

温度応力継続時間を考慮したダムコンクリートの 温度ひびわれの検討

THERMAL CRACKING CONSIDERING THE TIME DURATION OF THE SUSTAINED LOAD IN DAM CONCRETE

長島 弘*・小野 定**

By Hiroshi NAGASHIMA and Sadamu ONO

Many arguments have been made on the thermal crack occurrence in general concrete structures, but study on the thermal crack occurrence in dam concrete is insufficient.

The purpose of the present investigation is to examine the evaluation of the thermal crack occurrence in dam concrete on the basis of actual measurements.

As a results, we obtained a satisfactory evaluation of the thermal crack occurrence considering the time duration of the sustained load in dam concrete.

Keywords: mass concrete, dam concrete, thermal crack, thermal stress

1. ま え が き

マスコンクリートの温度ひびわれ制御の歴史は、ダムコンクリートにおけるひびわれ制御の歴史に置き換えて考えることができる。そのような長い年月にわたる研究と経験に裏づけられて、ダムコンクリートにおける温度ひびわれ制御はリフト高、打設間隔、クーリング等のように体系化されている。しかしながら、そのようなダムコンクリートにおいても温度ひびわれ制御の問題は、温度ひびわれの発生評価法等にみられるようにいまだ重要な問題として残されているようである。特に、温度ひびわれ発生の評価方法については、ダム以外のコンクリート構造物に比べて十分には解明されていないと考えられる。本報告で調査対象にしたAダムにおいても、計画段階で温度ひびわれ制御に関する検討が実施されていたにもかかわらず、施工段階で外部拘束が主たる原因と考えられるダム軸方向の温度ひびわれの発生が認められている。

本報告は、従来あまり報告されていないダムコンク

リートの温度ひびわれ発生の評価について、Aダムにおけるひびわれの調査結果に基づいて検討したものである。検討は、Aダムで調査した打込み温度、外気温、配合などの諸条件をもとにして、コンペイセションライン法(CLM)と簡易法の2方法による温度応力解析を行い、該当リフトのひびわれ発生有無と対比することにより、温度ひびわれ発生予測の適合率を向上させる方法について考察した。

2. 調査データをもとにした温度応力解析

(1) 調査データ

ダム工事のコンクリートの諸条件は、すべてAダム工事関係者から提供されたデータによった。

a) 解析に使用したデータ

表-1に示すように1年目については5月から9月までに任意抽出の12件、2年目は5月と8月の全打設日の34件、3年目も5月と8月の全打設で42件、計88件のデータである。図-1にひびわれの発生状況を示す。

b) ひびわれの種類と件数

前記88件の中で、現地からの報告によるひびわれの種類は、次の3種類であった。

各リフト上面の横断ひびわれ	8件
各リフト長手方向の端部の水平ひびわれ	35件

* 工博 北見工業大学教授 工学部一般教育等
(〒090 北見市公園町165番地)

** 正会員 工博 清水建設(株)土木本部技術第一部
(〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル)

上記の両者が1リフトに発生した場合 6件
 ひびわれが発生していない 39件

c) コンクリート配合

粗骨材最大寸法 150 mm, 混合セメントB種を用い, 内部コンクリートの単位セメント量は約 160 kg/m³, 混和剤は AE 減水剤遅延型を使用し, 水セメント比は 60 % である。

