

V-11

寒冷地コンクリート構造物の高品質施工のための 各種施工と三次元温度応力連成解析

北見工業大学 正会員 桜井 宏	北海道大学 フェロー員 佐伯 昇
北見工業大学 正会員 岡田 包儀	北海道大学 学生員 金 南旭
北見工業大学 フェロー員 鮎田 耕一	(株)西村組 正会員 吉田 稔
北見工業大学○学生員 坪井裕香里	(株)西村組 正会員 米田 克幸

1. まえがき

最近高耐久性や意匠的に美観を重視する土木構造物が建設され、ひび割れを抑制する高品質施工が要求されるようになった。そこで、寒冷地のコンクリート構造物は、冬期間に凍結融解を受け表面剥離等の凍害が発生するため、W/Cを低く抑えたり、セメント量や空気量を増加する等の対策をとっている。しかし、セメント量を多くすると断面の厚い構造物や夏期の嵩上げ等の施工時に、水和熱によりコンクリート温度が上昇しひび割れが発生する可能性が高くなる。また寒冷地のコンクリート構造物は、施工直後にひび割れが発生しなくても冬期間の気温低下時に発生するという厳しい条件である。

本研究は、寒冷地のコンクリート構造物のひび割れを抑制し品質を向上するため、各施工法の検討と温度、歪み及び応力等の三次元温度応力連成解析を試みる。

2. 検討方法

2. 1. 1 検討手順

各施工及び気象条件を入力し、現況の観察等による比較をし品質向上のための検討点を把握する。

2. 1. 2 連成解析の理論

温度と応力を以下の式(1)から(3)で連成解析する。

温度と応力を交互に解く温度の解析は水和によるセメントの発熱を考慮し非定常三次元熱伝導の問題として式(1)で解析する。

$$\partial T / \partial t = \lambda c / C c \rho c (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + d Q (t) / dt \cdots \text{式(1)}$$

ここで、T:コンクリート温度(℃)、t:時間(h)、Q:断熱温度上昇量(℃)、
λc:熱伝導率(kcal/mh℃)、Cc:比熱(kcal/kg℃)、ρc:密度(kg/m³)とする。

式(1)で求めた値で熱伝導、歪み及び応力を連成解析で式(2)、(3)で求める。

$$M u'' + D(T) u' + K(T) u = f \cdots \text{式(2)}$$

$$C(T) T' + k(T) T = Q + Q^1 \cdots \text{式(3)}$$

Study on analyzing for improving construction quality of concrete structure in cold region
by 3dimensional coupling of Thermo and Stress.

By Hiroshi Sakurai, Kaneyosi Okada, Kouichi Ayuta, Noboru Saeki, Nanngyoku Kimu,
Minoru Yoshida, Katsuyuki Maida and Yukari Tsuboi

ここで、 u ：歪み、 F ：荷重ベクトル、 Q ：熱流束、 M ：質量マトリックス、
 $D(T)$ ：減衰マトリックス、 $K(T)$ ：剛性マトリックス、
 $C(T)$ ：温度依存性を考慮した熱容量マトリックス、
 $k(T)$ ：温度依存性を考慮した熱伝導マトリックスとする。

