.16	4.71	-0.571	2.64	-391	3.52
平均 ひび割れ幅 (mm)	0.71**	単相関	—	0.18	0.41**	0.12	0.35**	0.59**	0.03
		t 値	2.56	0.83	2.65	-1.37	-0.16	-5.42	0.66
		係数K	0.279	0.00237	0.00883	-0.00109	-0.00112	-2.09	0.00453
最大 ひび割れ幅 (mm)	0.76**	単相関	—	0.24	0.40**	0.16	0.51**	0.61**	0.09
		t 値	1.66	1.96	1.61	-1.72	1.73	-5.13	0.47
		係数K	0.214	0.00664	0.00638	-0.00160	0.0144	-2.35	0.00384
平均ひび 割れ間隔 (m)	0.67**	単相関	—	0.28	0.45**	0.19	0.03	0.28*	0.27*
		t 値	5.39	-1.79	-2.72	1.91	-0.12	-2.63	-1.08
		係数K	3.98	-0.0344	-0.0610	0.0105	-0.0058	-7.03	-0.0534

**有意水準99%で有意、*有意水準95%で有意 Y=K0+K1X1+K2X2+K3X3+K4X4+K5X5+K6X6
ハッチング部は寄与度が比較的大きい要因を示す

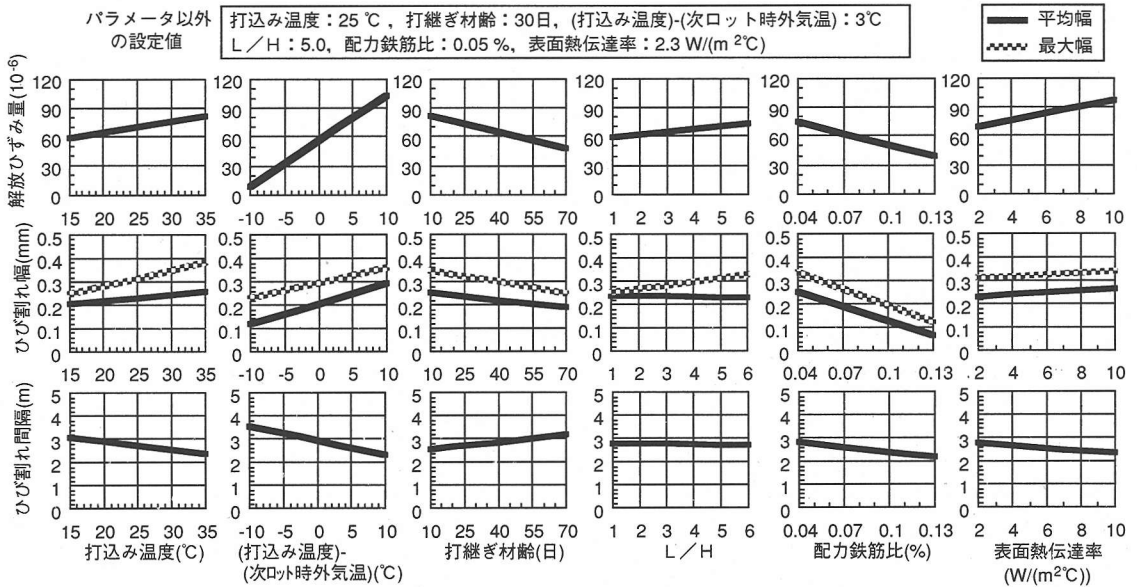


図-19 各ロットの要因が解放ひずみ量，ひび割れ幅とひび割れ間隔に及ぼす影響

わち，打込み温度が高ければ構造体の最高温度も大きくなり，次ロット打設時までに外気温が低下すれば部材の温度降下の程度が大きくなる。また，打継ぎ材齢が長くなる場合にも最高温度からの温度降下量が大きくなる傾向が生じるものである。

