

大口径深礎杭の温度ひびわれ発生検討方法について

Evaluation of Thermal Crack Occurrence in Deep and Large-diameter Caisson Type Piles

今村 正孝* 石井 敬明**
Masataka Imamura Takaaki Ishii

土橋 吉輝*** 浅井 功****
Yoshiteru Dobashi Isao Asai

要 約

本研究は、大口径深礎杭に対する温度ひびわれ制御対策を検討する際に必要となる最高温度、最大温度差等の温度規制値算定に関して、有限要素法 (FEM) 等による温度応力解析を用いない簡易的な算定方法を提案する。本研究では、大口径深礎杭に関する温度ひびわれ発生の特性要因のうち、影響が大きいと考えられる杭径、杭長、地盤弾性係数等を抽出し、FEM によるパラメトリックスタディを行い、これらの特性要因が大口径深礎杭の温度ひびわれに及ぼす影響を T_d (基本温度差) および R (外部拘束の拘束度) を用いて定量的に把握した。すなわち、 T_d および R に関して、杭径、杭長および地盤弾性係数等を独立変数として、重回帰分析を行い、線形重回帰式を示した。

目 次

- § 1. まえがき
- § 2. 温度ひびわれ発生の検討
- § 3. 数値実験
- § 4. 簡易算定式に用いる T_d および R の検討
- § 5. 実施例に基づくコンクリート温度管理
- § 6. まとめ

§ 1. まえがき

近年、構造物が大型化して、マスコンクリートの温度ひびわれが設計・施工上重要な課題として取り上げられることが多くなった。これに伴い、温度ひびわれに関する研究も多く行われ、急速な進歩を遂げている。温度ひびわれが問題とされる理由は、機能性は別にして安全性からいえば、構造物の耐久性あるいは場合によっては耐

力に有害な影響を与えるためである。このため、できる限りひびわれの少ない構造物を造ることが要求されている。

一方、シンガポールにおいては、超高層ビルの基礎として大口径深礎杭を採用するケースが増えている。大口径深礎杭はマスコンクリートであり、温度ひびわれ発生の可能性が高い構造物である。また、深礎杭は土中にあるため、目視観察によってひびわれの有無やコンクリートの劣化度を把握できない状況にある。このため、大口径深礎杭の施工に際しては適切な温度ひびわれ制御対策を講じる必要がある。

本研究は、この大口径深礎杭の温度ひびわれ制御対策を検討する際に必要となる最高温度、最大温度差等の温度規制値算定に関して、FEM 等による温度応力解析を用いない簡易的な算定方法を提案する。簡易的な算定方法を明らかにするために数値実験を実施し、この結果を重回帰分析する手法を用いた。

また、本研究で得られた算定方法を、実工事に適用しその有効性を確認した。

以下に、大口径深礎杭の温度ひびわれ発生検討方法の

*海外事業部副事業部長
**シンガポール営業所設計課長
***技術研究所土木技術課係長
****技術研究所土木技術課

提案およびその適用例について述べる。

§ 2. 温度ひびわれ発生の検討

一般にマスコンクリートの温度ひびわれ発生に関する検討は、土木学会『コンクリート標準示方書・施工編』（以下、『示方書』とする）に基づいて行う。『示方書』によるとひびわれ発生の防止または発生位置やひびわれ幅の制御が必要とされる構造物については、使用材料、施工方法および環境条件などに基づく温度変化、温度応力の算定を行い、それに基づき温度ひびわれ指数を求め、ひびわれ発生の可能性を評価することになっている。ここで、温度ひびわれ指数 (TCI) とは、コンクリートの引張強度と引張応力の比で求められるものである。すなわち、次式で与えられる。

$$\text{温度ひびわれ指数 (TCI)} = f_t / \sigma_r \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 σ_r : 水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値

f_t : σ_r を算定した時刻におけるコンクリートの引張強度

この温度ひびわれ指数と温度ひびわれ発生の関係は、いくつかの実験および施工時の観測事例から、ひびわれの発生確率と温度ひびわれ指数の関係として整理されている。この関係から温度ひびわれ指数の目安が示されている。

すなわち、

ひびわれを防止したい場合	$TCI \geq 1.5$
ひびわれの発生を許すが、その幅および数を制限したい場合	$1.2 \leq TCI \leq 1.4$
上記以外の場合	$0.7 \leq TCI \leq 1.1$

である。

既往実績によらず解析的に大口径深礎杭の温度ひびわれ発生を検討する場合の温度ひびわれ発生検討フローを Fig.1 に示す。ここで、簡易式による指数の算定とは、温度解析結果から簡易的に温度ひびわれ指数を求める式で、『示方書』に次のように与えられている。

内部拘束応力が卓越する場合

$$TCI = 15 / \Delta T_i \dots\dots\dots(2)$$

外部拘束応力が卓越する場合

$$TCI = 10 / (R \cdot \Delta T_o) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 ΔT_i : 最高温度時の内外温度差 (°C)
 ΔT_o : 部材平均最高温度と外気温平衡

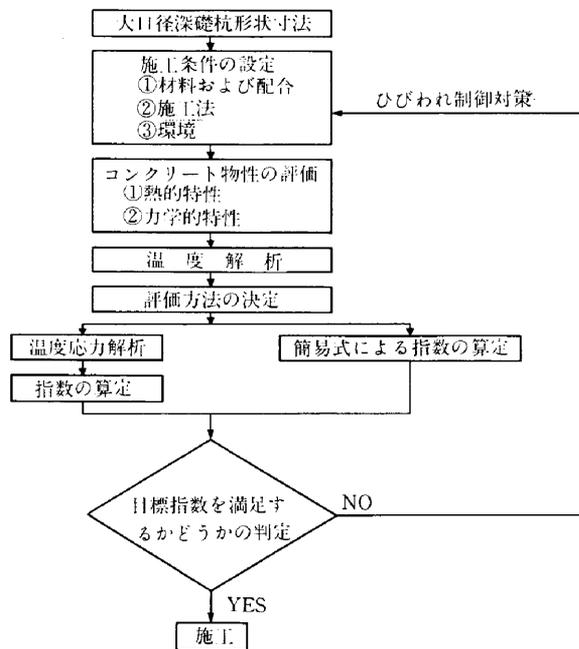


Fig.1 大口径深礎杭温度ひびわれ発生検討フロー

時温度との差 (°C)

R : 外部拘束の拘束度

これらの式はコンクリートの引張限界ひずみを 100×10^{-6} とし、スラブ、壁体のような構造物の温度分布および外部拘束を想定して導いたものである。目標とする温度ひびわれ指数を設定すれば、式(2)および式(3)を用いて最高温度、最大温度差等の温度規制値が得られる。

深礎杭のように全周が地盤あるいは岩盤に接している状態では、温度分布状態が異なり、外部拘束度の設定も難しい。そのため、このままではこれらの式の適用が困難である。すなわち、式(2)については、深礎杭の温度分布状態に基づいて新たに式を導く必要があり、式(3)については、深礎杭に対する外部拘束度の目安あるいは算定方法を与える必要がある。

これらの式を用いない場合は、Fig.1 で左側の流れに示した温度応力解析により温度ひびわれ指数を求めて評価を行う必要がある。

温度応力解析の方法には有限要素法 (FEM) やコンベンション法に代表される簡易法など各種の方法がある。ただし、簡易法は、スラブ、壁体等の構造物を対象とした方法で、大口径深礎杭には適用できない。大口径深礎杭の形状、境界条件等をある程度の精度で検討するには、一般に FEM 解析が有効である。

大口径深礎杭の温度応力解析に FEM を用いる場合、熱拡散状態が 2 次元であるため、温度解析モデルは深礎杭の一部を切出した部分モデルの採用が可能である。一

方、温度応力解析モデルは、部分モデルでは鉛直方向の境界条件の設定が難しいため、全体系モデルを用いる必要がある (Fig.2 参照)。一般に、温度解析モデルと温度応力解析モデルは同一のモデルを用いることから、温度解析モデルも全体系モデルを用いる必要がある。