$Q^{\wedge}I$ は非弾性仕事による発熱量つまり水和熱、 $D(T)u$ はクリープである。

この解析システムはMARK・MENTAT IIを使用し、基本物性モデルを構築し、コンクリート構造物の温度、歪み及び応力解析評価システムとして開発された。

2. 1. 3 ひび割れ指数の定義

各材令におけるひび割れ指数 $I_{cr}(t)$ を式(4)のように定義する。

$$I_{cr}(t) = f(t) / \sigma t(t) \cdots \cdots \text{式 (4)}$$

ここで、 $f(t)$ ：各材令の引張強度 $\sigma t(t)$ ：各材令の応力(引っ張りを正)とする。

ひび割れの状況とひび割れ指数の関係を表2.1.1に示す。

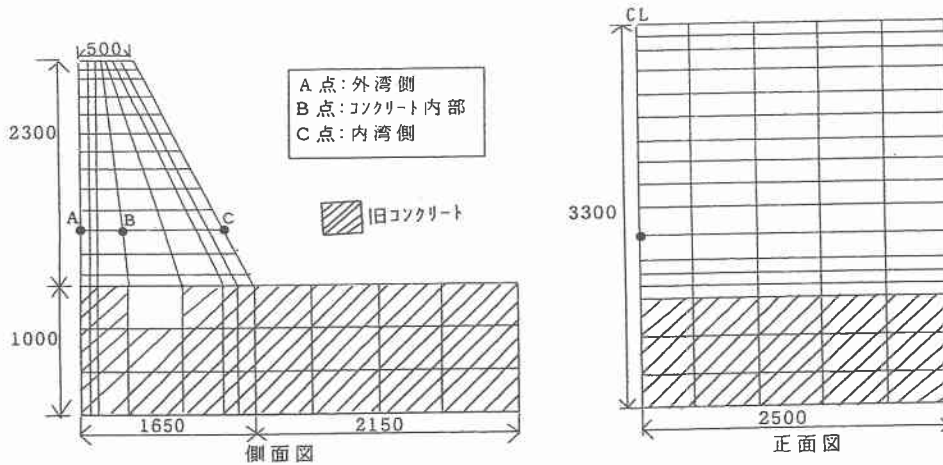
表 2. 1. 1 ひび割れの状況とひび割れ指数の関係

ひびわれの状況	ひびわれ指数
ひび割れを防止したい場合	1.5以上
ひび割れの発生を制限したい場合	1.2以上1.5未満
有害なひび割れの発生を制限したい場合	0.7以上1.2未満

2. 2. 1 対象モデル

解析対象は図2.2.1に示した一般的な形状の防波堤で、三次元のモデルAとする。モデルのブロック長は5mで対称中心位置の2.5mを固定端として片側を解析した。

図 2.2.1 対象モデル



2. 2. 2 解析条件

本解析で用いた構造物の 配合条件及び解析条件を表2.2.1と表2.2.2に示す。本配合は海洋構造物の 一般的配合である。

表2.2.1 配合条件 (ケース1:Normal, ケース2:ファイバー)

ケース	水セメント比	細骨材率	セメント	水	細骨材	粗骨材	S.F	混和剤
	%	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
1	48.6	38.3	282	137	698	1248	—	0.56(AE剤)
2	48.6	50.0	282	137	941	959	117.75 (0.72%)	2.03(高性能 AE減水剤)

表2.2.2 解析条件 (ケース1:Normal, ケース2:ファイバー)

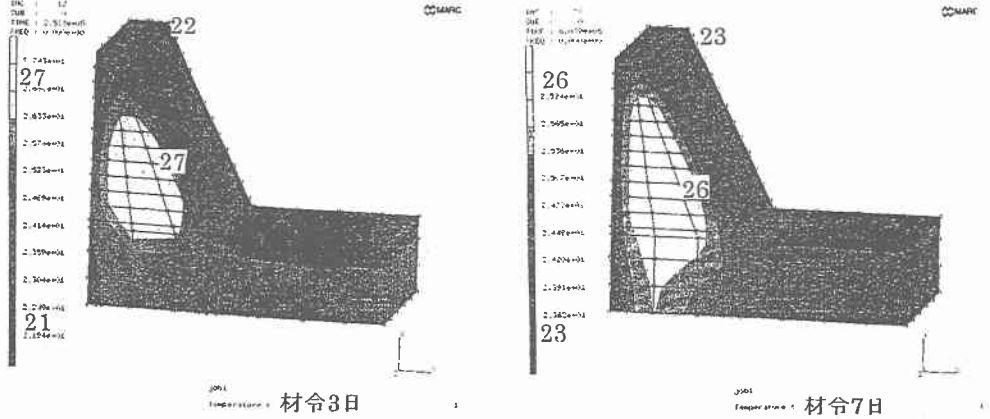
	ケース	初期温度 ℃	比熱 kcal/kg℃	熱伝導率 kcal/mh℃	密度 kg/m ³	膨張係数 1/℃	ヤング率 kg/m ²	ポアソン比
新 コンクリート	1	20.0	0.25	2.2	2365	10*10 ^{^-6}	2.460*10 ^{^9}	0.2
	2	20.0	0.25	2.2	2439	10*10 ^{^-6}	2.455*10 ^{^9}	0.2
旧 コンクリート	1	17.0	0.25	2.2	2365	10*10 ^{^-6}	2.460*10 ^{^9}	0.2
	2	17.0	0.248	2.2	2365	10*10 ^{^-6}	2.460*10 ^{^9}	0.2