d) コンクリート打込み

現場プラントによる柱状打設方式であり, パイプクーリングは行っていない。また, 打込み温度は1日1回現場で測定した値を使用した。

e) 気象条件

現地の最高・最低温度記録値による毎日の気温日較差(最高値と最低値との差)を, 仮定した日内温度変化曲線を適用して2時間ごとの外気温を仮定した。

リュッシュのクリープ計算の場合には湿度を 60 % と

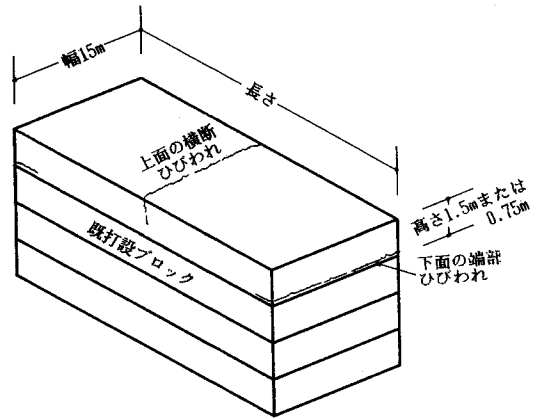


図-1 ひびわれの状況

表-1 ひびわれ調査対象ブロック一覧表

NO	プロック	長さ cm	高さ cm	下部打継 材令高さ	上部打継 材令高さ	ひびわれ 上面 下端	NO	プロック	長さ cm	高さ cm	下部打継 材令高さ	上部打継 材令高さ	ひびわれ 上面 下端
1	12	2307	75	0	0	7 75	45	15	2814	150	23	150	10 150 横断
2	14	2240	75	0	0	4 75	46	13	1827	150	28	150	23 150 水平
3	17	3210	75	0	0	7 75	47	14	1229	75	0	0	6 75
4	8	1070	150	12	150	0 0	48	19	2286	75	0	0	5 75 水平
5	9	1827	150	9	150	0 0	49	18	2958	75	6	75	12 75
6	12	1640	150	12	150	0 0	50	17	2190	75	6	75	7 75
7	8	947	150	22	150	0 0	51	15	1922	75	7	75	7 75
8	10	1196	150	28	150	0 0	52	9	977	75	0	0	5 75 水平
9	6	693	150	27	150	0 0	53	11	1229	75	0	0	20 75 水平
10	17	4000	150	18	150	0 0	54	14	1208	75	6	75	8 75
11	14	1702	150	26	150	0 0	55	16	3054	75	8	75	9 75 水平
12	17	3000	150	9	150	0 0	56	17	2111	75	6	75	4 75
13	8	1670	75	4	75	6 75	57	15	1859	75	7	75	4 75 水平
14	12	2286	75	0	0	7 75	58	9	899	75	5	75	13 75 水平
15	10	1922	75	4	75	8 75	59	11	1382	75	4	75	20 75 水平
16	8	1607	75	6	75	7 75	60	17	2048	75	4	0	10 75 水平
17	12	2190	75	7	75	7 75	61	12	851	75	10	75	9 75
18	13	1859	75	6	75	4 75	62	15	1796	75	4	75	9 75
19	10	1859	75	8	75	4 75	63	14	1103	75	7	75	5 75
20	14	2286	75	0	0	4 75	64	16	2958	75	9	75	10 75
21	8	1543	75	7	75	7 75	65	19	2111	75	11	75	5 75
22	10	1796	75	4	75	11 75	66	18	2766	75	6	75	10 75
23	12	2111	75	7	75	6 75	67	14	1103	75	5	75	8 150
24	13	2670	75	7	75	6 75	68	13	1334	75	0	0	8 150 水平
25	14	2190	75	4	75	8 75	69	19	2048	75	5	75	14 150
26	11	2670	75	8	0	5 75	70	17	1953	150	10	75	15 150 水平
27	8	825	150	7	75	7 150	71	9	851	75	13	75	7 150
28	12	2048	75	6	75	9 75	72	15	1701	150	9	75	16 150 水平
29	13	2574	75	6	75	7 75	73	16	2766	150	10	75	7 150
30	11	2574	75	5	75	11 75	74	14	945	150	8	75	7 150
31	14	2111	75	8	75	4 150	75	13	1292	75	8	75	6 150
32	10	1701	150	11	75	12 150	76	18	2622	150	10	75	11 150 水平
33	8	1323	150	7	75	9 150	77	11	1103	75	20	75	18 150 水平
34	14	2079	75	12	75	28 150	78	16	1953	150	31	150	26 150
35	13	2430	150	7	75	7 150	79	17	1323	150	11	150	26 150 横断
36	12	1953	150	9	75	11 150	80	13	788	150	15	150	28 150
37	13	1953	150	29	150	28 150	81	20	2238	150	11	150	19 150 水平
38	15	3006	150	12	150	23 150	82	21	1827	150	11	150	27 150 横断
39	14	1701	150	30	150	22 150	83	15	1071	150	28	150	13 150 水平
40	11	1827	150	31	150	22 150	84	18	1827	150	29	150	13 150
41	9	1449	150	24	150	23 150	85	19	1323	150	23	150	18 150 横断
42	10	1071	150	29	150	22 150	86	20	2079	150	19	150	12 150 水平
43	7	1071	150	24	150	28 0	87	16	1827	150	26	150	13 150 水平
44	12	1323	150	30	150	22 150	88	17	1197	150	26	150	16 150 横断

(注) 打継ぎ材令0及び高さ0として記載してあるのは、材令1月以上で該当ブロックに影響が少ない場合として省略した。

単位：材令(日)、高さ(cm)

して仮定した。

f) 計算用断面寸法

1 リフトの高さは 1.5 m と 0.75 m の 2 種類があり、1 リフトの長さは上下面を平均した長さとして計算した。打設リフトの幅は 15 m である。

g) コンクリート打込み後の養生

上面は上部のリフト打設まで湛水養生とした。

h) コンクリート物性

強度：現地記録の標準養生 4 週強度平均値を式 (1) により積算温度 $M=840$ (°DD) として、積算温度 M と強度の関係式 (2) を作成した。

$$M = \sum (T_c + 10) / 24 \dots\dots\dots (1)$$

M : 積算温度 M (°DD)

ここに、 T_c : 1 時間ごとのコンクリート温度 (°C)

$$F_c = (71.56 M / 30) / (3.1 + 0.26 M / 30) \dots\dots\dots (2)$$

F_c : 材令 ($M/30$) 日におけるコンクリート強度 (kgf/cm²)

弾性係数：前記コンクリート強度から式 (3)¹⁾ の推定式を用いて換算した。

$$E = 4500 \rho^{1.5} F_c^{0.5} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

E : コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)

ρ : コンクリートの単位容積重量 (kg/m³)

α : コンクリート熱膨張率で 0.00001/°C と仮定

i) 打設ブロック下面の温度および弾性係数

ブロック下面の温度：下面ブロックの温度を仮定するにあたり、この現場の温度上昇曲線を打込み温度別、打込み高さ別にパターン化して (4)、(5) の略算式を導き、ブロック下面の温度として用いた。

$$T_1 = 0.3 D + S - (0.3 D / Q^2) (Z_h - Q)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$T_2 = 0.3 D + S - (0.3 D / Q^2) ((Z_h - Q) / 10)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

T_1 : 上昇中のコンクリート温度 (°C)

T_2 : 下降中のコンクリート温度 (°C)

D : 下ブロックの厚さ (cm)

Z_h : 下ブロックの検討日の材令 (h)

$$Q : Q = 0.11 D + 10.8 \dots\dots\dots (6)$$

S : 外気温度または打込み温度 (°C)

弾性係数：前記同様に下面ブロックの材令から式 (2)、(3) により仮定した。

i) 応力計算の断面の位置

温度は打込み高さ方向に 6 等分した 7 か所について予測計算をした。しかし、ひびわれ応力を検討する場合には、拘束度で高さ (H) 方向に 10 等分した $0.1 H$ 、 $0.9 H$ の高さとしたため、温度計算を行った結果も高さも 10 等分した $0.1 H$ 、 $0.9 H$ の位置に比例配分で換算して、温度応力を計算した。

(2) 温度履歴の計算方法

コンクリート打込み後の温度履歴の 1 計算法として、長島はセメントの水和熱発生速度を温度と時間を関数とするセメントの水和熱に関する成熟度を各位置ごとにステップバイステップで求めて、セメントの発熱量を推定する方法を提案している^{2),3)}。そして、コンクリート打込み後のセメントの水和熱と構造物表面からの放熱を 2 時間ごとに差分法による計算式のパソコンプログラムを作成し、多くの実験・構造物に適用した誤差は、諸条件が正確ならば約 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ で予測する (ただし最高温度に達する時間には誤差がある) ことができることが確認されている。従来の断熱温度上昇曲線から放熱を計算して温度履歴を予測する計算と異なるのは、部材外の放熱と内部各点の温度変化を、計算時間間隔ごとに各点についてセメントの水和履歴と温度から水和熱の発生量をステップバイステップで予測計算することである。部材内温度を計算する点数は、1 リフトの厚さに関係なく上下方向に 6 等分した 7 点とした。また、このプログラムでは温度環境として、各打込みリフトごとのコンクリート打込み温度、養生期間の毎日の最高・最低気温の記録値、検討リフト下側の前回のコンクリートの材令をあらかじめ入力しておき、下側放熱面は (4)、(5) の概算式によるコンクリートの温度履歴とし、上側放熱面は日内変化 (仮定日内気温変化曲線による) する外気温度を用いて計算するようになっている。

