

杭基礎フーチングの温度応力に関する現場計測と解析

大阪第二建設部 池田工事事務所 橋本良之
同 部 同 所 今田康博
工務部 設計課 中林正司

要 約

土木学会「コンクリート標準示方書・施工編」が昭和61年度に改訂されたが、そのなかでとくにマスコンクリートに関する条項が大幅に変更になり、温度応力に起因するひびわれに対する規定が詳しく述べられるところとなった。これによると、通常規模のフーチング等、橋梁下部構造におけるかなりのコンクリート構造物の設計・施工において温度ひびわれについての検討が要求される可能性も考えられる。本報告は猪名川第1橋梁の固定脚（IV P-2 橋脚）の大規模フーチングを対象として実施したコンクリートの物性値試験と現場計測ならびにこれに対する解析結果について報告するとともに、公団のコンクリート構造物の施工に際しての示方書の規定の適用性について考察するものである。

はじめに

土木学会「コンクリート標準示方書・施工編」（以下、示方書と略記）の改訂により通常規模のフーチングの施工に対して温度ひびわれの検討が必要となる可能性があるが、公団としては従来このような構造物の施工を行なっており、特別な原因による場合を除いては有害なひびわれを生じていないと考えられている。しかし、これらの実状のとりまとめはなされておらず、示方書の規定に対する明確な判断根拠があるとは必ずしもいえない。したがって、公団のコンクリート構造物の施工にあたり示方書の規定の適用性の検討を行い、また温度ひびわれの検討を実施する場合の設計・施工上の問題点を明らかにしたうえで、その対応策を検討する必要がある。

本報告はそれらのうち示方書の規定の適用性について検討を行いその結果についてとりまとめたものである。

1 対象構造物の概要

計測の対象とした猪名川第1橋梁のIV P-2 橋脚の構造一般図を図-1に示す。IV P-2 橋脚は場所打ち杭基礎により支持されたフーチング部が33.0m（幅）×25.5m（奥行き）×4.5m（高さ）の外形寸法を有する大規模なものであり、橋脚柱部は4.7m×12.0mの小判型断面を持った壁式構造物である。

本橋脚のコンクリートは、事前に行なわれた予

備解析による温度ひびわれへの配慮および現場条件から、フーチング部5リフト、柱部3リフトの合計8リフトに分割打設された。

使用コンクリートの種別はフーチング部（RB244B）と橋脚躯体部（RF272B）で異なっており、それらの配合を表-1に示す。

2 計測概要

現場計測においては温度計・ひずみ計を代表的なリフトに合計17ヶ所設置し、そのうち主要点には、有効応力計・無応力計をもとに設置した。ひずみ計・応力計の設置方向はフーチング、橋脚ともに基本的に長辺方向かつ水平方向に配置した。

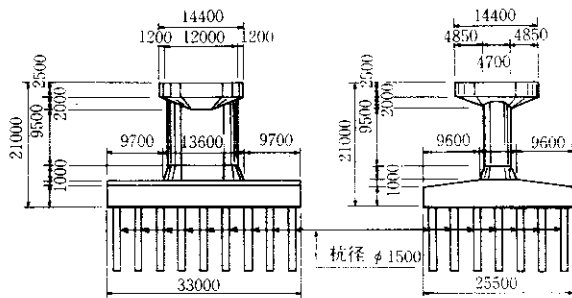


図-1 構造一般図

表-1 コンクリート配合

	スランブ (cm)	s/a (%)	w/c (%)	単位重量 (㎏/㎥)			
				W	C	S	G
フーチング	8	4	54	137	291	724	1147
橋脚躯体	8	4	47	165	351	773	1015