拘束度は打設ロットの下層ロットとの構造形状の比と剛性比により定まるが，ここでは上下ロットは同等なコンクリートを打継ぐので，構造形状の要因が大きいと推察しL/Hが代表的な指標と考えた。一方，配力鉄筋比はひび割れ解放率に影響を及ぼす

一つの要因であると考えられる。

各要因が温度ひび割れの発生状態に及ぼす影響を個別にみれば，打込み温度や打継ぎ材齢，L/Hの影響があまり大きくないように見えるのに対して，打込み温度と次ロット打込み時の外気温の差が大きいほどひび割れ幅と解放ひずみ量とが大きくなる傾向が見受けられる。また配力鉄筋量が大きければひび割れ幅が小さくなる傾向が顕著である。ひび割れ間隔は打ち上り高さやL/Hにあまり関係せずに平均で2.5m程度(1.0~3.5mの範囲)となった。

各ロットにおける構造要因と施工要因は非常に複雑に組み合わされているので、これら相互の影響を考慮するため、ロットの打込み温度・打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差・打継ぎ材齢・拘束度指標 L/H ・配力鉄筋比・型枠面における表面熱伝達率を説明変数とした重回帰分析を行なった。

型枠面における表面熱伝達率は、保温型枠による表面養生対策を行なったロットと通常の型枠を使用したロットの差異を考慮したもので、実測の温度の測定結果から熱伝導の逆解析によって得た表面熱伝達率（木製型枠： $5.8W/(m^2\cdot C)$ ，保温型枠： $2.3W/(m^2\cdot C)$ ）を使用した。

解放ひずみ量・平均ひび割れ幅・最大ひび割れ幅・平均ひび割れ間隔の4つの目的変数に対して算定した打込み温度・打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差・打継ぎ材齢・ L/H ・配力鉄筋比・ひび割れ間隔・表面熱伝達率の各説明変数の重相関係数、単相関係数、 t 検定値、線形重回帰モデルの切片と係数の値を表-12に示す。また、線形重回帰モデルの切片と係数により計算される解放ひずみ量、平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅および平均ひび割れ間隔を各説明変数との関係として図-19に示す。

単相関係数で評価すると、打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差と解放ひずみ量、 L/H と最大ひび割れ幅、配力鉄筋比とひび割れ幅(平均・最大)との関係に若干の大きめの相関（相関係数0.5以上）がみられるだけであるが、重相関係数を算出した場合にはいずれの目的変数に対しても0.7程度の相関が認められるようになる。また目的変数に対する各説明変数の影響を寄与度の大小（ t 検定値の大小）から相対的に明らかにすることができるようになる。

たとえば、図-16においては打込み温度の影響があまり大きくないように見えたが、重回帰分析の結果からは、打込み温度が最大ひび割れ幅とひび割れ間隔に及ぼす影響が認められた。打込み温度が大きいほど幅の大きいひび割れが数多く（ひび割れ間隔が小さく）発生する傾向が示された。一方、打込み温度と次ロット打込み時の外気温との差は、解放ひずみ量、平均ひび割れ幅、ひび割れ間隔に大きい影響を与えることが認められた。次ロット打設までの外気温の低下が大きいほどひび割れの幅は大きくひび割れ間隔は小さくなる。

L/H はひび割れ間隔や平均ひび割れ幅に対しては、影響が小さいが、最大ひび割れ幅に対してはあ

る程度の影響を与えるという特徴を示した。

配力鉄筋比は全てのひび割れ指標に対する寄与度が大きく、特に解放ひずみ量は配力鉄筋比が大きくなるにしたがって著しく小さくなる。鉄筋量が多い時には1本ごとのひび割れ幅が抑制されるがその分本数が多く（ひび割れ幅が小さくなる）なるという一般的な鉄筋によるひび割れ制御の特徴が確認された。