しかしこのプログラムは寒中コンクリートを対象とした研究で作成したものであったために、混合セメントに関する既往のセメント定数 DATA がなかった。そのため現地の実測温度履歴 2 例と良く適合するように参考文献 2) の実験定数 ($R=860$, $Q_1=27.5$, $Q_2=57.0$) を求め、上面 $K_1=7.4$ 、下面 $K_2=2.5$ (kcal/m²h°C) と仮定した。また、各材令ごとのブロックの上・下表面および内部の温度分布は、参考文献 2) の式 (9) から (15) により計算した。

(3) 温度応力の計算方法

温度応力の計算は、コンペンセーションライン法、および簡易増分法により行った。なお、外部拘束度は、ACI の方法および小野が提案している方法により算定した。

a) コンペンセーションライン法

前記 7 点の温度計算結果を 12 時間ごとに、コンペンセーションラインのプログラム (日本コンクリート工学協会で作成された DISK の CLK をサブルーチンとして) に代入する方法で応力分布を計算した。そして各材令の応力は簡易増分法で、コンクリート打込みから検討時刻までの 12 時間ごとの弾性係数変化・拘束度の変化・クリープによる応力緩和を計算しながら、検討時刻

の応力を計算しその12時間前の応力との差(式(7)の $\alpha\Delta TK_r$ に相当)を求めた。そして、冷却開始から検討材令まで12時間ごとの各応力増分について、それぞれその時点の有効弾性係数 E_e (その時点の積算温度からクリープ係数 ϕ と弾性係数を仮定)とポアソン比を用いて計算した各応力の総和を、その検討材令の応力とした。

$$\Delta\sigma = \sum \alpha \Delta T K_r E_e / (1 + \nu) \dots\dots\dots (7)$$

$\Delta\sigma$: 検討材令の応力 (kgf/cm²)

ここに、

E_e : 検討時間帯の有効弾性係数 (kgf/cm²)

$$E_e = E_c / (1 + \phi)$$

α : コンクリートの熱膨張率 (10×10⁻⁶/°Cとした)

ν : コンクリートのポアソン比 (1/6とした)

ϕ : クリープ係数で、コンペンセーションライン法の計算ではリュッシュ法により計算した。この場合の材令は式(1)の値を30で除した20°C換算の日数とした。

ΔT : 12時間間隔の温度変化 (°C)

K_r : コンペンセーションライン法の R_m , R_n のグラフによった。

ただし、下面拘束部の弾性係数は、下部コンクリートの材令から式(2), (3)で仮定した。検討リフトの弾性係数は各検討材令ごとに、温度履歴式(1)から式(2)により強度を推定し、式(3)で弾性係数を仮定した。

b) 簡易増分法

簡易増分法として用いた計算式は式(8)である。ここで下面コンクリートの拘束による内部応力への影響については、小野法⁴⁾とACI法の2種類について計算することとした。その際にクリープの予測計算は桑原の12時間以上の式(9)のクリープ係数 ϕ によった⁵⁾(また前記コンペンセーション法と同様に、リュッシュ法による場合も並行して試みた)。

$$\Delta\sigma = \sum \alpha \Delta T K_r E_e / (1 + \nu) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$\Delta\sigma$: 応力増分 (kgf/cm²)

ΔT : 前回の検討材令と今回の検討材令の温度変化量 (°C)

E_e : 該当期間の平均有効弾性係数 (kgf/cm²)

K_r : 下面からの拘束度で、ACI法の場合と小野法の場合の2種類。なお、ACI法と小野法との大きな違いは前者は拘束体を無限体としているのに対して後者は有限体の場合も考慮している点である。また、後者はFEMによるシミュレーションで計算したものである⁴⁾。

$$\phi = A \log(Z) + B (\log(Z))^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$A : A = (1.345 - 0.572 \log(H))^{0.5}$$

$$B : B = 0.1856 - 0.834 \log(H)$$

H : 載荷開始材令(ただし材令12時間以降の場合)(h)

Z : 載荷開始材令から検討材令までの時間 (h)

(4) 応力比および応力比持続時間の集計方法

温度ひびわれは、引張応力が引張強度(割裂強度)以上になると発生すると考え、引張強度はその圧縮強度の約1/10であることから、ひびわれの発生有無を検討するにあたり、次の応力比を用いることにした。

$$\text{応力比} = (\text{引張応力}) / (\text{圧縮強度})$$

この応力比がおよそ0.1以上でひびわれが発生すると考えられるが、既往の研究などでは明確でないために、表—2のような応力比の級を0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.17以上となる場合についてひびわれの発生確率を求めた。また引張強度と圧縮強度の比が20%以上となることは考えられないので、応力比0.20以上は省略した。

また、応力比とは別に、ブロックの両端が反り上がる傾向の解析の一手段として、総括した一連の計算を行う前に、上面の引張応力と下面の引張応力との差を次式により求めた。その上面・下面の応力差の分布から、表—3のように応力差が5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0以上となる級別について、ひびわれ発生有無との関係を検討した。