表-2 断熱温度上昇特性比較一覧表

	練り上がり 温度 T _γ [°C]	Q(t)=Q _∞ [1-exp(-γt)]			
		試験結果		コンクリート標準示方書	
		Q _∞ [°C]	γ [1/day]	Q _∞ [°C]	γ [1/day]
フーチング (高炉B)	12.6	45.8	0.58	39.4	0.52
	19.8	45.3	0.70	38.5	0.82
橋脚躯体 (ワイドッシュ)	29.9	43.6	1.15	37.2	1.24
	10.3	47.8	0.58	46.2	0.44
	20.5	47.1	0.83	44.4	0.88
	30.4	46.5	1.25	42.7	1.31

また物性値試験として断熱温度上昇試験および初期材令時に着目した各種強度試験を実施した。

3 コンクリートの物性値試験結果

3-1 強度試験結果

コンクリートの圧縮強度・引張強度・弾性係数の試験結果を示方書による強度推定式による推定値と比較して図-2に示す。

図-2によると、コンクリートの圧縮強度・引張強度の試験値は比較的若材令時において示方書による推定値より低い値となっている。コンクリートの内部発熱温度のピークは一般的にコンクリート打設後2~3日程度であり、この間内部拘束応力が支配的となる温度ひびわれが検討の対象となるが、この時点において示方書による推定式で引張強度を評価した場合温度ひびわれに対して危険側となる恐れがある。材令が進むにつれて示方書による推定式は試験値に適合するようになっているから、コンクリートの温度降下時に問題となる外部拘束応力による温度ひびわれに対して示方書による推定式により引張強度を評価することは概ね妥当であると考えられる。次に弾性係数の試験値は多少ばらつきはあるものの示方書による推定値と比較的によく一致している。しかし、示方書による推定値はコンクリートのクリープ・リラクセーションを考慮した有効ヤング係数としていることから、推定値は試験値より低目の値を与えるべきものである。従って今回の結果示方書により弾性係数を推定することは実際よりも高目の値を与える恐れがある。

3-2 断熱温度上昇試験結果

断熱温度上昇試験は、打ち込み温度の違いによる特性の差を見るため、10, 20, 30℃の練り上がり温度を目標としてフーチングおよび躯体コンクリートのそれぞれにつき各3ケースの試験を行なった。試験結果と示方書に基づく断熱温度上昇特性値とを比較して表-2に示す。

表-2によると温度上昇速度に関する定数γについては示方書による推定値と試験値とがほぼ一

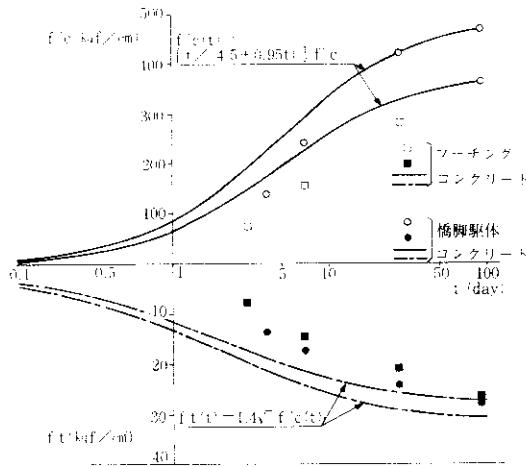


図-2 (a) 圧縮・引張強度

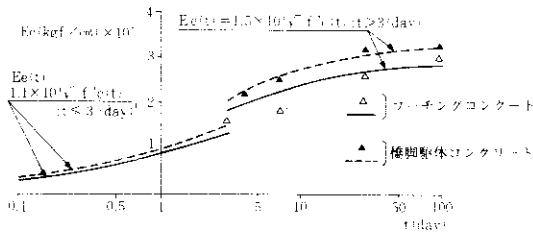


図-2 (b) 弾性係数

致していることがわかる。一方、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} の試験値は示方書による推定値を全般的に上回る結果となっている。断熱温度上昇特性)(とくに終局断熱温度上昇量)は打設コンクリートの温度および温度応力を推定するにあたり直接的に影響を及ぼす因子であり、その評価には慎重な取扱が必要であると考えられる。