普通型枠と保温型枠との表面熱伝達率の相違はわずか（ 5.8 と $2.3W/(m^2\cdot C)$ ）ではあるが、解放ひずみ量とひび割れ間隔にある程度の寄与が認められ、表面熱伝達率が小さいほどひび割れ本数が少なく（間隔は大きく）なった。したがって、保温型枠による養生対策の付加も解放ひずみ量の抑制にある程度の効果はあったものと推察される。

平均ひび割れ間隔への影響では切片の項の寄与度が一番大きくなっている。これは温度ひび割れの場合、構造形状などからひび割れのピッチがある程度決ってしまうという一般的傾向の表われと考えられるが、本構造物では L/H の影響は認められなかった。

一般に壁状構造物に外部拘束によって発生する温度ひび割れでは、 L/H が大きく（壁が長く）なれば変形の拘束度が大きくなり解放ひずみもそれだけ大きくなるのが一般的であり、また、打込温度が大きく打継ぎ材齢が長くなればひび割れの程度が大きくなる傾向にある。しかし、本構造物ではこのような傾向は顕著には認められず、配力鉄筋比の影響および構造体温度と外気温の差の影響が大きい。

構造物のひび割れ発生状況からも、橋脚のひび割れは温度応力に起因する表面ひび割れであることが推察されていた。また4.(2)b)に示すように温度上昇期には表面応力が卓越するのが本橋脚での応力発生傾向であり、配力鉄筋比や表面熱伝達率を含めた外気温要因の影響が大きいことを考え合わせると、本構造物に発生したひび割れは内部拘束作用が卓越する表面ひび割れが主体であったと推察される。

本構造物の温度ひび割れ対策としては、低発熱セメントの使用に加えて保温型枠による放熱量制御を実施した。保温型枠の使用による解放ひずみ量の抑制効果はある程度認められたものの、ひび割れ幅の抑制という観点からは、配力鉄筋比の増大がもっとも直接的な効果があることが明らかとなった。

6.まとめ

厳しい海洋環境下において100年の耐用年限を要求される重要構造物であるコンクリート海中橋脚構造についての耐久性設計を行なった。特にアルカリ骨材反応の抑制対策およびマスコンクリート施工に対応した温度ひび割れ制御については詳細な調査・検討を実施した。その結果を以下に示す。

1) 本構造物の建設地周辺地域の既設構造物においては一部の構造物にアルカリ骨材反応が生じており、微小石英や絹雲母などの鉱物を含む硬質砂岩が原因となっている。建設地周辺地域の生コンクリート工場で使用している骨材には同種の岩質のものが多く使用されており、アルカリ骨材反応性試験で無害と判定され通常の構造物に使用しても問題ないとされるものであっても、高アルカリ環境になる場合には異常膨張を示す可能性があることが明らかとなった。したがって、外部から浸透する塩化物(NaCl)によって高アルカリ環境になることを想定される本構造物にこれらの骨材を使用する場合には、何らかのアルカリ骨材反応防止対策を講ずる必要があるものと判断された。

2) 高アルカリ環境下で供用される本構造物におけるアルカリ骨材反応防止対策として、高炉スラグ微粉末の使用をコンクリートパー法により検討したところ、高炉スラグ微粉末の置換率を50%とすれば、高アルカリ環境下においてもアルカリ骨材反応が抑制されることが確認された。

3) 2) の結果をふまえ、本構造物の設計耐用年限100年の耐久性は、第1種防食法(かぶり105mm以上、ひび割れ幅の最大値0.2mm、高炉セメントB種(高炉スラグ微粉末置換率50%以上)を使用した海洋コンクリート配合)により確保するものとした。