3. 温度応力の計算結果

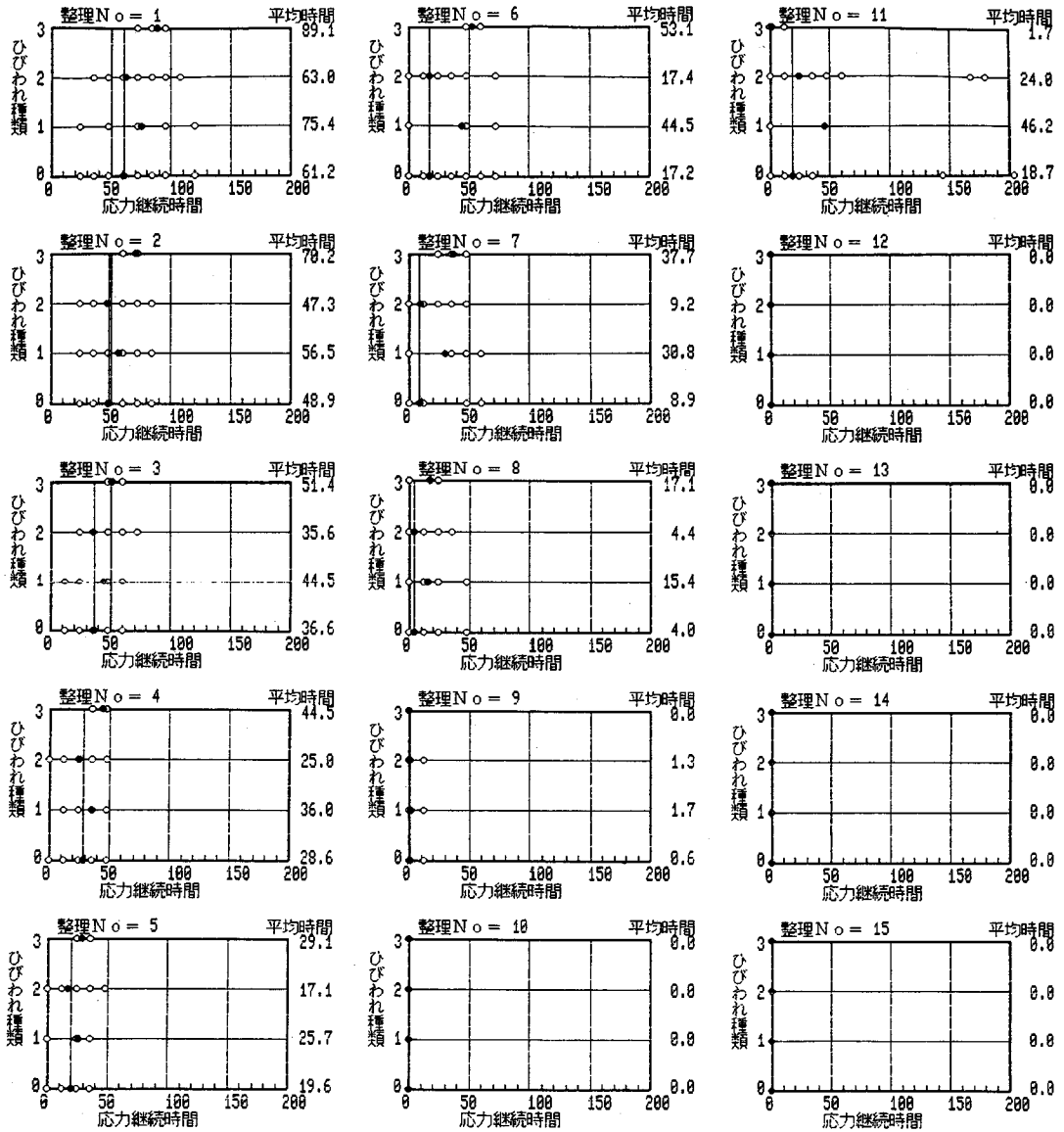
(1) 応力比の持続時間とひびわれの種類

コンペンセーションライン法の応力ひびわれを集計した結果を、表—2の整理番号による応力比級別に、ひび

表—2 引張応力比級および上下応力差級別の継続時間集計範囲と整理番号

応力比(差)種類	上面引張応力/圧縮強度					下面引張応力/圧縮強度					上面と下面の引張応力の差				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
コンペンセーション法															
簡易増分法	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
応力比(差)級	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0

注) 計算方法におけるクリープ係数 ϕ と外部拘束 K_r の仮定の組合せ。
 コンペンセーションライン法: リュッシュ法(ϕ)とコンペンセーションライン法 R_m , R_n の組合せ No.1~No.15。
 簡易増分法: リュッシュ法(ϕ)×ACI法(K_r)の組合せ No.16~No.30で応力比(差)級は次と共通。桑原法(ϕ)×小野法(K_r)の組合せ No.16~No.30は、図—2、表—3および表—4では省略してある。



注) ひびわれ種類 0=なし, 1=上面ひびわれ, 2=下端部水平ひびわれ, 3=1, 2両ひびわれ, ●は平均値を示す。

図-2(a) 応力級別・ひびわれ種類別応力継続時間(整理No.は応力比級別で表-2による)

われ種類ごとに集計した結果を図-2に示す。ただし、クリープはリュッシュ法、簡易増分法の拘束度はACI法の場合のみで、クリープ=桑原法、拘束度=小野法の組合せは図-2、表-3および表-4では省略している。

応力比継続時間の長短を判断する場合の最初の基準値としては、各応力比(または差)級別にひびわれなしグループの平均時間を用いることとした。応力比以上となる継続時間はひびわれ種類によって、図-2から一般に次のような傾向があることが認められる。