4 温度および温度応力解析

4-1 解析手法および諸条件

示方書に基づき以下に示す手法により温度および温度応力解析を行なった。

温度解析 : 2次元FEM解析

温度応力解析 : Compensation Plane 法(CPM)

コンクリートの物性値等には、基本的には示方書に示された値や関係式等を用いたが、断熱温度

上昇式のパラメータ(Q_{∞} , γ)は試験結果によっている。CPMによる解析では、拘束体が非拘束体(フォーチング)を拘束する効果を外部拘束係数により表現することになっているが、示方書によると拘束体が杭の場合の外部拘束係数の設定方法は明確に示されていない。そこで今回の解析では拘束体と非拘束体のヤング係数比を $E_c/E_t \gg 1$ と想定して示方書の外部拘束係数同定の図より外挿して次のように設定した。

$$R_N = 0.01$$

$$R_M = 0.7 (\Delta \phi \text{の符号反転前})$$

$$R_M = 1.1 (\Delta \phi \text{の符号反転後})$$

ここに R_N : 軸拘束係数

R_M : 曲げ拘束係数

その他解析に用いた諸定数を表-3に示す。

表-3 コンクリートの熱的性質

	T_{00} (°C)	Q_{∞} (°C)	γ (1/day)	比熱 C (kcal/hr kg/°C)	熱伝導率 A (kcal/hr m/°C)	密度 ρ (t/m³)	熱膨張率 a (1/°C)
第1リフト	12.5	45.8	0.57	0.28 (kcal/hr kg/°C)	2.3 (kcal/hr m/°C)	2.3 (t/m³)	10×10^{-6} (1/°C)
第2リフト	12.5	45.8	0.57				
第3リフト	12.9	45.7	0.59				
第4リフト	12.5	45.8	0.57				
第5リフト	12.2	45.8	0.56				
第6リフト	16.6	46.7	0.95				
第7リフト	26.5	46.0	1.08				
第8リフト	36.4	45.4	1.50				

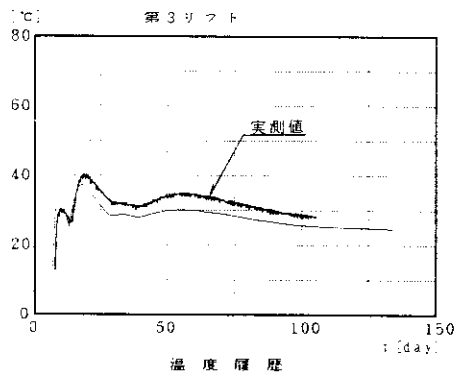


図-3 温度履歴図

4-2 温度および温度応力解析結果

解析値と実測値との比較例としてフォーチング中心におけるリフト3の温度履歴図および温度応力履歴図を図-3, 4に示す。図-3によると温度の実測値は材令11日で40.5°Cのピーク値(解析

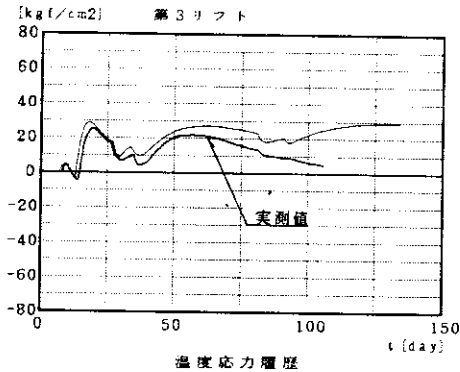


図-4 温度応力履歴図

値：材令11日、温度 37.3℃）を示している。実測値と解析値との対応は良好であり、両者の差は5℃以下である。次に図-4より、コンクリート内に生じる温度応力は温度上昇期に圧縮応力となり以後温度降下に伴い引張応力へと移行していく傾向を示している。実測値と解析値とを比較すると、両者は全般的によく合致しており、最大圧縮応力度では実測値の 25.4kgf/cm²に対してCPMでは 28.9kgf/cm²を与えている。このように本例では解析値が実測値をかなりの精度で推定できていることがわかる。他の位置での比較でも両者は概ね良好な一致性を示した。また各ブロック毎に打設後にひびわれ観察を行ったが、いずれのブロックも温度応力に起因すると考えられる有害なひびわれの発生は認められなかった。これは、解析に基づく「温度ひびわれ指数」が1.2をほぼ下回らなかったこととも対応している。