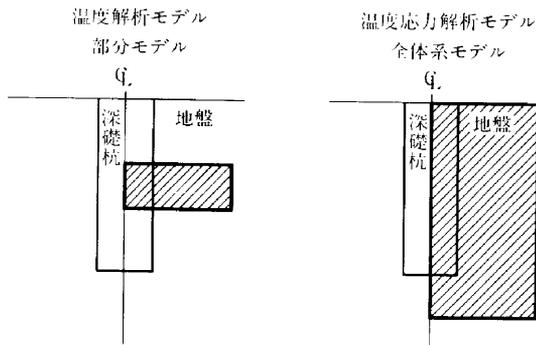


Fig.2 部分モデルと全体系モデル

近年は、パーソナルコンピュータに代表される小型コンピュータの発達により処理能力、計算速度等が向上し、小型コンピュータで FEM 解析を行う場合でもかなり大規模なモデルが取扱えるようになった。

しかし、コンクリートの発熱問題を対象とした温度応力解析は、非定常問題であるため、モデル (節点数、要素数) の大きさに比例して、計算時間が増大する。また、温度ひびわれ発生特性要因を考慮して、コンクリートの熱特性等の解析条件を変えた検討が必要なため、多くの検討ケースが必要になる。このことは、大口径深礎杭の場合、杭長が長くなるのに伴い、解析モデルも大きくなり、多大な計算時間を要することになる。

このため、できるだけ短時間で温度ひびわれ発生検討が行える手法が望ましい。

幸い、大口径深礎杭の場合、温度解析は前述したように杭長にかかわらず簡易的な部分モデルで差支えない。よって、この温度解析の結果で、例えば式(2)、式(3)を用いて温度ひびわれ発生判定が行うことができると、全体系モデルで解析する場合に比較してかなりの計算時間短縮が図れる。

以下に大口径深礎杭の各種条件を変更した数値実験によるパラメトリックスタディを行い、この可能性について検討する。

§ 3. 数値実験

大口径深礎杭の温度ひびわれ発生特性要因には設

計、配合、施工、環境、コンクリートの熱特性および力学特性などに関して数多くのものがある。これらの特性要因が温度ひびわれに及ぼす影響を定量的に把握することを目的として数値実験を行う。

3-1 実験概要

本数値実験では、大口径深礎杭に関する温度ひびわれ発生特性要因のうち主要と考えられる形状寸法、外部拘束度、単位セメント量等の要因を選び、発熱問題に関する実験因子とする。なお、セメントの種類による影響も大きいから、この影響は断熱温度上昇式の問題に帰着するため、単位セメント量で代表させ、セメントは普通ポルトランドセメントとする。

【実験因子】

【水準】

杭径 (m)	3, 5, 7
杭長 (m)	10, 25, 50
単位セメント量 (kg/m ³)	240, 270, 300
打込み温度 (°C)	15, 20, 25
地盤弾性係数 (tf/cm ²)	0.1, 1, 1.5, 2.5, 5, 10

これらの実験因子に基づいた実験ケースを Table 1 に示す。

温度解析に用いる断熱温度上昇式は、コンクリート打込み後のコンクリート内部の温度変化を解析するための基本的な式である。大口径深礎杭の場合、杭中心部はほぼ断熱状態であるから、解に最も影響を与えるものである。最近の研究では、『示方書』で与えられる断熱温度上昇式のうち終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、実際の値より 2~3 割低いことが報告されている。しかし、本研究では、割増しを行わないで『示方書』から求められる値を用いる。

また、温度応力解析において、若材令におけるコンクリートのクリープあるいはリラクセーションによる応力緩和の影響は大であり、これを考慮した解析が必要であるが、これらの定量的な評価手法は今日未だ流動的であり、確立されていないのが現状である。したがって、本研究では、『示方書』に示された簡易的にクリープおよびリラクセーションを評価する手法の一つである有効弾性係数法を用いる。同様に、解析に必要なコンクリートの熱伝導率、熱容量、弾性係数等の計算因子の水準は、基本的に『示方書』に示された値または式を用いる。計算因子および水準を Table 2 および Table 3 に示す。

解析モデルは軸対称 3 次元モデルとする。標準的な解析モデル (杭径 5 m、杭長 25 m) を Fig.3 に示す。解析期間は、杭径 3 m および 5 m のケースがコンクリート打込み後 300 日であり、杭径 7 m のケースが 500 日である。

Table 1 数値実験ケース

Case No.	杭長 (m)			杭径 (m)			地盤弾性係数 (tf/cm ²)					単位セメント量 (kg/m ³)			打込み温度 (°C)			
	10	25	50	3	5	7	0.1	1	1.5	2.5	5	10	240	270	300	15	20	25
1	○				○		○								○		○	
2	○				○			○							○		○	
3	○				○				○						○		○	
4	○				○					○					○		○	
5	○				○						○				○		○	
6	○				○							○			○		○	
7		○			○		○								○		○	
8		○			○			○							○		○	
9		○			○				○						○		○	
10		○			○					○					○		○	
11		○			○						○				○		○	
12		○			○							○			○		○	
13			○		○				○						○		○	
14			○		○						○				○		○	
15		○		○			○								○		○	
16		○		○				○							○		○	
17		○		○					○						○		○	
18		○		○						○					○		○	
19		○		○							○				○		○	
20		○		○								○			○		○	
21		○				○			○						○		○	
22		○				○					○				○		○	
23		○			○							○			○		○	
24		○			○								○		○		○	
25		○			○									○	○		○	
26		○			○										○			○

なお、数値実験を実施する際に、温度解析には FEM による非定常軸対称 3 次元熱伝導解析プログラムを、温度応力解析には、FEM および増分法による軸対称 3 次元温度応力解析プログラムを用いた。

3-2 実験結果

数値実験で得られた温度解析結果および温度応力解析結果 (温度びわれ指数) をそれぞれ Table 4 および Table 5 に示す。なお、温度びわれ指数で用いる座標系は、r (半径方向)、z (鉛直方向)、θ (円周方向) とする。また、Table 5 において、r、z 方向は杭中心部、θ 方向は杭外周部の値を示す。

温度履歴および応力履歴の代表的な例として、実験ケ

ース11の結果をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。また、ケース11における各材令の等温線図を Fig.6 に示す。他ケースについての温度履歴および応力履歴は、定量的には異なるが、定性的には Fig.4 および Fig.5 に示すものと同様である。

大口径深礎杭の温度分布は、Fig.6 に示されるようにほぼ 2 次元であり、ここでは示していないが、応力についても同様である。

終局断熱温度上昇量と杭中心部における最大温度上昇量から判断して、杭径 3m の場合は地盤の影響を受けるが、杭径 5m 以上では、杭中心部はほぼ断熱状態とみなすことができる。これに関連して、最高温度に到達する

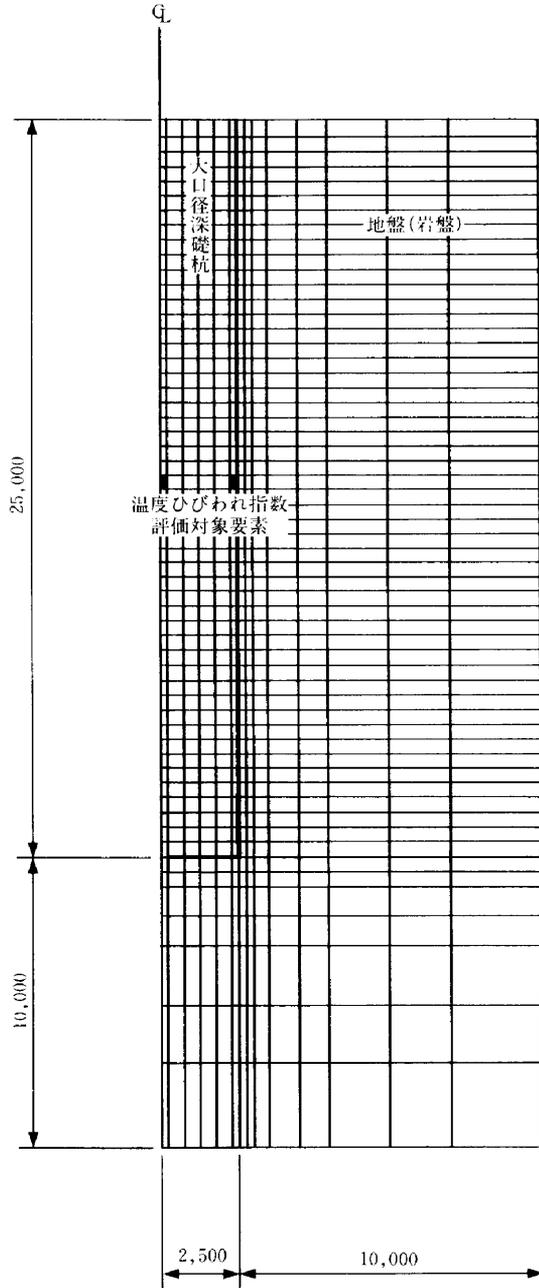


Fig.3 標準的な解析モデル (杭径5m, 杭長25m)