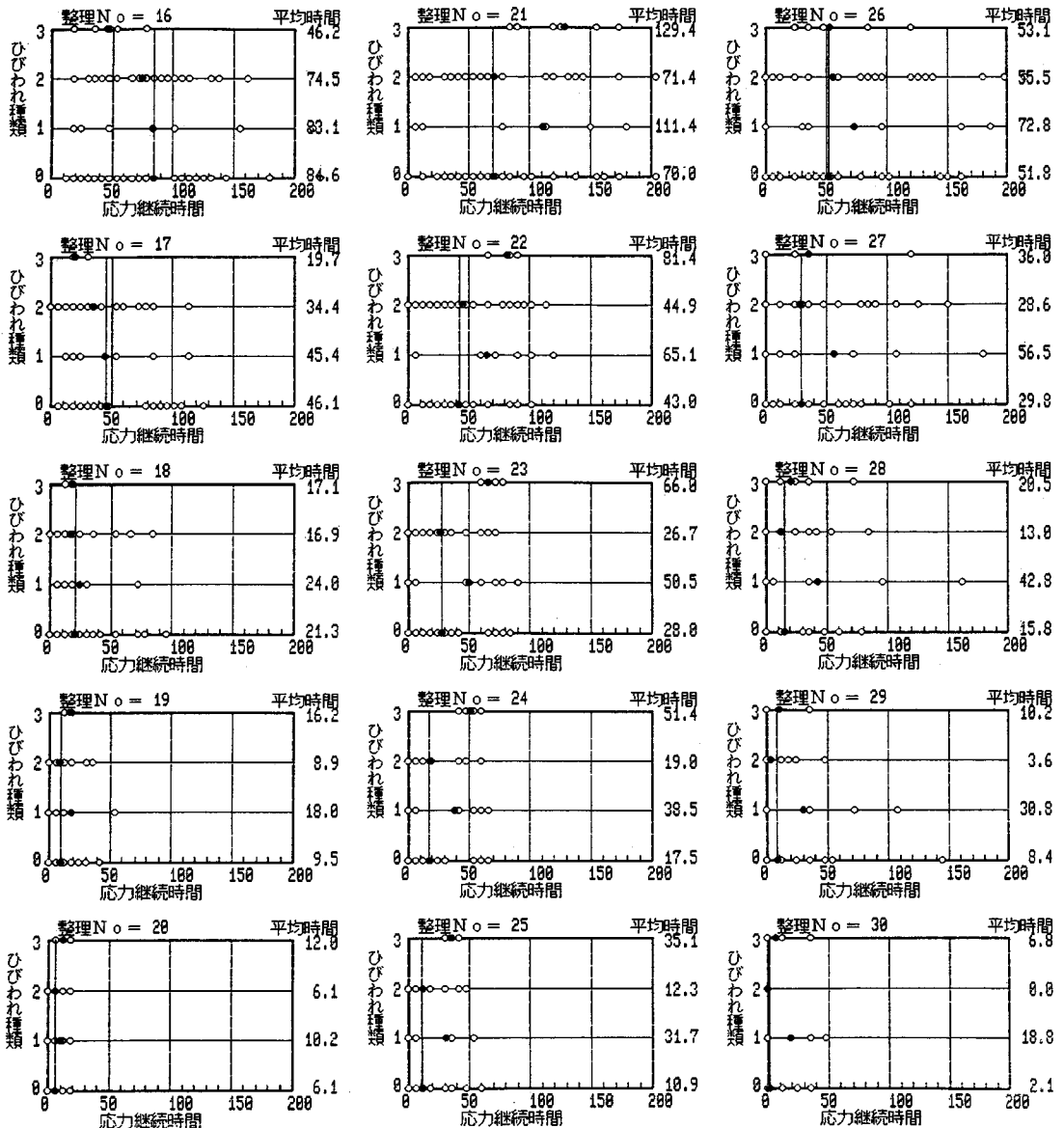
a) 上面横断ひびわれのみ発生の場合：ひびわれなし

グループの平均応力継続時間より長い件数が多い。

b) 下端部水平ひびわれのみ発生した場合：このグループの応力継続時間平均値は、ひびわれなしグループの平均値に近い値であり、幅広く分布している。

c) 上面横断・下端部水平ひびわれの両者が発生した場合：簡易増分法の上面の場合を除き、このグループの平均応力継続時間は、ひびわれなしグループの平均応力継続時間より長く、かつ平均継続時間前後に多く、前記2者よりばらつきが少ない。

d) ひびわれなしグループ：このグループの応力継続



注) ひびわれ種類 0=なし, 1=上面ひびわれ, 2=下端部水平ひびわれ, 3=1, 2両ひびわれ, ●は平均値を示す。

図-2(b) 応力級別・ひびわれ種類別応力継続時間(整理No. は応力比級別で表-2による)

時間は0時間(級別応力比以下の場合も含む)にも多いが、幅広く分布している。このことは、ひびわれが発生していても、発見されなかった場合もあるのではないかと考えられる。

e) 応力比(または差)級別: 応力比(または差)の低い級別では、上面ひびわれグループと上面・下端部両ひびわれグループの引張力継続時間の平均値は、ひびわれなしグループの平均値より大きい。特に、両ひびわれが発生する場合は引張力が長時間を継続する場合に限られるということができる。

以上のことから、応力比の継続時間を考慮して判断することによりひびわれ予測適合率が向上することが考えられ、下記(3)の集計方法を試みた。

(2) 引張応力比または応力差によるひびわれ予測適合率(応力継続時間を無視)

上面と下端部各ひびわれ種類について、ひびわれの予測適合率 P を式(10)により計算した。コンペンセーションライン法と簡易増分応力比で、クリープ係数はリュッシュ法とし、簡易増分応力法の下部拘束はACI法とした場合の例を表-3に示した。その他の計算法と仮定法

表-3 引張応力比(または差)だけで判断したひびわれ予測適合率

No	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	27	28	29	30
0	0	0	0	3	15	54	74	82	95	100	77	100	100	100	100	0	0	8	28	38	5	8	18	31	46	21	51	74	82	90
1	100	100	100	100	93	86	86	64	7	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	100	100	88	79	55	38	26	10	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	100	100	100	100	100	100	100	71	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	50	50	50	51	54	70	80	73	51	50	46	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
5	50	50	50	45	47	54	56	54	52	50	49	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
6	50	50	50	46	47	55	59	56	53	50	49	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

注) 上段の番号は表-3に示した計算法と許容応力比(又は差)を示す整理番号
 予測適合率で 0=ひびわれなし 1=上面横断ひびわれ 2=下端部水平ひびわれ
 3=上面・下端部の両面ひびわれ 4=上面ひびわれとなしの平均 5=下端部ひびわれとなしの平均
 6=上面ひびわれと下端部水平ひびわれの和とひびわれなしの平均