以上解析結果より①CPMはコンクリートの熱特性環境条件が正確に評価されたならば、温度ひびわれの推定に対して有効な手法となり得る、②リフト割など施工条件の配慮により大規模マスコンクリートの温度ひびわれの抑制にかなりの対処が可能であることがあらためて確認された。なお、今回の基礎形式が杭基礎であることが温度ひびわれの発生に対して有利に働いたと考えられるが、CPM適用の際には外部拘束係数の評価も重要な事項であり、このような基礎形式に対する外部拘束係数の同定が今後の課題である。

5 標準的なフーチングの温度ひびわれ制御についての検討

5-1 対象構造物

対象構造物として公団の代表的なマスコンクリート構造物であるフーチングに着目し、形状寸法は標準的のものとするために公団標準設計T型橋脚の場所打ち杭基礎により支持されたフーチング部（14.25m×14.25×3.0m）とする（図-5）。また使用コンクリートも公団標準使用のものとした。

5-2 解析手法および諸条件

示方書に基づき1次元差分法による温度解析、Compensation lion法（CLM）による温度応力解析を行い、さらに温度ひびわれ指数の算定を行った。なお、コンクリートの物性値等は、基本的に示方書に示された値や関係式等を用いている。解析に用いた諸定数を表-4に示す。

解析ケースとして次のような条件を設定した。

- | | |
|---------|-----------------------------------|
| ①打設時期 | 夏場打設（外気温最高時）
冬場打設（外気温最低時） |
| ②打設ブロック | 1ブロック打設
2ブロック分割打設
3ブロック分割打設 |
| ③ヤング係数比 | EC/Er >> 1 |

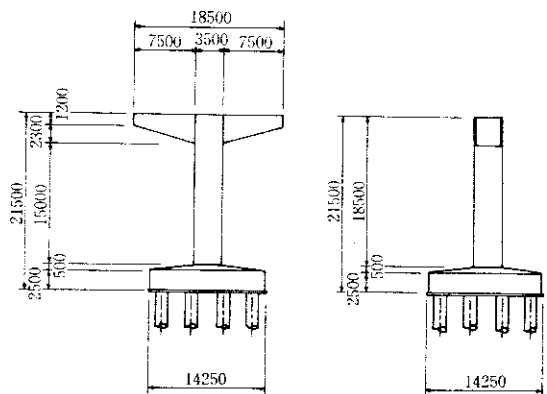


図-5 T型橋脚構造一般図

表-4 コンクリートの熱的性質

	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	γ (1/day)	比熱 C	熱伝導率 λ	密度 ρ	熱膨張率 α
夏場打設	28.0	38.0	1.15	$\frac{0.28}{\text{cal}/\text{kg}/\text{C}}$	$\frac{2.3}{\text{kcal}/\text{hr}/\text{m}/\text{C}}$	2.3 (t/m^3)	10×10 ($1/\text{C}$)
冬場打設	10.0	42.8	0.41				

5-3 温度および温度応力解析結果

解析結果として図-6に温度履歴、図-7に温度応力履歴を示す。

夏場打設 図-6によると、1ブロック打設でのピーク温度は約 65°C であるが2ブロックに分割打設することによりピーク温度が約 5°C 低下し、さらに3ブロックに分割打設すると約 10°C 低下している。また内部拘束応力の発生原因である各ブロック内での内部温度差は分割打設することにより減少している。次に応力履歴であるが、1ブロック打設では分割打設した場合よりブロック内での内部温度差が大きいため内部拘束が支配的な初期材令時に約 $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ の引張応力を生じている。一方、分割打設した場合は初期材令時に生じる内部温度差が減少したため内部拘束による引張応力は減少したが、外部拘束が支配的である高材令時で約 $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ の引張応力を生じ、1ブロック打設での最大引張応力を上回る結果となった。

