

清水建設株式会社 正員 小野 定

清水建設株式会社 正員 ○楠田泰仁

清水建設株式会社 正員 江渡正満

1. はじめに

セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法の一つとして、弾性解による簡易法が使われている。簡易法による算定式を用いて温度応力を求める場合、着目する材令の物性と温度から求める値（簡易解と称する）と各タイムステップの応力増分を累積した値（増分解と称する）の2つがある。本報告は、増分解と簡易解との比率 K （＝増分解／簡易解）をパラメータ解析により求め、さらに統計手法を適用して、各要因が K に及ぼす影響および K の推定方法について考察したものである。

2. 簡易法による温度応力の算定式

筆者らの提案する内部拘束および外部拘束による温度応力の算定式は次に示すようである。

〔簡易解〕 内部拘束の場合…… $(\sigma_x)_{\max}^t = 3/8 \cdot \alpha_c E_e(t) / (1 - \nu_c) \cdot \Delta T_{s,\max}^t$

外部拘束の場合…… $(\sigma_x)_{\max}^t = R \alpha_c E_e(t) \cdot (T_{m,\max} - T_m^t)$

〔増分解〕 内部拘束の場合…… $(\sigma_x)_{\max}^t = 3/8 \cdot \alpha_c / (1 - \nu_c) \cdot \sum_{i=1}^n [E_e(i-1+i)/2] \cdot (\Delta T_{s,\max}^i - \Delta T_{s,\max}^{i-1})$

外部拘束の場合…… $(\sigma_x)_{\max}^t = R \alpha_c \cdot \sum_{i=j+1}^n [E_e((i-1+i)/2) \cdot (T_{m,\max}^i - T_m^i)]$

ここに、 $(\sigma_x)_{\max}^t$ ：材令 t 日における x 方向引張応力の最大値（ kgf/cm^2 ）、 ν_c ：ポアソン比、 α_c ：線膨張係数（ $1/^\circ\text{C}$ ）、 $E_e(t)$ ：材令 t 日における有効弾性係数（ kgf/cm^2 ）、 $\Delta T_{s,\max}^t$ ：材令 t 日における内部温度と表面温度の差の最大値（ $^\circ\text{C}$ ）、 R ：外部拘束度、 $T_{m,\max}$ ：部材内平均温度の最大値（ $^\circ\text{C}$ ）、 T_m^t ：材令 t 日における部材内平均温度（ $^\circ\text{C}$ ）、 j ： $T_{m,\max}$ を示した時刻

3. パラメータ解析

パラメータ解析に用いた要因と水準を表-1に示す。解析ケース総数は324ケースであり、各ケースについて内部温度の最大値を示した材令（DAYmax）における内部拘束による温度応力の比率 K_1 と材令30日における外部拘束による温度応力の比率 K_2 を求めた。ただし、ポアソン比 ν_c は0.167、線膨張係数 α_c は $10 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 、外部拘束度は1.0とした。

4. 統計解析

パラメータ解析から得られた K_1 、 K_2 に対して、分散分析および数量化理論I類による解析を行った。

(1) 分散分析

T_p 、 Q_∞ 、 r 、 D 、 $\varphi(t)$ を変動要因として分散分析を行った。表-2に4因子交互作用まで考慮した分散分析表を示

表-1 要因と水準

要因	水準
打込み温度 T_p ($^\circ\text{C}$)	1 9.4
	2 22.2
	3 32.1
	4 18.9
外気温 (東京地方)	1 図-1の2月から4月 (T_p が水準1の場合)
	2 図-1の5月から7月 (T_p が水準2の場合)
	3 図-1の8月から10月 (T_p が水準3の場合)
	4 図-1の11月から1月 (T_p が水準4の場合)
終局断熱温度上昇量 Q_∞ ($^\circ\text{C}$)	1 2.0
	2 3.0
	3 5.0
温度上昇速度に関する実験定数 r	1 0.5
	2 1.0
	3 2.0
リフト高 D (mm)	1 0.5
	2 1.5
	3 3.0
静弾性係数 (kgf/cm^2)	$E_c(t) = \frac{10000t}{0.064578 + 0.028653t}$
クリープ係数	1 $\varphi(t) = \frac{t}{5.0712051 + 1.0115895t}$
	2 $\varphi(t) = \frac{t}{3.8204911 + 0.4977114t}$
	3 $\varphi(t) = \frac{t}{1.8163764 + 0.3324492t}$