表-4 引張応力比(または差)以上となる累積時間で判定したひびわれ予測適合率

上面横断ひびわれ																														
NO	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	27	28	29	30
時間	61	49	37	29	20	17	9	4	1	0	19	0	0	0	0	85	46	21	10	6	70	43	28	18	11	52	30	16	8	2
0	75	75	76	77	63	79	80	73	51	50	46	50	50	50	50	39	43	43	68	69	72	72	67	74	74	50	57	61	59	63
5	75	75	76	77	65	79	85	73	51	50	46	50	50	50	50	39	48	47	72	69	76	77	74	77	83	51	57	61	61	63
10	75	75	76	68	65	80	85	73	51	50	47	50	50	50	50	39	44	45	50	57	75	77	81	83	85	54	50	58	61	62
15	72	72	61	68	65	80	85	73	50	50	47	50	50	50	50	39	44	46	51	50	73	80	85	85	85	54	50	59	61	62
20	72	72	61	50	50	84	78	52	50	50	50	50	50	50	50	38	44	46	51	50	69	76	82	85	79	54	53	59	63	62
25	67	52	50	50	50	84	78	52	50	50	50	50	50	50	50	39	44	48	52	50	69	73	82	71	79	54	53	53	63	63
30	67	52	50	50	50	84	60	52	50	50	50	50	50	50	50	43	44	48	52	50	71	70	82	71	56	56	53	53	53	63
40	52	50	50	50	50	64	52	50	50	50	50	50	50	50	50	46	45	50	54	50	73	70	63	59	56	53	55	56	55	57
50	52	50	50	50	50	56	52	50	50	50	50	50	50	50	50	51	48	50	50	50	69	55	51	50	50	50	57	58	56	50
下端部水平ひびわれ																														
NO	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	27	28	29	30
時間	61	49	37	29	20	17	9	4	1	0	19	0	0	0	0	85	46	21	10	6	70	43	28	18	11	52	30	16	8	2
0	53	55	56	55	49	56	56	54	52	50	51	50	50	50	50	42	43	45	53	52	52	52	47	55	56	53	53	53	49	47
5	53	55	56	55	51	56	59	54	52	50	51	50	50	50	50	42	48	45	55	52	56	56	51	52	58	55	52	53	51	47
10	53	55	56	52	51	55	59	57	52	50	52	50	50	50	50	40	47	46	49	53	55	56	58	58	59	54	48	50	50	49
15	56	56	50	52	51	55	59	57	50	52	50	50	50	50	38	46	46	50	50	55	57	61	60	59	54	48	52	50	49	
20	56	56	50	50	51	58	55	51	50	52	50	50	50	50	50	39	46	46	50	50	54	57	60	60	57	54	48	52	48	49
25	55	50	51	50	51	58	55	51	50	52	50	50	50	50	39	46	48	50	50	54	58	60	57	57	54	48	48	48	50	
30	55	50	51	50	50	58	52	51	50	50	51	50	50	50	50	41	42	48	49	50	55	58	60	57	53	48	47	47	50	
40	50	50	50	50	50	52	49	49	50	50	51	50	50	50	50	43	43	49	50	50	58	55	50	53	49	49	49	48	47	50
50	49	50	50	50	50	51	49	50	50	50	50	50	50	50	50	47	47	47	50	50	54	51	47	50	50	49	53	51	49	50
横断・水平両面ひびわれ																														
NO	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	27	28	29	30
時間	61	49	37	29	20	17	9	4	1	0	19	0	0	0	0	85	46	21	10	6	70	43	28	18	11	52	30	16	8	2
0	56	56	58	57	50	58	59	56	53	50	50	50	50	50	44	46	54	55	54	54	49	56	57	53	53	54	51	50	50	
5	56	56	58	57	53	58	62	56	53	50	50	50	50	50	44	49	46	57	55	58	58	53	55	60	55	52	54	53	50	
10	56	56	58	53	53	58	62	58	53	50	52	50	50	50	41	47	46	49	53	56	58	60	60	62	54	49	52	52	52	
15	57	57	52	53	53	58	62	58	50	50	52	50	50	50	39	46	46	50	50	57	60	64	63	62	54	49	53	52	52	
20	57	57	52	50	51	60	59	52	50	50	52	50	50	50	40	46	46	50	50	56	59	62	63	60	54	50	53	51	52	
25	57	51	51	50	51	60	59	52	50	50	52	50	50	50	40	46	49	51	50	56	59	62	58	60	54	50	49	51	53	
30	57	51	51	50	50	60	53	52	50	50	51	50	50	50	42	43	49	50	50	57	58	62	58	54	54	50	48	49	50	
40	51	50	50	50	54	50	50	50	50	51	50	50	50	50	45	44	49	51	50	59	56	52	54	51	51	51	50	49	52	
50	50	50	50	50	53	50	50	50	50	50	50	50	50	50	49	48	48	50	50	56	53	48	50	50	50	54	53	51	50	

注) 最上段=表-3の整理番号 2段目=ひびわれなしグループの応力継続平均時間
 最左列=判定応力継続時間として2段目の時間に加える時間
 従ってひびわれ発生予測用応力継続判定時間=2段目+最左列

の組み合わせた場合については、表一3の4・5段に相当するひびわれ予測適合率 P が50%以上の場合のみ表一5予測適合率 P 欄の「上面」「下面」欄に示した。

$$P=50(A/C+B/D) \dots\dots\dots (10)$$

P ：検討ひびわれ種類についての予測適合率 (%)

ただし、応力比 (差) だけで判断する場合

A ：検討種類のひびわれが発生したグループで、所定応力比以上または応力差以上となった件数

B ：ひびわれが確認されなかったグループで、所定応力比以下または所定応力差以下であった件数

C ：検討種類のひびわれ発生が確認された件数

D ：ひびわれが発生していないと報告されている件数

ここで A , B は上面横断ひびわれと下端部水平ひびわれ両方が1リフトに発生している件数は、「上面」「下端」欄ひびわれグループに件数を加算してある。また、本来ならばひびわれ予測適合率は、リフトの計算対象高さとはひびわれ種類との対応する部分についてのみで良いが、参考までにすべて同じように計算した。

次に種類に関係なく、いずれかのひびわれが発生しているグループと、なしグループに分けて、式 (10) で A , C を所定応力比または応力差より以上または以下で集計した場合、表一3の6段に相当する予測適合率を、表一5では予測適合率 P 欄の「両者」欄に示した。

(3) 引張応力比または応力差に応力継続時間を考慮した場合のひびわれ予測適合率

所定応力比または応力差の応力級別に所定継続時間以上になる場合にひびわれが発生すると仮定した予測適合率を、式 (11) で計算した。所定継続時間はひびわれなしグループの平均応力継続時間に5~30時間までは5時間単位で、30~50時間は10時間単位で加え、それぞれのひびわれ予測適合率を計算した。コンペンセーションライン法と簡易増分応力法について、クリープ係数はリュッシュ法とし、簡易増分応力法の下部拘束度はACI法による場合の計算結果の例を、ひびわれ種類ごとに表一4に示した。それらの中でひびわれ予測適合率 Q が最高値が得られた応力継続時間 (表一4の2段目=ひびわれなし平均時間と、最左列=加算した時間の和) と、その予測適合率 Q が50%以上になる場合を表一5に Q (%) として示した。ただし予測適合率が同じ値となる応力継続時間については、その継続時間の中央値によった。

次にひびわれの種類と関係なくひびわれの有無を、式 (11) で A , B を所定応力比 (または差) より以上または以下かつ所定応力継続時間以上以下で集計した場合、表一5の「両者」 Q 欄に示した。

$$Q=50(A/C+B/D) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

Q ：検討ひびわれの種類についての予測適合率 (%)
ただし応力継続時間を考慮した場合

A ：検討種類のひびわれが発生したグループで、所定応力比以上または応力差以上で、かつ所定応力継続時間以上となった件数

B ：ひびわれが確認されなかったグループで、所定応力継続時間以下の件数

C ：検討種類のひびわれ発生が確認された件数

D ：ひびわれが発生していないと報告されている件数

4. ひびわれ予測適合率による考察

(1) ひびわれの発生原因

本報告で使用したひびわれの調査データは、発生時期は上部リフトの打設前日または前前日の調査日に行い、また、ひびわれの発生パターンはひびわれの発生方向 (横断、水平) について調査した。このような方法で調査したデータであるために、ひびわれの発生原因を特定することはできないが、発生パターンおよび時期から定性的には外部拘束が主たる原因と考えられた。

さらに、表一6に示したように、2つの計算方法とも、ひびわれの予測適合率が、

$$(\text{計算位置上部の予測適合率}) < (\text{計算位置下部の予測適合率})$$

であることから、大多数のブロックについてのひびわれの原因は、内部拘束の影響より外部拘束の影響の方が大きかったものと判断される。

このことから、本報告では応力比または応力差の P グループとその継続時間を考慮して判断 (予測) する Q グループについて、発生したひびわれが上面と下端のいずれかまたは両方が発生している場合を合わせて「両者」欄に記して考察した。