温度ひびわれ指数は各ケースとも概ね1.2を下回ることがなかった。以上のことから、夏場における分割打設はピーク温度の抑制には当然有効であるが、ブロック間の温度差による引張応力発生の面で必ずしも有効にはならないようである。なお、ひびわれ指数の面からみるとこのような寸法のフーチングに対する温度ひびわれの検討の必要性はあまり高くないようである。

冬場打設 温度および温度応力履歴は共に夏場打設とほぼ同様な傾向がみられる。ただし温度履歴の場合夏場打設よりピーク温度は低く、また外気温が低いためコンクリート内部での温度差が大きくなっている。特に1ブロック打設の場合ピーク温度時には約 20°C の内部温度差を生じている。応力履歴の場合は、1ブロック打設では内部温度

差が夏場打設に比べて大きい初期材令時にフーチング表面付近において約 $23\text{kgf}/\text{cm}^2$ の引張応力を生じている。夏場打設と同様に分割打設することにより初期材令時での引張応力は減少し、外部拘束が支配的である高材令時での引張応力が増大する結果となったが、夏場打設のように分割打設時の最大引張応力が1ブロック打設での最大引張応力を上回ることにはなかった。温度ひびわれ指数は分割打設することにより徐々に大きくなっている。特にフーチング表面付近において1ブロック打設時にひびわれ指数の最小値0.9であったが2ブロック打設時に1.2、3ブロック打設時には1.5となっている。以上のことから、冬場における分割打設は温度ひびわれ制御に有効に働くものと考えられる。また1ブロック打設においてひびわれ指数が1.0を下回っていることから、夏場と同じ構造寸法のフーチングであっても冬場においては環境条件の違いにより温度ひびわれの検討が必要であることが確認された。