4) 工事計画段階で、温度応力事前解析を行ない、低熱ポルトランドセメントと比表面積の大きい(6000cm²/g)高炉スラグ微粉末を組み合わせた発熱の小さいタイプの高炉セメントB種によるコンクリートの発熱量の低減対策と断熱材を使用した保温型枠による放熱量の制御対策とを選定することによって、感潮帯では1.0以上、感潮帯以外では0.7以上の温度ひび割れ指数を確保し、温度ひび割れ幅を0.1~0.3mmの範囲に制御した。また、ひび割れ幅が0.2mmを超えて発生するものについてはエポキシ樹脂による注入補修を行なう計画とした。

5) 実際の構造物の温度履歴は事前解析結果とほぼ

同等となり、計画どおりの温度制御がおおむね達成された。橋脚には温度応力による表面ひび割れと考えられるひび割れが発生したが、その幅は事前予測と同等かそれ以下のものとなった。

6) ひび割れ幅とひび割れ間隔に対する影響要因を分析したところ、本構造物のひび割れの発生には配力鉄筋比の影響および構造体温度と外気温の差の影響が大きいことが明らかとなった。保温型枠の使用による表面放熱量の制御対策による解放ひずみ量の抑制効果もある程度認められたものの、ひび割れ幅の抑制という観点からは、配力鉄筋比の増大がもっとも直接的な効果があることが明らかとなった。

本報告による耐久性設計・温度ひび割れ制御計画を適用して橋脚工事として最初に工事を行なった6橋脚(10P~15P)は1999年3月に完成し、現在は他橋脚についての工事が進められている。10P橋脚には、事前解析との比較を行なうため、各種計器を設置し温度応力計測を実施しており、この結果については別途報告する予定である。

本報告は、新北九州空港連絡橋設計・施工委員会コンクリート部会(部会長松下博通)における審議内容をまとめたものである。本部会では、さらに、供用期間における確実な耐久性および機能の確保を目的として、本構造物に独自の維持管理計画(「新北九州空港連絡橋維持管理指針(案)」)を策定し、モニタリング機器の種類や設置位置等についての検討も進めている。

参考文献

- 1) 松下博通, 田口松義, 堀切忠久, 龍良平: 新北九州空港連絡橋コンクリート橋脚の耐久性設計および維持管理計画, コンクリート工学, Vol.37, No.10, pp.34~39, 1999.
- 2) 添田政司, 大和竹史, 松下博通, 笠井春生, 柳健太郎, 異常ひびわれを生じたコンクリート構造物の診断と骨材調査, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp.223~228, 1998.
- 3) コンクリート工学協会: 鉄筋コンクリートの耐久性設計に関する考え方, 1991.5.
- 4) コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)-改訂版-, 1990.3.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編)[平成8年制定], 1996.3.
- 6) 望月美知秋, 高屋敷光男, 寺沢進, 中山肇, 大友健, 低発熱ポルトランドセメントを使用した大規模立坑の建設工事-首都圏外郭放水路立坑新設工事-, コンクリート工学, Vol.34, No.6, pp.39~51, 1996.
- 7) 大津政康, 松下博通, 萩尾政男, 龍良平, 柳健太郎,

DURABILITY DESIGN AND THERMAL CRACKING CONTROL OF CONCRETE PIERS OF SHIN-KITA-KYUSHU AIRPORT BRIDGE

Hiromichi MATSUSHITA, Tetsuo HARADA, Masashi SOEDA, Ryohei RYU
and Toyohisa YOSHITAKE

Durability design and thermal cracking control were investigated for bridge piers to be exposed to seawater. It was found that coarse aggregate judged as innocuous by alkali-aggregate reactivity tests might abnormally expand in a highly alkaline environment and that an inclusion of granulated blast-furnace slag at a replacement ratio of 50% inhibits such a reaction. Concrete made of low-heat cement and granulated blast-furnace slag achieved I_{cr} of not less than 1.0, and 0.7 in the tidal, and atmospheric zones, respectively, and limited the crack width to between 0.1 and 0.3 mm. It was also found that crack width and intervals depend on the transverse reinforcement ratio and difference between the structure temperature and the air temperature.