(2) 応力比または応力差の継続時間を考慮した効果
従来の応力比または応力差だけによるひびわれ予測適合率と、その応力継続時間を考慮した場合のひびわれ予測適合率とについて、上面ひびわれグループおよび下端グループごとに比較すると、ほとんどの場合応力継続時間を考慮した方が高率である。また、ひびわれ種類に関係なくいずれかのひびわれが発生した場合の、ひびわれ予測適合率の差は表一6の「両者適合率増加」欄に示したように、応力継続時間を考慮した方が数%高率になっている。

このことは、ひびわれ発生が応力継続時間が長い場合にひびわれ発生確率が高くなると考えられ、クリープ破壊もあり得ることを予想させられる。

(3) 応力級別と応力継続時間の関係

各計算方法ともひびわれグループ別に、表-5で応力級別が低ければ応力継続時間が長く、反対に高い応力級別では応力継続時間が短い傾向がある。このようなことから、式(12)により応力級別と応力継続時間の積を計算した結果を表-5右側に示した。その結果は一定値に近いとはいいがたいばらつきがみられるが、応力級別から応力継続時間を仮定する一応の目安とするために、各計算方法別に平均値を示した。

$$M = SH \dots\dots\dots(12)$$

ここに、

M: 判定用応力継続時間係数

S: 応力比または応力差の下限值

H: 応力比または応力差の級別で最高ひびわれ予測適合率が得られた応力継続時間 (h)

(4) 応力計算方法の比較

応力計算方法として、コンベンションライン法(クリープ係数はリュッシュ法)と簡易増分応力法(クリープ係数=リュッシュ法・外部拘束=ACI法の組合せと、クリープ係数=桑原法・外部拘束=小野法の組合せの2種類)で計算した。その応力計算検討位置別に応力級別の中で、ひびわれ予測適合率が最高となる場合でかつ50%以上の場合のみ、応力級別とひびわれ予測適合率を表-6に示した。

ここでひびわれ予測適合率が高い計算方法を選択する一例として、参考までに表-6の中でひびわれ予測適合率をひびわれ種類別(表の縦列)に比較し、最高予測率となる計算方法に*印を付すことを試みた。このような選択方法が適切とは必ずしもいえないが、備考欄に記したように*印が3あるのは、温度応力計算=簡易増分応力法、クリープ係数=リュッシュ法・拘束度はACI法

表-5 各応力計算法・応力比(または差)のひびわれ予測適合率計算結果一覧表

計算方法	整理No	クリープと拘束の計算方法の組合せ		応力計算の検討位置	応力比または応力差。kgf/cm	応力継続時間を考慮した予測適合率						両者予測適合率の増加	最高予測率となる応力継続時間と応力比または応力差との積							
		Creep	拘束			応力等だけによる従来のひびわれ予測適合率P(%)		上 面		下 端			両 者		上 面	下 端	両 者	総平均		
						上 面	下 端	時間	Q(%)	時間	Q(%)		時間	Q(%)						
コンベンションライン法	1	Rusch	Comp.	上部	0.075				66	75	79	56	84	57	7	7	5.0	5.9	6.3	5.20
	2	Rusch	Comp.	"	0.100				54	75	67	56	67	7	7	5.4	6.7	6.7		
	3	Rusch	Comp.	"	0.125				42	76	42	56	42	8	8	5.3	5.3	5.3		
	4	Rusch	Comp.	"	0.150	51			32	77	32	55	32	7	7	4.8	4.8	4.8		
	5	Rusch	Comp.	"	0.175	54			30	65	35	51	30	3	3	5.3	6.1	5.3		
	6	Rusch	Comp.	下部	0.075	70	54	55	42	84	42	58	42	60	5	3.2	3.2	3.2	No6-9の平均 1.92	
	7	Rusch	Comp.	"	0.100	80	56	59	19	85	19	59	19	2	1.9	1.9	1.9			
	8	Rusch	Comp.	"	0.125	73	54	56	12	73	17	57	14	2	1.5	2.1	1.8			
	9	Rusch	Comp.	"	0.150	51	52	53	5	51	6	52	6	0	0.8	0.9	0.9			
	10	Rusch	Comp.	"	0.175									2						
11	Rusch	Comp.	上下の差	5.0				5						2		90	90	省略		
12	Rusch	Comp.	"	7.5						18	52	18	52							
13	Rusch	Comp.	"	10.0																
14	Rusch	Comp.	"	12.5																
15	Rusch	Comp.	"	15.0																
簡易増分応力法	16	Rusch	ACI	上部	0.075				135	51						10.1			No19-20の平均 2.07	
	17	Rusch	ACI	"	0.100															
	18	Rusch	ACI	"	0.125	54			54	72	13	53	15	5	2.3	2.0	2.3			
	19	Rusch	ACI	"	0.150	61		51	15	69	16	55	15	5	1.6	2.8	1.6			
	20	Rusch	ACI	"	0.175	66			9	69	16	53	9	5	1.6	2.8	1.6			
	16	桑原	小野	上部	0.075				90	56						6.8			No18-20の平均 1.75	
	17	桑原	小野	"	0.100	51			47	56					4.7					
	18	桑原	小野	"	0.125	51			16	63	18	51	16	3	2.0	2.3	2.0			
	19	桑原	小野	"	0.150	55		51	8	71	11	55	9	6	1.2	1.7	2.0			
	20	桑原	小野	"	0.175	61			9	66	9	56	9	6	1.6	1.6	1.6			
21	Rusch	ACI	下部	0.075	53	53	53	75	76	110	58	110	59	6	5.6	8.3	8.3	5.78		
22	Rusch	ACI	"	0.100	54	53	53	58	80	71	58	58	6	5.8	7.1	5.8				
23	Rusch	ACI	"	0.125	55	52	52	43	85	53	60	64	7	5.4	6.6	5.3				
24	Rusch	ACI	"	0.150	62	56	56	35	85	36	60	36	5	5.3	5.4	5.4				
25	Rusch	ACI	"	0.175	70	55	57	24	85	24	59	24	5	4.2	4.2	4.2				
21	桑原	小野	下部	0.075	51	51	51	39	76	56	57	46	58	7	2.9	4.2	3.5	2.75		
22	桑原	小野	"	0.100	53	53	53	27	82	39	57	32	5	2.7	3.9	3.2				
23	桑原	小野	"	0.125	54	54	54	20	81	28	57	25	5	2.5	3.5	3.1				
24	桑原	小野	"	0.150	59	52	58	14	83	14	58	14	6	2.1	2.1	2.1				
25	桑原	小野	"	0.175	59	56	53	11	78	9	56	11	7	1.9	1.6	1.9				
26	Rusch	ACI	上下の差	5.0	53			82	56	57	55	57	55	5	410	285	285	265.6		
27	Rusch	ACI	"	7.5	61	51	52	35	57	30	53	80	5	263	225	600				
28	Rusch	ACI	"	10.0	66	57	59	19	61	19	53	19	2	190	190	190				
29	Rusch	ACI	"	12.5	59		51	18	61	19	53	19	2	225	238	163				
30	Rusch	ACI	"	15.0	63		51	5	63	13	51	30	3	75	195	450				
26	桑原	小野	上下の差	5.0	58			53	64	40	60	40	9	265	200	200	258.3			
27	桑原	小野	"	7.5	71	53	55	31	77	31	59	26	4	233	233	195				
28	桑原	小野	"	10.0	68		51	23	70	18	52	38	3	230	180	380				
29	桑原	小野	"	12.5	75	54	56	22	69	18	52	17	0	275	225	213				
30	桑原	小野	"	15.0	68	53	54	6	68	22	55	24	1	90	330	360				