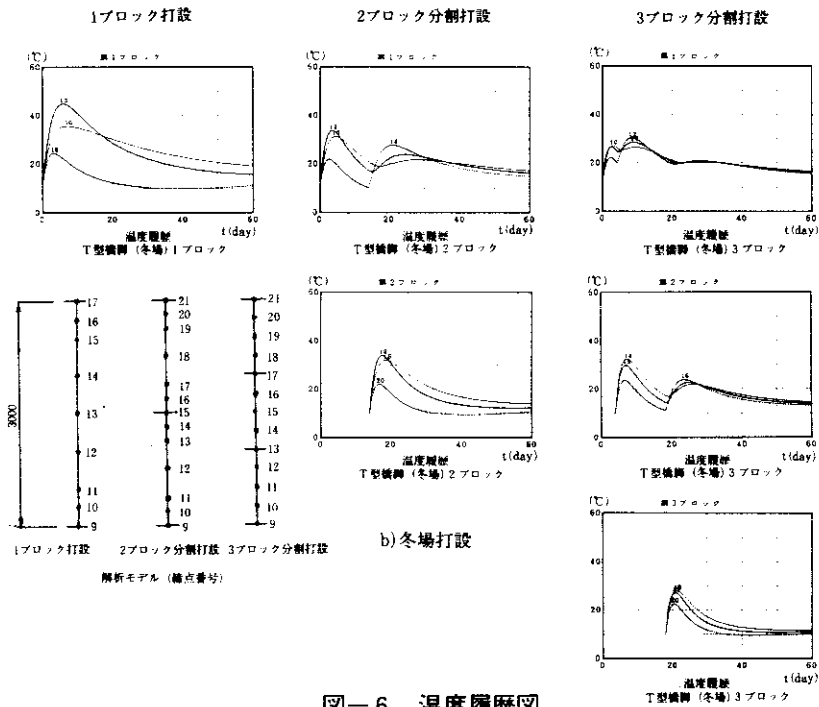
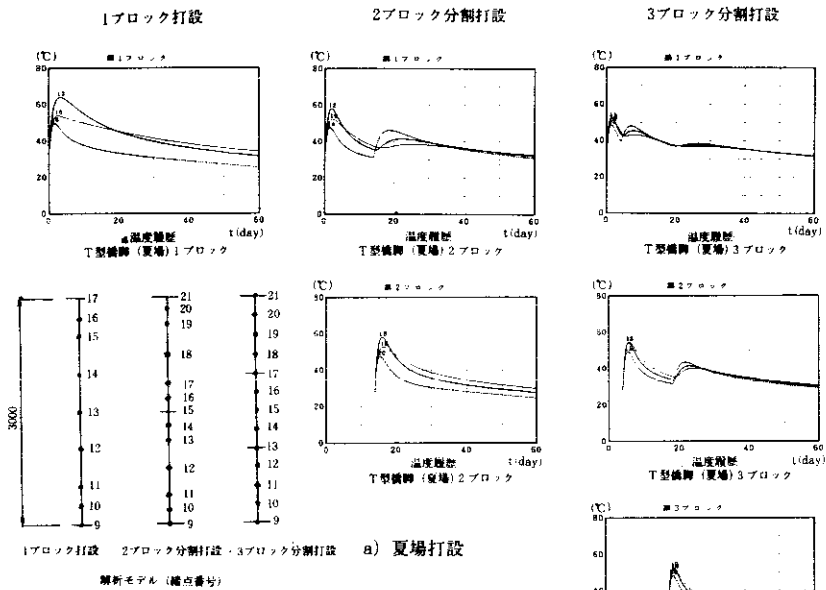
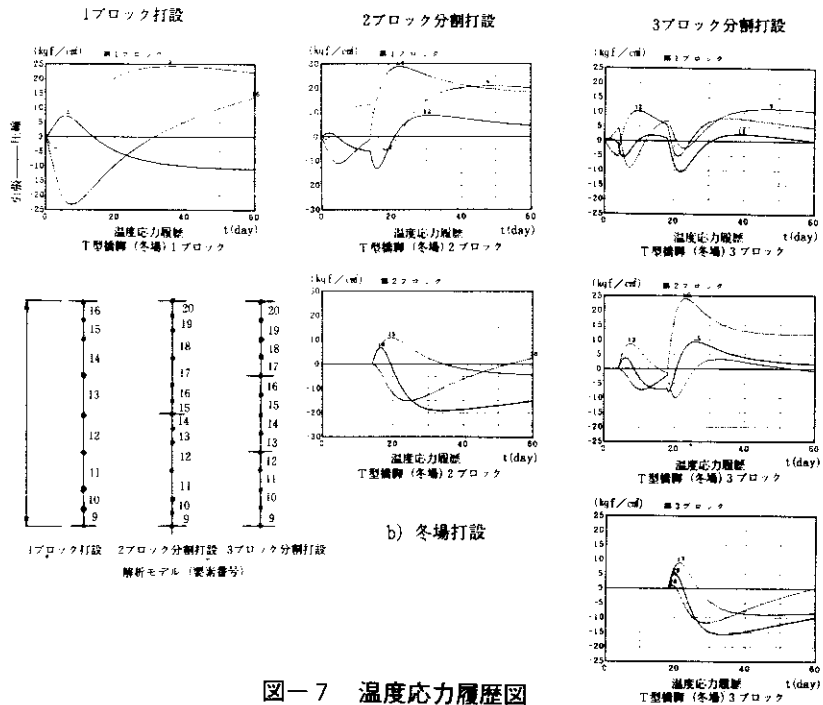
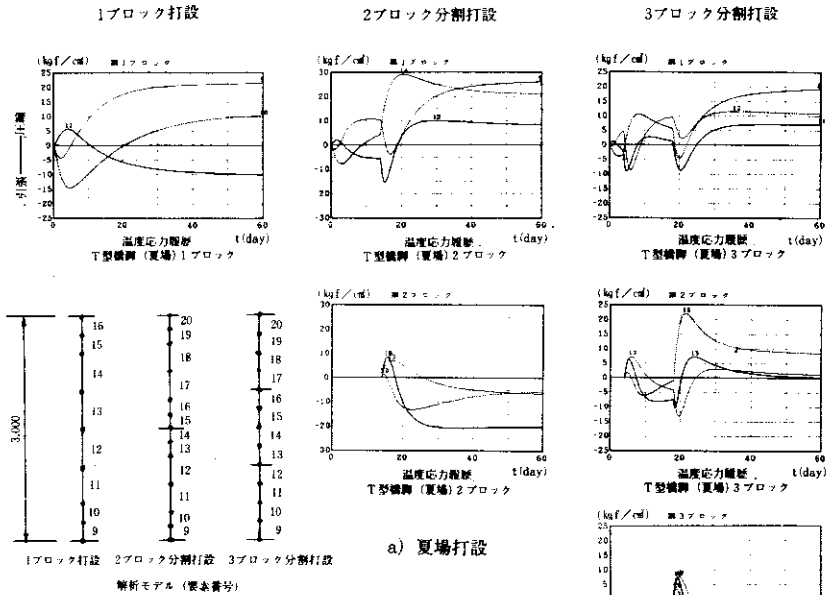