材令は、概ね、杭径3mの場合で3日、杭径5mの場合で5日、杭径7mの場合で8日であり、当然であるが杭径が小さいほど地盤の影響を受ける。部材平均最高温度時の材令は最高温度時の材令に一致する。また、最大温度差が生じる材令は必ずしも最高温度時の材令に一致しないが、そのずれは1日程度であり、最大温度差が生じる材令の方が遅い。

最終材令平均温度は、計算時間の制約から平衡時温度

Table 2 計算因子および水準

計算因子	水準
外気温(°C)	15
地盤(岩盤)温度(°C)	15
打込み温度(°C)	15, 20, 25
単位セメント量(kg/m³)	240, 270, 300
断熱温度上昇実験定数	Table 3 参照
コンクリートの熱伝導率(kcal/mh°C)	2.3
コンクリートの熱容量(kcal/m³°C)	715
熱伝達率(kcal/m² h°C)	10
地盤(岩盤)の熱伝導率(kcal/mh°C)	1.2
地盤(岩盤)の熱容量(kcal/m³°C)	600
コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)	$f_c(t) = (t / (4.5 + 0.95t)) \cdot f_c(91)$
コンクリートの弾性係数(kgf/cm²)	$E_c(t) = 1.1 \times 10^4 \cdot \sqrt{f_c(t)}$ (材令3日まで) $E_c(t) = 1.5 \times 10^4 \cdot \sqrt{f_c(t)}$ (材令3日以降)
コンクリートの引張強度(kgf/cm²)	$f_t(t) = 1.4 \sqrt{f_c(t)}$
コンクリートのポアソン比	0.2
地盤(岩盤)の弾性係数(tf/cm²)	0.1, 1, 1.5, 2.5, 5, 10
地盤(岩盤)のポアソン比	0.3

注) $f_c(28) = 240 \text{ kgf/cm}^2$ (単位セメント量270kg/m³, 300kg/m³の場合)
 $f_c(28) = 210 \text{ kgf/cm}^2$ (単位セメント量240kg/m³の場合)

Table 3 断熱温度上昇実験定数(普通ポルトランドセメント)

単位セメント量(kg/m³)	打込み温度(°C)	断熱温度上昇実験定数
240	20	$Q(t) = 34.0(1 - e^{-0.793t})$
270	20	$Q(t) = 37.0(1 - e^{-0.841t})$
300	15	$Q(t) = 41.0(1 - e^{-0.676t})$
300	20	$Q(t) = 40.0(1 - e^{-0.889t})$
300	25	$Q(t) = 38.5(1 - e^{-1.136t})$

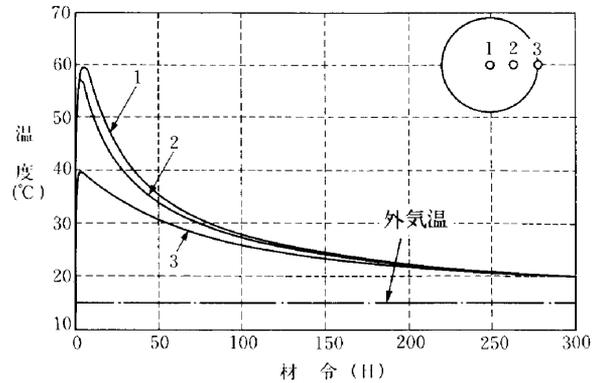


Fig.4 温度履歴図(ケース11の例)

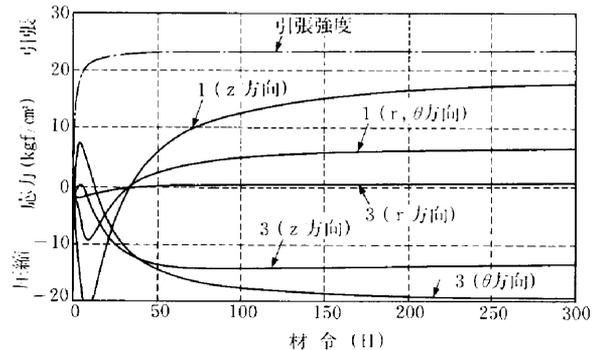


Fig.5 応力履歴図(ケース11の例)

Table 4 温度解析結果

Case No.	T_{max} (°C)	ΔT_{max} (°C)	ΔT_i (°C)	$T_{a,max}$ (°C)	T_{ae} (°C)	ΔT_o (°C)
1	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
2	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
3	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
4	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
5	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
6	59.3	39.3	20.1	54.2	17.3	36.9
7	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
8	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
9	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
10	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
11	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
12	59.3	39.3	20.1	54.2	19.9	34.3
13	59.3	39.3	20.1	54.2	20.2	34.0
14	59.3	39.3	20.1	54.2	20.2	34.0
15	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
16	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
17	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
18	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
19	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
20	53.9	33.9	18.2	50.2	17.0	33.2
21	59.9	39.9	20.5	55.1	20.1	35.0
22	59.9	39.9	20.5	55.1	20.1	35.0
23	53.3	33.3	17.3	48.5	19.3	29.2
24	56.3	36.3	18.7	51.4	19.6	31.8
25	54.9	39.9	18.3	49.7	19.5	30.2
26	63.1	38.1	21.5	57.8	20.4	37.4

T_{max} : 最高温度, ΔT_{max} : 最大温度上昇量,
 $T_{a,max}$: 部材平均最高温度, T_{ae} : 最終材令平均温度

すなわち地盤温度と多少差がある。このため、Table 5 に示す杭中心部の r, z 方向の温度ひびわれ指数は、平衡時温度に到達した場合に予想される値より大きいものとなっている。

Table 5 に示すように各ケースとも r 方向の温度ひびわれ指数は3以上であり、r 方向の温度ひびわれ発生の可能性はほとんどないといえる。

したがって、大口径深礎杭で問題となるのは、杭中心部での z 方向応力および杭外周部での θ 方向応力である。

Table 5 温度応力解析(温度ひびわれ指数)結果

No.	$TCI(r)$	$TCI(z)$	$TCI(\theta)$
1	3.65	1.67	1.96
2	3.63	1.66	2.04
3	3.62	1.65	2.09
4	3.60	1.63	2.18
5	3.50	1.56	2.46
6	3.28	1.42	3.18
7	3.56	1.82	1.98
8	3.57	1.75	2.04
9	3.57	1.69	2.08
10	3.58	1.57	2.17
11	3.57	1.32	2.39
12	3.53	0.99	2.96
13	3.61	1.48	2.06
14	3.72	0.95	2.32
15	3.28	1.65	2.58
16	3.27	1.49	2.69
17	3.26	1.39	2.75
18	3.24	1.22	2.88
19	3.19	0.94	3.25
20	3.09	0.68	4.24
21	4.15	2.03	1.81
22	4.18	1.68	2.05
23	4.19	1.50	2.74
24	3.86	1.43	2.53
25	4.39	1.71	2.44
26	3.08	1.10	2.32

注) r, z 方向は中心部, θ 方向は外周部

§ 4. 簡易算定式に用いる T_o および R の検討

数値実験の結果から、大口径深礎杭における温度ひびわれ判定の評価対象となる応力は θ 方向および z 方向の応力であることが明らかになった。

θ 方向の応力は内外温度差による内部拘束応力が支配的であり、z 方向の応力は温度降下に伴う外部拘束応力が支配的であり、それぞれ式(2)および式(3)の關係に相当する。なお、実験で得られた温度ひびわれ指数は内部拘束応力および外部拘束応力を加味したものであるのに対して、式(2)は外部拘束応力の影響を含んでおらず、式(3)