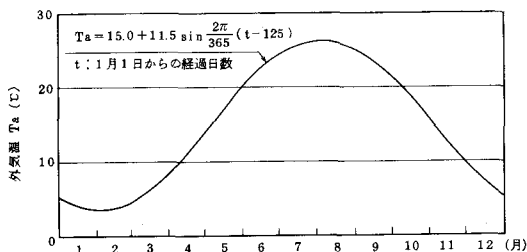


図-1 解析に使用した外気温

注1) $Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-rt})$

注2) $E_e(t) = \frac{1}{1 + \varphi(t)} \times E_c(t)$

注3) t ：材令(日)

表-2 分散分析表

要因	内部拘束に関する比率 K_1					外部拘束に関する比率 K_2				
	偏差平方和	自由度	不偏分散	F 値	寄与率 (%)	偏差平方和	自由度	不偏分散	F 値	寄与率 (%)
φ	0.39369	2	0.19685	6562**	16.00	1.04535	2	0.52267	1452**	53.20
r	0.05388	2	0.02694	898**	2.20	0.10696	2	0.05348	149**	5.40
$\varphi \times r$	0.01456	4	0.00364	121**	0.60	0.03108	4	0.00777	21.6**	1.50
Q_m	0.01772	2	0.00886	295**	0.50	0.00097	2	0.00049	1.36	0.01
$\varphi \times Q_m$	0.00032	4	0.00008	2.70*	0.00	0.00074	4	0.00019	0.52	-0.03
$r \times Q_m$	0.01647	4	0.00412	137**	0.01	0.00109	4	0.00027	0.75	-0.02
$\varphi \times r \times Q_m$	0.00042	8	0.00005	1.70	0.00	0.00252	8	0.00031	0.86	-0.02
T_p	0.03842	3	0.01281	427**	1.60	0.01003	3	0.00334	9.31**	0.45
$\varphi \times T_p$	0.00065	6	0.00011	3.70**	0.02	0.01274	6	0.00212	5.89**	0.53
$r \times T_p$	0.05321	6	0.00887	296**	2.20	0.00245	6	0.00041	1.14	0.01
$\varphi \times r \times T_p$	0.00117	12	0.00010	3.30**	0.03	0.00415	12	0.00035	0.97	0.00
$Q_m \times T_p$	0.01395	6	0.00233	77.7**	0.60	0.00471	6	0.00078	2.17	0.13
$\varphi \times Q_m \times T_p$	0.00118	12	0.00010	3.33**	0.03	0.00628	12	0.00052	1.44	0.09
$r \times Q_m \times T_p$	0.00974	12	0.00081	27.0**	0.40	0.00497	12	0.00041	1.14	0.03
$\varphi \times r \times Q_m \times T_p$	0.00115	24	0.00005	1.70	0.01	0.00736	24	0.00031	0.86	-0.07
D	0.97784	2	0.48892	16297**	39.70	0.34924	2	0.17462	485**	17.70
$\varphi \times D$	0.02666	4	0.00666	222**	1.00	0.17733	4	0.04433	123**	8.90
$r \times D$	0.68901	4	0.17225	5742**	28.00	0.08468	4	0.02117	58.6**	4.20
$\varphi \times r \times D$	0.00247	8	0.00031	10.3**	0.09	0.00430	8	0.00054	1.50	0.07
$Q_m \times D$	0.00864	4	0.00216	72.0**	0.35	0.00471	4	0.00118	3.28**	0.20
$\varphi \times Q_m \times D$	0.00054	8	0.00007	2.33*	0.01	0.00297	8	0.00037	1.02	0.00
$r \times Q_m \times D$	0.01054	8	0.00132	44.0**	0.42	0.00248	8	0.00031	0.86	-0.02
$\varphi \times r \times Q_m \times D$	0.00117	16	0.00007	2.33*	0.02	0.00473	16	0.00030	0.83	-0.05
$T_p \times D$	0.03469	6	0.00578	193**	1.40	0.02304	6	0.00384	10.7**	1.10
$\varphi \times T_p \times D$	0.00132	12	0.00011	3.67**	0.04	0.01626	12	0.00135	3.75**	0.61
$r \times T_p \times D$	0.06456	12	0.00538	179**	0.03	0.00633	12	0.00053	1.47	0.10
$\varphi \times r \times T_p \times D$	0.00173	24	0.00007	2.33**	0.04	0.00708	24	0.00029	0.81	-0.08
$Q_m \times T_p \times D$	0.00983	12	0.00082	27.3**	0.04	0.00653	12	0.00054	1.50	0.11
$\varphi \times Q_m \times T_p \times D$	0.00148	24	0.00006	2.00*	0.03	0.00684	24	0.00037	1.02	0.01
$r \times Q_m \times T_p \times D$	0.01397	24	0.00058	19.3**	0.53	0.00748	24	0.00031	0.86	-0.05
誤差項 e	0.00167	48	0.00003			0.01728	48	0.00036		
計	2.46266	323				1.96465	323			