図-6 温度履歴図



図一七 温度応力履歴図

6 まとめ

今回杭基礎フーチングおよび橋脚柱躯体コンクリートに対する温度・温度応力の現場計測ならびに物性値試験を実施し、これに対比して示方書に従って温度および温度応力解析を行なった。また公団の標準的な杭基礎フーチングに対しても同様に示方書に従い温度および温度応力解析を行なった。以上の検討結果を総合的に判断し、公団における代表的な基礎形式である杭基礎系のフーチングに対する温度ひびわれの検討の必要性について現時点で指摘し得る事項を次に示す。

温度解析について

今回の2次元FEM温度解析結果は、実測値をほぼ的確に捉えることができた。これは、熱伝達境界における修正熱伝達率(η)を1次元差分法による温度解析によりキャリブレーションを行い決定したこと、断熱温度上昇特性(Q_{∞}, γ)を試験結果により設定したことが要因であると考えられる。よってこのようなフーチング・橋脚系の構造物に対して断熱温度上昇特性(Q_{∞}, γ)および熱伝達境界条件の設定が適切であれば2次元FEM解析により実用上十分な温度の推定が可能である。

温度応力解析について

Compensation Plane法はコンクリートの熱特性環境条件が正確に評価されたならば、温度ひびわれの推定に対して有効な手法になり得ることがあらためて確認された。

公団の標準的な杭基礎フーチングの温度ひびわれ制御について

公団の標準的な杭基礎フーチングに対して打設時期およびブロック割りをパラメータとして解析を行なった結果、冬場打設の場合温度ひびわれの抑制に対して分割打設は有効に働くことが確認されたが、夏場打設の場合の分割打設の有効性は認められなかった。また今回対象とした構造寸法を有するようなフーチングに対しては、冬場打設の場合温度ひびわれの検討の必要性も認められたが、夏場打設の場合認められなかった。しかし、杭基

礎系の外部拘束係数は小さいといわれながらもその定量的な値は不明であること、またコンクリート工事は現場での多様な施工条件の下で行なわれるため、このような検討結果をそのまま一般化するのには危険である。よって過去の実績および既往の文献・調査研究結果と併せて、総合的に判断することが望まれる。

参考文献

- 1) 大阪池田線(延伸部)マスコンクリート温度応力測定報告書、阪神高速道路公団大阪第二建設部、昭和63年7月。
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針、1986。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編、昭和61年版)、1986。