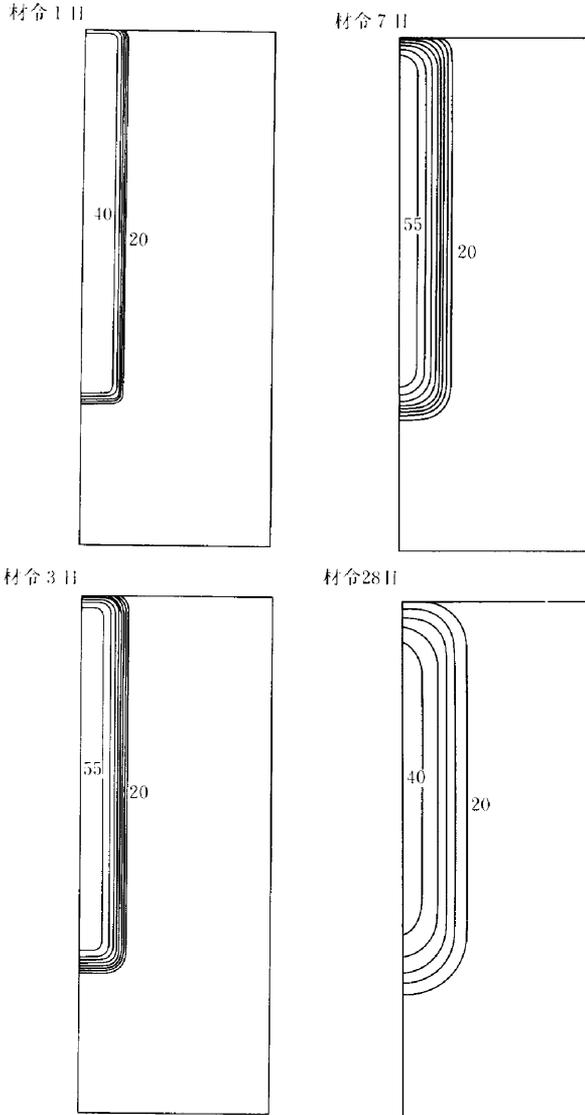


Fig.6 各材令における等温線図(ケース11)

は内部拘束応力の影響を含んでいない。

式(2)および式(3)の関係を大口径深礎杭に適用する場合、前述したように、式(2)については、深礎杭の温度分布状態に基づいて新たに式を導く必要があり、式(3)については、深礎杭に対する外部拘束度を与える必要がある。すなわち、式(2)の定数(基本温度差 T_d (°C) と呼ぶ) および式(3)の R (外部拘束の拘束度) を同定する必要がある。

したがって、これらの式が適用可能な条件を数値実験の結果を用いて検討する。

まず、式(2)の T_d および式(3)の R に着目して、式を変形すると次式が得られる。

θ 方向

$$T_d = TCI \cdot \Delta T_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

z 方向

$$R = 10 / (TCI \cdot \Delta T_d) \quad \dots\dots\dots(5)$$

これらの T_d および R について、Table 4 および Table 5 に示す結果を用いて整理する (Table 6)。

Fig.7 および Fig.8 は、それぞれ杭径 5m で、地盤弾性係数 1.5tf/cm^2 (147.1MPa) および 5.0tf/cm^2 (490.3MPa) の条件下における T_d および R と杭長の関係を示したものである。 T_d については、杭長の影響は比較的少ない。しかし、地盤弾性係数が大きくなると多少杭長に影響され、杭長が長いほど T_d は小さくなる。 R については、 T_d より杭長の影響は顕著で、地盤弾性係数が大きいほど杭長の影響が大きく、また杭長が長いほど R は大きくなる。これはスラブにおけるブロック長さとの関係と

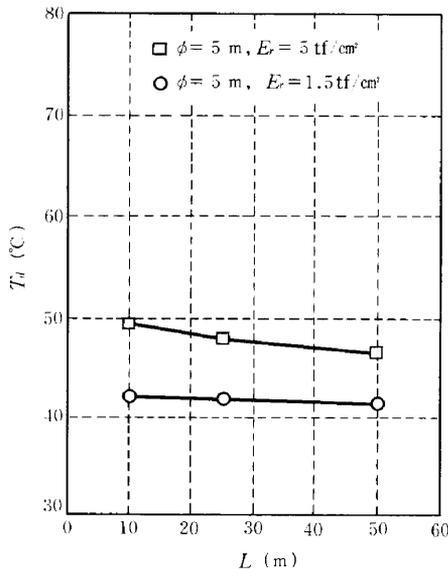


Fig.7 T_d と杭長の関係

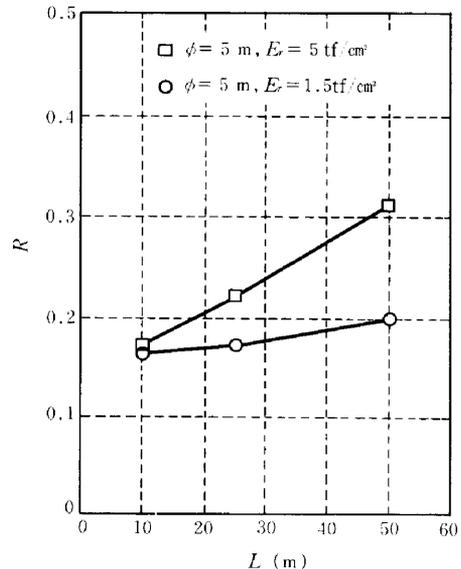


Fig.8 R と杭長の関係

Table 6 T_d および R

Case No.	ϕ (m)	L (m)	E_r (tf/cm ²)	TCI (z 方向)	ΔT_o (°C)	R	TCI (θ 方向)	ΔT_i (°C)	T_d (°C)
1	5.0	10.0	0.1	1.67	36.9	0.162	1.96	20.1	39.4
2	5.0	10.0	1.0	1.66	36.9	0.163	2.04	20.1	41.0
3	5.0	10.0	1.5	1.65	36.9	0.164	2.09	20.1	42.0
4	5.0	10.0	2.5	1.63	36.9	0.166	2.18	20.1	43.8
5	5.0	10.0	5.0	1.56	36.9	0.174	2.46	20.1	49.4
6	5.0	10.0	10.0	1.42	36.9	0.191	3.18	20.1	63.9
7	5.0	25.0	0.1	1.82	34.3	0.160	1.98	20.1	39.8
8	5.0	25.0	1.0	1.75	34.3	0.167	2.04	20.1	41.0
9	5.0	25.0	1.5	1.69	34.3	0.173	2.08	20.1	41.8
10	5.0	25.0	2.5	1.57	34.3	0.186	2.17	20.1	43.6
11	5.0	25.0	5.0	1.32	34.3	0.221	2.39	20.1	48.0
12	5.0	25.0	10.0	0.99	34.3	0.294	2.96	20.1	59.5
13	5.0	50.0	1.5	1.48	34.0	0.199	2.06	20.1	41.4
14	5.0	50.0	5.0	0.95	34.0	0.310	2.32	20.1	46.6
15	3.0	25.0	0.1	1.65	33.2	0.183	2.58	18.2	47.0
16	3.0	25.0	1.0	1.49	33.2	0.202	2.69	18.2	49.0
17	3.0	25.0	1.5	1.39	33.2	0.217	2.75	18.2	50.1
18	3.0	25.0	2.5	1.22	33.2	0.247	2.88	18.2	52.4
19	3.0	25.0	5.0	0.94	33.2	0.320	3.25	18.2	59.2
20	3.0	25.0	10.0	0.68	33.2	0.443	4.24	18.2	77.2
21	7.0	25.0	1.5	2.03	35.0	0.141	1.81	20.5	37.1
22	7.0	25.0	5.0	1.68	35.0	0.170	2.05	20.5	42.0
23	5.0	25.0	5.0	1.50	29.2	0.228	2.74	17.3	47.4
24	5.0	25.0	5.0	1.43	31.8	0.220	2.53	18.7	47.3
25	5.0	25.0	5.0	1.71	30.2	0.194	2.44	18.3	44.7
26	5.0	25.0	5.0	1.10	37.4	0.243	2.32	21.5	49.9