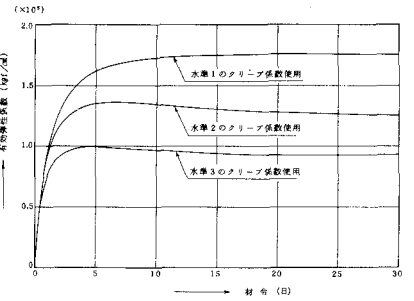


図-2 有効弾性係数の経時変化

表-3 数量化理論I類の解析結果

$K_1 = 0.5094 + 0.0449X_1 + 0.0190X_2 - 0.0783X_3 - 0.0459X_4$		X_1 : リフト高D(mm)
サンプル数 324 寄与率 0.436 自由度 319 F 値 61.80**		X_2 : 断熱温度上昇 速度に関する 実験定数 r
$K_2 = 1.0229 + 0.0273X_1 - 0.0289X_2 - 0.1193X_3 - 0.0066X_4$		X_3 : クリープ係数 水準1の場合 を1.0とする
サンプル数 324 寄与率 0.676 自由度 319 F 値 166.3**		X_4 : クリープ係数 水準2の場合 を1.0とする

す。寄与率の大きい要因を順に5つ採ると、 K_1 の場合はD、 $r \times D$ 、 $\varphi(t)$ 、 r 、 $r \times T_p$ である。また、 K_2 の場合は $\varphi(t)$ 、D、 $\varphi(t) \times D$ 、 r 、 $r \times D$ である。 K_1 および K_2 に対して、共通して影響の大きい要因はD、 $\varphi(t)$ 、 r であり、この理由は次のように考えられる。簡易解と増分解の大きな違いは有効弾性係数を求める際の材令の取り方が異なること、および増分解では図-3に示したような有効弾性係数の経時変化を考慮するのに対し、簡易解では考慮しないことである。Dおよび r の変動は $\Delta T_{s, \max}(\text{DAYmaxの時の}\Delta T_{s, \max}^t)$ および $T_{m, \max}$ に影響を及ぼすとともに、DAYmaxにも影響を及ぼす。すなわち、有効弾性係数を求める際の材令の取り方の違いによる簡易解と増分解との差に影響を及ぼすことになる。また、 $\varphi(t)$ の変動は有効弾性係数の経時変化に大きな影響を及ぼすため、 K_1 および K_2 に対しても大きな影響を及ぼすことになる。

(2) 数量化理論I類

T_p 、 Q_m 、 r 、D、 $\varphi(t)$ を独立変数として数量化理論I類による解析を行った。ただし、 $\varphi(t)$ は質的変量として扱った。解析は変数増減法により行い、変数の取り込み基準は偏回帰係数が5%で有意になることとした。解析結果を表-3に示す。表から、 K_1 および K_2 の回帰式は共にD、 $\varphi(t)$ 、 r で構成されていることがわかる。このことは、表-2に示した分散分析の結果と一致している。 K_1 および K_2 の回帰式の寄与率はそれぞれ、43.6%、67.6%である。これらの回帰式の寄与率をさらに大きくするには、分散分析の結果、特性値 K_1 、 K_2 の変動に対して寄与率の大きい $r \times D$ 、 $\varphi(t) \times D$ 等を独立変数に取り込んでいく必要があると考えられる。

5. まとめ

簡易法による算定式から求まる増分解と簡易解との比率Kをパラメータ解析により求め、統計手法を適用して検討を加えた結果、 K_1 および K_2 の変動に対してはD、 $\varphi(t)$ 、 r が大きく影響していることが明らかになった。本研究の結果、簡易解で算定した結果に補正係数 K_1 あるいは K_2 を乗することにより、手軽に増分解に近似した結果を推定できることが認められた。