注) 上面=上面横断ひびわれグループとなしグループの平均 下端=下端水平ひびわれグループとなしグループの平均 両者=上面+下端部ひびわれグループとなしグループの平均

表-6 各応力計算法別ひびわれ予測適合率の高い応力比（または差）級別とその判定用継続時間

応力計算の方法	整理No	計算方法の仮定		応力計算の検 討位置	応力比・応力等だけによる予測適合率						応力継続時間を考慮した予測適合率						(備考) この表で縦列の中で 最高予測適合率となっ た*印の数(同率は *を付してある。)	
		Creep	拘束		上面の場合		下端の場合		両者を含む		上面の場合		下端の場合		両者を含む			
					級別	P(%)	級別	P(%)	級別	P(%)	級別	Q(%)	級別	Q(%)	級別	Q(%)		
コンベン セイショ ンライ ン	1~5	Rusch Rusch Rusch	Comp. Comp. Comp.	上部	.175	54												応力のみの場合=2 応力継続時間考慮 の場合=1
	6~10 11~15			下部 上下差	.100	* 80	.100	56	.100	* 59	.150	77	.075	56	.125	58	.100	
簡易増分	16~20 21~25 26~30	Rusch Rusch Rusch	ACI ACI ACI	上部	.175	66												応力のみの場合=2 応力継続時間考慮 の場合=3
	下部 上下差			.175	70	.150	56	.175	57	.150	72	.150	55	.150	57	.125	* 64	
応力法	16~20 21~25 26~30	桑原 桑原 桑原	小野 小野 小野	上部	.175	61											応力のみの場合=0 応力継続時間考慮 の場合=1	
	下部 上下差			.175	70	.175	56	.175	58	.150	83	.150	58	.150	59	.175		60
					12.5	75	12.5	54	12.5	56	7.5	77	5.0	* 60	5.0	5.0	59	

とした組合せで、応力比を0.125とし、その応力比の継続時間を45時間で判断する方法で、「両者」のひびわれ予測適合率が最高の64%が得られているので、今後計算法の検討候補として挙げられる。

5. ま と め

本報告は、ダムコンクリートの温度ひびわれ発生の評価方法について、Aダムにおけるひびわれ等の調査結果をもとにして検討したものである。得られた主な成果を列挙すれば、次のとおりである。

(1) 上面ひびわれおよび下端ひびわれの両グループを合わせた場合のひびわれ予測適合率は、各計算方法について応力検討位置が下端の場合に高くなる傾向が認められた。これは、外部拘束応力が卓越していたことによるものと考えられた。

(2) 引張応力と圧縮強度の比だけでひびわれを予測する場合よりも、その応力比が継続する時間を考慮することを試みた結果、ひびわれ予測適合率は従来の応力比だけで予測した場合よりも数%高く得られた。

応力比の判定継続時間の目安としては、表-5最右欄の値を示した値を許容応力比で除した値とする(たとえば簡易増分応力法でリュッシュ・ACIの組合せの場合では、検討位置が上部の場合には2.07、下部の場合に5.78を応力比で除した値が継続時間の目安になる)。

今回の結果では応力比とその継続時間の積の値にばらつきが多く、必ずしも一定とはいいがたいが、このような傾向をもつことは、低い応力比(0.75以上)でも長時間継続すればひびわれの可能性があるように思われる。また、前記の継続時間を考慮してひびわれ予測適合率が数%高く得られることと考え合せると、クリープ破壊の可能性が高くなるように思われる。

(3) どの計算方法が最もひびわれ予測適合率が高い方法であるかについては、今回だけのデータで即判断で

きないことである。しかし、今後計算方法を比較する際の検討候補として、表-6「両者」欄で60%以上が得られた次の2つを挙げられる。

コンベンセイションライン法でクリープをリュッシュ法とした場合には、応力比を0.10として継続時間を19時間とした場合。

簡易増分応力法でリュッシュ・ACIの組合せの場合で、応力比は0.125として応力継続時間を約46時間とした場合。

(4) 上下の応力差については、コンベンセイションライン法ではひびわれ予測適合率が50%以下であった。簡易増分応力法では、クリープを桑原法・外部拘束度を小野法とした場合に、比較的良好な結果が得られた。

最後に、本報告を公表する許可をいただいた関係者および仲介していただいた関係者に厚く御礼申し上げるとともに、本報告が今後のダムコンクリートにおけるひびわれ制御に少しでも役立てていただければ幸甚である。

参 考 文 献

- 1) 奥島正一・小坂義夫：人工軽量コンクリートの力学的性質、材料15-157, 1966.
- 2) 長島 弘：寒中コンクリート断熱保温養生の実用図表作成、コンクリート工学論文No.79.11-1, コンクリート工学, 昭和54年11月.
- 3) 長島 弘：コンクリート打込み後の温度変化に関する研究、日本建築学会論文報告集, No.268, No.269, No.273, No.281.
- 4) 小野 定：マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する研究、学位論文, 昭和59年.
- 5) 桑原隆司：マスコンクリートの温度ひびわれ発生の危険性評価方法に関する研究、学位論文, 昭和59年.
- 6) Rusch, H. and Jungwirth, D. (百島裕信訳)：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, (1988.3.17・受付)