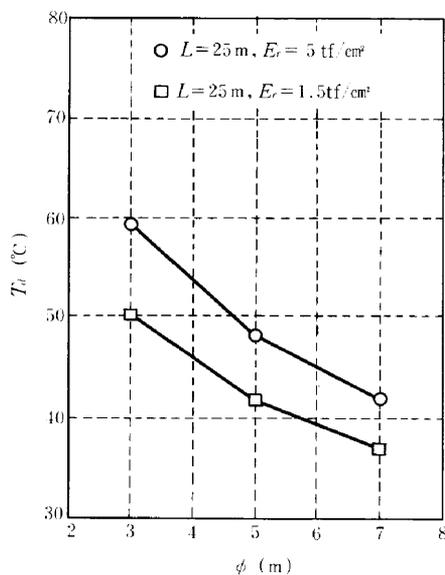


Fig.9 T_d と杭径の関係

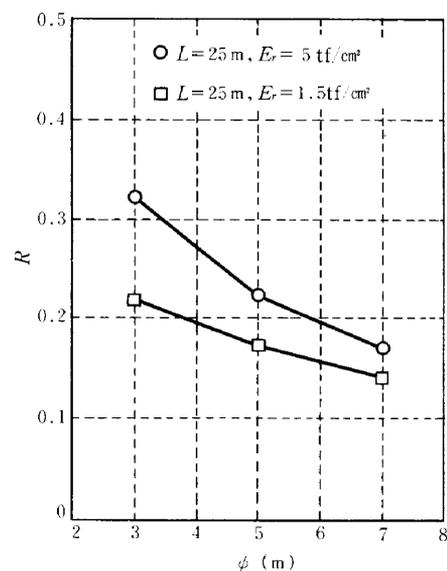


Fig.10 R と杭径の関係

同様である。なお、本実験の範囲内では、 T_d および R と杭長の関係はほぼ線形とみなすことができる。

Fig.9 および Fig.10 は、それぞれ杭長25mで、地盤弾性係数1.5tf/cm²(147.1MPa)および5.0tf/cm²(490.3MPa)の条件下における T_d および R と杭径の関係を示したものである。 T_d については、杭径が大きいほど小さくなり、地盤弾性係数の差に関してはほぼ同様の傾向を示す。 R については、地盤弾性係数が大きいほど杭径の影響が大きく、また杭径が小さいほど R は大きくなる。両者とも杭径との関係は非線形である。

Fig.11 および Fig.12 は、それぞれ杭径3m(杭長25m)、杭径5m(杭長10m, 25m)の条件下における T_d

および R と地盤弾性係数の関係を示したものである。 T_d および R ともに、地盤弾性係数に比例して値が大きくなる。 R については、杭径が小さいほど、あるいは杭長が長いほど地盤弾性係数の影響が顕著になる。 T_d と地盤弾性係数の関係は非線形であるが、 R と地盤弾性係数の関係はほぼ線形とみなすことができる。

Fig.13 および Fig.14 は、それぞれ杭径5m、杭長25m、地盤弾性係数5.0tf/cm²(490.3MPa)の条件下における T_d および R と終局断熱温度上昇量 Q_∞ との関係を示したものである。本実験の範囲内では、終局断熱温度上昇量すなわち単位セメント量が T_d および R に及ぼす影響は少ない。

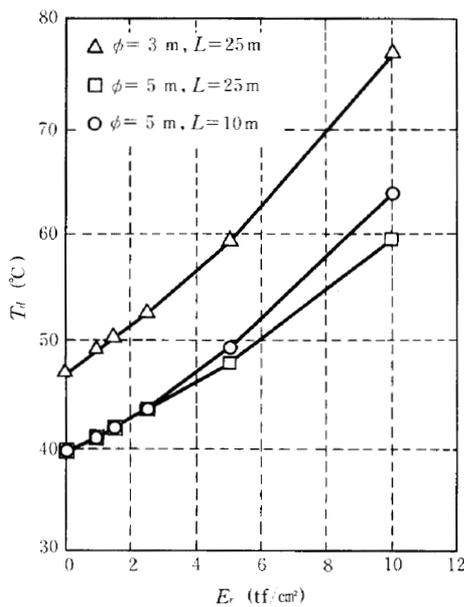


Fig.11 T_d と地盤弾性係数の関係

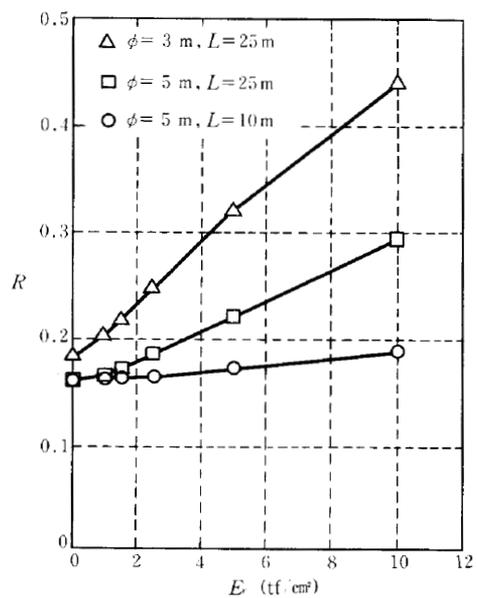


Fig.12 R と地盤弾性係数の関係

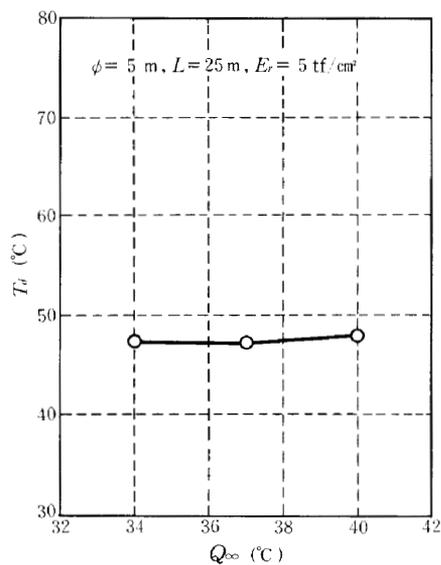


Fig.13 T_d と終局断熱温度上昇量の関係

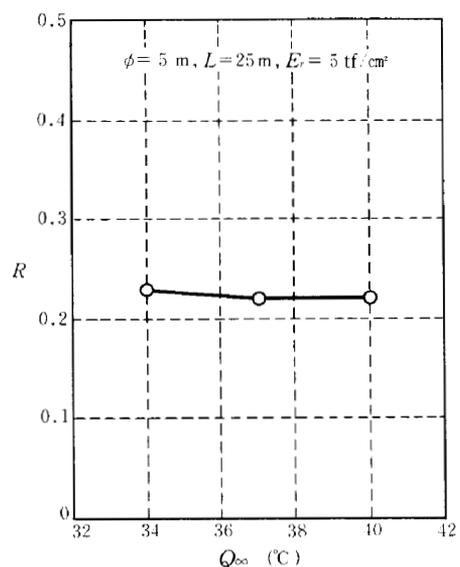


Fig.14 R と終局断熱温度上昇量の関係

Fig.15 および Fig.16 は、それぞれ杭径 5 m, 杭長 25 m, 地盤弾性係数 5.0 tf/cm² (490.3 MPa) の条件下における T_d および R とコンクリートの打込み温度との関係を示したものである。打込み温度が高くなるほど、 T_d および R ともに大きくなる。

以上の結果から、 T_d については、地盤弾性係数および杭径の影響が比較的大きく、 R については、これらに加えて杭長の影響も大きい。

次に、 T_d および R を従属変数とし、 T_d については、 $L, 1/\phi, E_r^{1.5}, \Delta T_p (= T_p - T_g, T_g: \text{地盤温度})$ を、 R については、 $L, 1/\phi, E_r, \Delta T_p$ をそれぞれ独立変数に選んで重回帰分析を行う。すなわち、次に示す関係を用いる。

$$T_d = f(L, 1/\phi, E_r^{1.5}, \Delta T_p) + \varepsilon_1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$R = f(L, 1/\phi, E_r, \Delta T_p) + \varepsilon_2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

この結果、 T_d および R の線形重回帰式は次式で与えられる。

$$T_d = -0.0385L + 76.7(1/\phi) + 0.752E_r^{1.5} + 0.52\Delta T_p + 22.5 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$R = 0.00209L + 0.538(1/\phi) + 0.0148E_r + 0.0049\Delta T_p - 0.035 \quad \dots\dots\dots(9)$$

- ここに、 L : 杭長 (m)
- ϕ : 杭径 (m)
- E_r : 地盤弾性係数 (tf/cm²)
- ΔT_p : 打込み温度と地盤温度の差 (°C)

式(8)、式(9)を用いて計算した T_d および R の予測値と

残差を Table 7 に示す。

Table 7 に示すように、 T_d については、式(8)に示した回帰モデルはよくあてはまっており、一般的な大口径深礎杭に適用する場合、かなり信頼性が高いと考えられる。

一方、 R については、式(9)に示した回帰モデルは T_d に比較して予測精度が悪いが、概ね一致している。杭長が短い場合は、地盤弾性係数が小さいほど R を小さく見積り、地盤弾性係数が大きいほど R を大きく見積る傾向がある。杭長が長い場合はこの逆である。杭径が小さい場合は、地盤弾性係数が小さいほど R を大きく見積り、地盤弾性係数が大きいほど R を小さく見積る傾向がある。杭径が大きい場合は、比較的精度が良い。これらの点に注意を払えば、式(9)に示した回帰モデルは R の予測に関して実用的に問題ないと考えられる。

したがって、大口径深礎杭の目標温度ひびわれ指数を設定すれば、式(4)、式(5)、式(8)および式(9)を用いて、最大温度差および最高温度時平均温度と平衡温度（地盤温度）との差の規制値が簡易的に求まる。

なお、本実験の場合、最高温度と最高温度時平均温度との関係は、次の線形重回帰式で与えられる。

$$T_{a,max} = 0.96 T_{max} - 0.22\phi - 1.5 \quad \dots\dots\dots(10)$$

- ここに、 $T_{a,max}$: 最高温度時平均温度 (°C)
- T_{max} : 最高温度 (°C)
- ϕ : 杭径 (m)

深礎杭の場合、一般に地盤温度が安定しているため、式(10)は実用的に問題ない。また、最高温度は次式で与えられる。

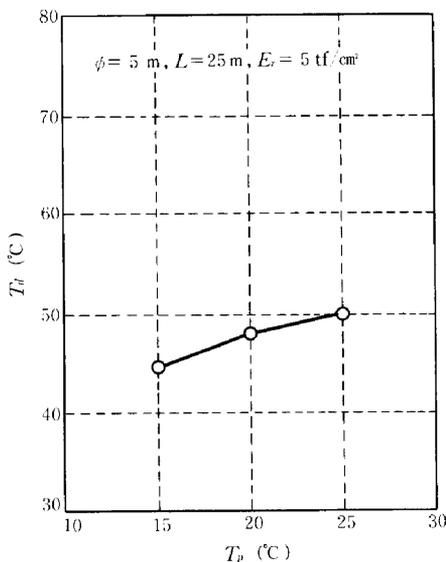


Fig.15 T_d と打込み温度の関係

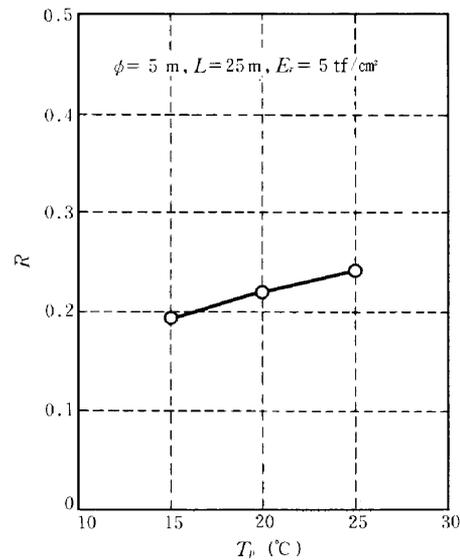


Fig.16 R と打込み温度の関係

$$T_{max} = Q_{\infty} + T_p \dots\dots\dots(11)$$

以上より、大口径深礎杭の温度ひびわれ制御対策の検討を行う場合、一般に温度管理項目として最大温度差および最高温度を選ばよく、式(8)、式(9)等を用いてこの最大温度差および最高温度の規制値を設定することにより、温度解析のみで簡易的に検討が行える。また、パイプクーリングを実施しない場合や温度差によるひびわれが問題ない場合は、使用するコンクリートの終局断熱温度上昇量の検討のみで温度解析も不要になる。

Table 7 T_d および R の予測値と残差

Case No.	T_d			R		
	実験値	予測値	残差	実験値	予測値	残差
1	39.4	40.0	-0.6	0.162	0.119	0.043
2	41.0	40.8	0.2	0.163	0.132	0.031
3	42.0	41.4	0.6	0.164	0.140	0.024
4	43.8	43.0	0.8	0.166	0.155	0.011
5	49.4	48.4	1.0	0.174	0.192	-0.018
6	63.9	63.8	0.1	0.191	0.265	-0.074
7	39.8	39.5	0.3	0.160	0.150	0.010
8	41.0	40.2	0.8	0.167	0.164	0.003
9	41.8	40.8	1.0	0.173	0.171	0.002
10	43.6	42.4	1.2	0.186	0.186	0.0
11	48.0	47.8	0.2	0.221	0.223	-0.002
12	59.5	63.2	-3.7	0.294	0.297	-0.003
13	41.4	39.9	1.5	0.199	0.223	-0.024
14	46.6	46.8	-0.2	0.310	0.275	0.035
15	47.0	49.7	-2.7	0.183	0.222	-0.039
16	49.0	50.4	-1.4	0.202	0.235	-0.033
17	50.1	51.0	-0.9	0.217	0.243	-0.026
18	52.4	52.6	-0.2	0.247	0.258	-0.011
19	59.2	58.0	1.2	0.320	0.295	0.025
20	77.2	73.4	3.8	0.443	0.369	0.074
21	37.2	36.4	0.7	0.141	0.140	0.001
22	42.0	43.5	-1.5	0.170	0.192	-0.022
23	47.4	47.8	-0.4	0.228	0.223	0.005
24	47.3	47.8	-0.5	0.220	0.223	-0.003
25	44.7	45.2	-0.5	0.194	0.198	-0.004
26	49.9	50.4	-0.5	0.243	0.247	-0.004
$R_s^{1)}$	0.974			0.805		

1) R_s : 重相関係数

§ 5 . 実施例に基づくコンクリート温度管理

5-1 概要

本研究で提案した大口径深礎杭の温度ひびわれ発生の検討手法に対する有効性を明らかにすることを目的として、本節においては、§4で得られた T_d および R に関する重回帰モデルを用いて、最大温度差や最高温度等の温度規制値を設定し、実工事における温度ひびわれ制御対策を検討する。

検討する基礎杭は、東洋を代表する超高層ビルであるシンガポール UOB プラザビルの基礎に採用された大深度大口径深礎杭12本である。Fig. 17, 18 および Table 8 に基礎杭の形状を示す。

以下に、シンガポール UOB プラザビルの大深度大口径深礎杭の温度ひびわれ制御対策についての検討例を示す。

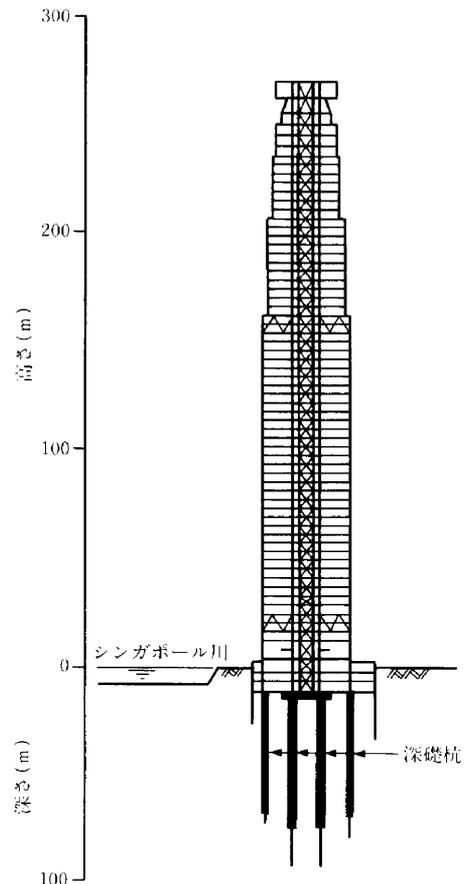


Fig.17 シンガポールUOBプラザビル

Table 8 基礎杭の形状寸法(原設計)

杭径 (m)	杭長 (m)
4.7	57~65
6.2	62~73
6.8	76

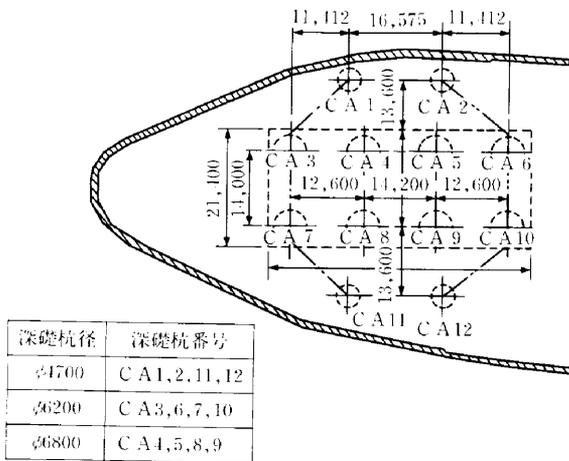


Fig.18 杭配置

5-2 温度規制値

大口径深礎杭の温度ひびわれ制御に対して基本となる温度管理項目は、§4で述べたように内部拘束応力に関係する杭水平断面内外の最大温度差と、外部拘束応力に関係する最高温度である。この他にも最高温度到達後の日温度降下量なども対象となるが、パイプクリーニング等による強制的な冷却をする場合を除けば、深礎杭は温度が安定した地盤内にあり急激な温度低下が起らないことから問題になりにくい。よって、ここでは温度規制を行う温度管理項目として最大温度差および最高温度を取り上げる。

最大温度差の規制値に関しては、まず式(8)の T_d に関する線形重回帰式を用いて T_d を求め、次に温度ひびわれ指数 (TCI) を設定して、求めた T_d を式(4)に代入することで与えられる。

一方、最高温度の規制値に関しては、最大温度差の場合と同様にまず式(9)の線形重回帰式を用いて R を求め、次にこれを式(5)に代入し、最高温度時平均温度と平衡温度との差を求める。さらに、この最高温度平均温度を式(8)に代入することで最高温度の規制値が与えられる。

以下に、この手順に従い最大温度差と最高温度の規制値を求める。なお、温度規制値の計算に関わる本工事の施工条件は Table 9 に示すとおりである。

まず、Table 8 および Table 9 の値を用いて、次に示すように式(6)、式(7)から T_d および R を求める。

$$\begin{aligned}
 T_d &= -0.0385L + 76.7(1/\phi) + 0.752E_r^{1.5} \\
 &\quad + 0.52\Delta T_p + 22.5 \\
 &= -0.0385 \times 57 + 76.7/4.7 + 0.752 \times 2.0^{1.5} \\
 &\quad + 0.52 \times (28 - 28) + 22.5 \\
 &= 39.0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R &= 0.00209L + 0.538(1/\phi) + 0.0148E_r \\
 &\quad + 0.0049\Delta T_p - 0.035 \\
 &= 0.00209 \times 57 + 0.538/4.7 + 0.0148 \times 2.0 \\
 &\quad + 0.0049 \times (28 - 28) - 0.035 \\
 &= 0.23
 \end{aligned}$$

以下、同様に計算して求めた T_d および R を Table 10 に示す。

この結果から、 T_d の最小値および R の最大値から、 T_d および R を設定すると、

$$T_d = 32, \quad R = 0.24$$

となる。

ここで、§2で示した温度ひびわれ指数の目安を参考に、構造物の重要性、腐食環境性およびひびわれ発生位置等を考慮して、本基礎杭の温度ひびわれ指数の目標値を次に示す値とする。

$$TCI = 1.3$$

この温度ひびわれ指数と先に求めた T_d および R を式(4)および式(5)に代入する。最大温度差 (ΔT_i) および最大温度時平均温度と平衡温度との差 (ΔT_o) は、次のように求まる。

$$\begin{aligned}
 \Delta T_i &= T_d / TCI = 32 / 1.3 = 24.6(^\circ\text{C}) \\
 \Delta T_o &= 10 / (TCI \cdot R) = 10 / (1.3 \times 0.24) \\
 &= 32.1(^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

これより、最高温度時平均温度 ($T_{a,max}$) は、

$$T_{a,max} = \Delta T_o + T_g = 32.1 + 28.0 = 60.1(^\circ\text{C})$$

したがって、式(10)より、最高温度 (T_{max}) は

$$\begin{aligned}
 T_{max} &= (T_{a,max} + 0.22\phi + 1.5) / 0.96 \\
 &= (60.1 + 0.22 \times 4.7 + 1.5) / 0.96 = 65.2(^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

となる。

以上より、最大温度差および最高温度の規制値を Table 11 に示すように設定した。

Table 9 温度規制値に関する施工条件

打込み温度	T_p (°C)	28
地盤温度	T_g (°C)	28
地盤弾性係数	E_r (kgf/cm ²)	2000

注) プレクリーニング無しの場合

Table 10 UOBビル基礎杭の T_d および R

杭径 (m)	杭長 (m)	$E_r=2000\text{kgf/cm}^2$	
		T_d	R
4.7	57	39	0.23
4.7	65	38	0.24
6.2	62	35	0.21
6.2	73	34	0.23
6.8	76	32	0.23

Table 11 最大温度差および最高温度の規制値

管理項目	規制値	
	計算値	設定値
最大温度差 ΔT_i (°C)	24.6	20.0
最高温度 T_{max} (°C)	65.2	65.0

5-3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、設計基準強度 $f_c(28)=300\text{kgf/cm}^2(29.4\text{MPa})$ から Table 12 に示す 3 種類のものを検討した。

配合 A は特記仕様書に示されたもので、セメント種類、水セメント比、単位セメント量および打込み温度等が規定されており、原則として本工事において使用が義務付けられている。配合 B および配合 C は、後で述べる理由により配合 A の代案として、提案したものである。

各配合に用いられるセメントは、マレーシア産のもので JIS 規格のセメントと比較すると成分、品質等が多少異なる。また、これを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、我が国の場合と異なり明らかでない。

Table 12 コンクリート配合

配合種類	セメント種類	W/C	単 位 量 (kg/m³)				打込み温度 (°C)
			C	W	G	S	
配合 A	低熱セメント	0.5	330	165	-	-	20
配合 B	耐酸セメント	0.5	330	165	-	-	28
配合 C	耐酸セメント	0.57	270	155	1080	909	28

このため、コンクリートの断熱温度上昇式の算定には、我が国で用いられているものを使用することにして、各セメントに対して成分、品質等が比較的に近似するものを選んだ。すなわち、低熱セメントを日本の中庸熱ポルトランドセメント、耐酸セメントを高炉セメント B 種と

して扱った。各配合の断熱温度上昇式および終局断熱温度上昇量に打込み温度を加えて求めた最高温度を Table 13 に示す。

この結果、配合 C については、打込み温度 $T_p=28^\circ\text{C}$ でも最高温度の規制値を満足し、配合 A および配合 B については、プレクーリングにより打込み温度を下げた場合に最高温度の規制値を満足することが判明した。

しかし、特記仕様書で規定された配合 A は以下に示す問題があった。

- ① 配合 A の低熱セメントのコストは、配合 B および配合 C の耐酸セメントの約 2 倍である。
- ② 打込み温度 20°C 以下を維持するためには、プレクーリングとして大量の水の使用 (所用水量: $(70\sim 80\%) \times W$) が不可欠であり、現地の氷の供給能力に問題がある。また、これに代えて液体窒素などを使用する場合、コストが莫大となる。

したがって、低熱セメントに比して低コストであり、かつ現地において供給しやすい耐酸セメントを使用した配合 B および配合 C を基礎杭のコンクリートとして検討することにした。

配合 B と配合 C を比較すると、水セメント比などで特記仕様書で規定された配合 A に近い配合 B の方が望ましい。

しかし、配合 B については、打込み温度 $T_p=28^\circ\text{C}$ の場合、最高温度が 69.9°C となり、最高温度の規制値 65°C を満足しない。このため、コンクリート温度を強制的に下げることがある。この場合、コンクリートの強制的な冷却方法としては、プレクーリングまたはパイプクーリングによる方法が考えられる。前者については、配合 A で示した理由で採用が難しい。よって、配合 B については、パイプクーリングによる冷却を検討した。

シンガポールでは、本工事と施工条件、温度規制等が異なるが、 $\phi 8.7\text{m}$ の大口径深礎杭にパイプクーリングを適用した実績がある。

本基礎杭に対する試算の結果、クーリングパイプ (1^B) の間隔は最大温度差および最高温度の規制値を満足する

Table 13 各配合の断熱温度上昇式

配合種類	打込み温度 $T_p=28^\circ\text{C}$		打込み温度 $T_p=20^\circ\text{C}$	
	断熱温度上昇式	最高温度	断熱温度上昇式	最高温度
配合 A	$Q(t)=40.5(1-e^{-0.347t})$	68.5°C	$Q(t)=37.4(1-e^{-0.795t})$	57.4°C
配合 B	$Q(t)=41.9(1-e^{-0.831t})$	69.9°C	$Q(t)=41.4(1-e^{-0.812t})$	61.4°C
配合 C	$Q(t)=36.1(1-e^{-0.757t})$	64.1°C		

ためには1m間隔が必要であり、各基礎杭はTable 14に示す本数が必要になった。各基礎杭ともかなりの本数のクーリングパイプが必要であり、大深度深礎杭に対してこれだけのクーリングパイプを配置することは、配置およびコンクリート打設面で難作業となるため、配合Bの採用は断念した。

したがって、本工事においては、ここで示す一連の検討からエンジニアの承認を得て、プレクーリングおよびパイプクーリングが不要な配合Cを採用した。

Table 14 クーリングパイプの本数

杭径 (m)	パイプ本数
4.7	9
6.2	13
6.8	21

5-4 断熱温度上昇試験

先に仮定した配合Cの断熱温度上昇式が正しいかどうかを確認する目的で断熱温度上昇試験を実施した。本来、断熱温度上昇試験は内部のコンクリート温度に追随するように周辺温度を制御できる専用試験機を用いる。しかし、シンガポールでは年間を通じて気温が安定しており、コンクリートの打込み温度に変動が少ないため、大型のブロックを用いたフィールドテストを行った。

試験供試体は2.7m立方供試体であり、内部のコンクリートを断熱状態に保持する目的で、周囲を厚さ20cmの発泡スチロールで覆い、上部については、さらに厚さ20cmの砂で覆った。

コンクリート打設後2週間、コンクリート温度の計測を行ったが、計測結果によると本試験方法でほぼ断熱状態が確保されていることが確認できた。

温度解析により断熱温度上昇試験をシミュレーションした結果、次に示す断熱温度上昇式が得られた。

$$Q(t) = 35.7(1 - e^{-1.140t})$$

本式は、終局断熱温度上昇量において、先に仮定した配合Cの断熱温度上昇式の値を下回っており、最高温度の規制値を満足することが確認できた。

Fig. 19に試験値と解析値を比較したものを示す。

5-5 温度解析

本基礎杭に配合Cを採用した場合、断熱温度上昇試験の結果から最高温度の規制値を満足することが確認できたが、最大温度差の規制値を満足するかどうかは不明である。このため、最大温度差の規制値を満足するかどうか

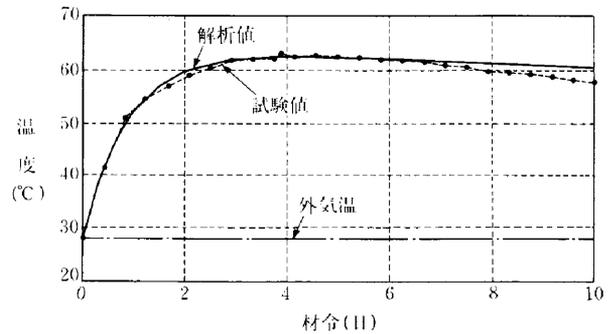


Fig.19 断熱温度上昇式に関する試験値と解析値の比較

かを確認する目的で、断熱温度上昇試験で得られた断熱温度上昇式を用いて温度解析を実施した。解析に用いた計算因子および水準をTable 15に示す。なお、コンクリートに関する水準は、断熱温度上昇試験をシミュレーションしたときに用いたものである。

解析モデルは、杭軸(鉛直)方向に1要素の簡易的なモデルで、上下面の境界条件を断熱状態にした軸対称3次元モデルである。解析モデルの例として、杭径φ=6.8mの場合の解析モデルをFig.20に示す。

φ4.7m、φ6.2mおよびφ6.8mについて温度解析した結果、全ての径で最大温度差の規制値20°C以内を満足することが確認できた。

実施工においては、温度管理項目の確認を目的として、深礎杭12本の全てについて高さ方向に4段、各段3点(中心点、1/4点、外周)の温度測定を行った。この結果、全ての基礎杭において規制値を満足していることが確認できた。

Table 15 計算因子および水準

計算因子	水準
地盤温度(°C)	28
打込み温度(°C)	28
断熱温度上昇実験定数	$Q(t) = 35.7(1 - e^{-1.140t})$
コンクリートの熱伝導率(kcal/mh°C)	2.4
コンクリートの熱容量(kcal/m³°C)	550
地盤の熱伝導率(kcal/mh°C)	1.2
地盤の熱容量(kcal/m³°C)	600

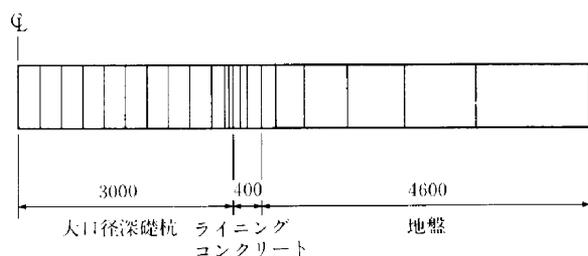


Fig.20 解析モデル(φ6.8m)

Fig.21 に代表的な例として $\phi 6.8\text{m}$ の場合の実測値と解析値による温度履歴図を示す。

実測値と解析値を比較すると、外周部付近の最高温度は解析値の方が実測値よりも約 5°C 低い結果になっている。また、中心および $1/4$ 点の日温度降下量は解析値の方が幾分大きい結果になっている。しかし、全体的にみれば、解析値と実測値は概ね一致しており、温度解析に用いた熱特性は妥当なものであったと考えられる。

温度ひびわれの問題は、現状では確率的な問題であるため断定することができないが、温度計測の結果から判断して、本基礎杭には温度ひびわれが発生していないか、発生したとしても非常に少ないと考えられる。

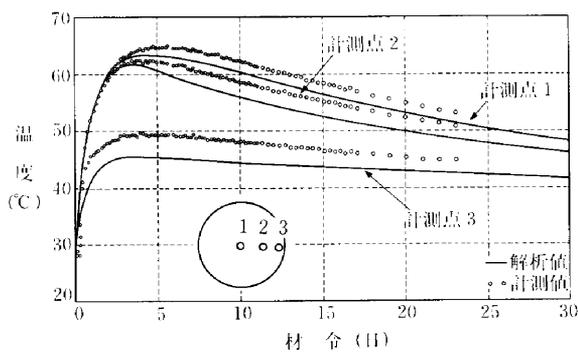


Fig.21 温度解析結果と計測結果の比較

§ 6. まとめ

本研究は、まず大口径深礎杭の温度ひびわれ発生の検討方法に対する現状および問題点を論じ、簡易手法の必要性を述べた。

また、大口径深礎杭の温度ひびわれ発生の特性要因のうち、影響が大きいと考えられる杭径、杭長、地盤弾性係数、単位セメント量、打込み温度等を抽出し、全体系モデルによるパラメトリックスタディを行い、これらの特性要因が大口径深礎杭の温度ひびわれに及ぼす影響を T_d および R を用いて定量的に把握した。

これにより、最大温度差および最高温度の規制値の算定に用いる簡易式に必要な実験定数 T_d および R は、杭径、杭長、地盤弾性係数、打込み温度と相関性が高いことを明らかにした。これに基づき、 T_d および R に関して、杭径、杭長、地盤弾性係数等を独立変数として、重回帰分析を実施し、線形重回帰式を示した。

次に、これらの研究で得られた T_d および R の重回帰モデルを用いて、実工事における温度ひびわれ制御対策を検討した。

この結果、この方法によると簡易的に温度管理項目の規制値が得られ、また、温度解析も簡易的なモデルで行うことができるため、温度ひびわれ制御対策の検討が全体系モデルで行う場合に比してかなり省力化・省時間化できることが実証された。

したがって、今後、大口径深礎杭の温度ひびわれの検討の際に、本研究で提案した手法を用いることは有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査、補修・補強指針・同解説、1987.2.
- 2) 佐久間彰三、瀬尾有一、正田武則：シンガポール高層ビルにおける超太径杭の施工、基礎工、1983.11.
- 3) 高橋敏夫、宇佐美幸作：シンガポールにおける深さ100mの深礎杭の施工、基礎工、1986.6.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編、1986.10.
- 5) 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.
- 6) 小野定：ひびわれ被害の実態—マスコンクリート、コンクリート工学、Vol.20, No.11, 1982.
- 7) 堀口浩司、鈴木康範、佐藤利幸他：新しい断熱温度上昇量に基づく温度応力解析結果、セメント技術年報、1987.
- 8) 森本博昭、小柳治：コンクリート構造物の温度応力解析における2、3の問題点、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、1982.9.
- 9) 田中豊、垂水共之、脇本和昌：パソコン統計解析ハンドブックII多変数解析編、共立出版、1984.11.