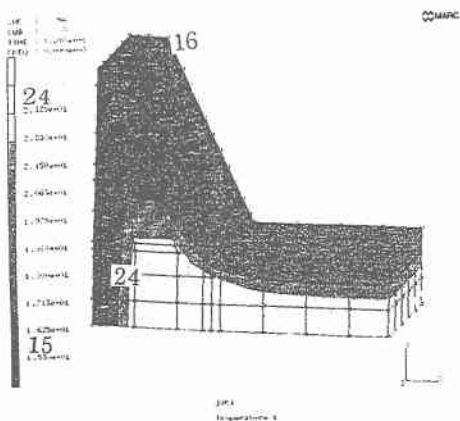
3. 解析結果

3. 1. 1 解析図

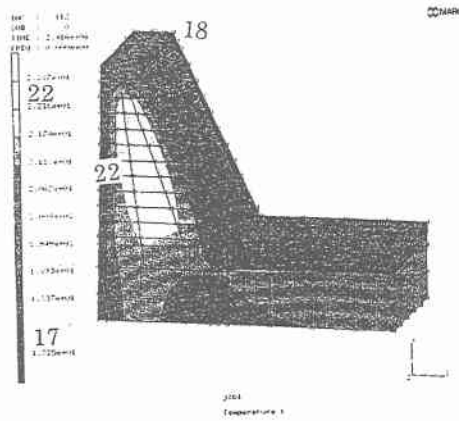
NormalコンクリートのモデルAにおけるの温度の分布を図3.1.1、歪みの分布を図3.1.2、応力分布を図3.1.3に解析結果を示す。

まず温度の分布は、材令3日まで水和熱が発生しおよそ27.5℃とコンクリート温度が高くなる。脱型後その熱が外側と下のほうへと伝達される。しかし、この気象条件はコンクリートの打設に適した外気温であったので、コンクリートの温度が急激に下がることはなかった。次に歪みの分布を見ると、ほとんどの材令において新コンクリートと旧コンクリートの境界面上部50cmの水平方向の値が高くなっている。初期材令でおよそ90*10^{^-6}となっている。最後に応力の分布を見ると、歪みと同じ所の表面部分と新コンクリートと旧コンクリートの境目で値が高くなっている。材令3日目では15kgf/cm^{^2}、材令14日目では17kgf/cm^{^2}となっている。これらをまとめると、初期材令で新コンクリートと旧コンクリートの境目から50cmぐらい上に水平方向にひび割れが発生しやすいと考えられる。



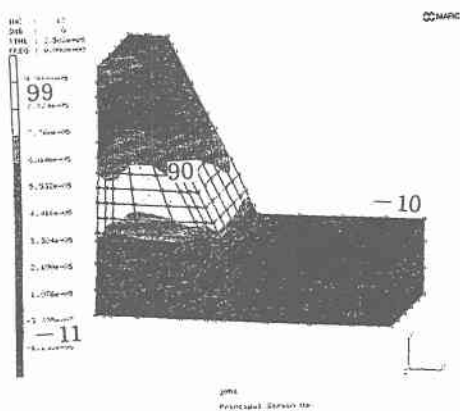


材令14日 (°C)

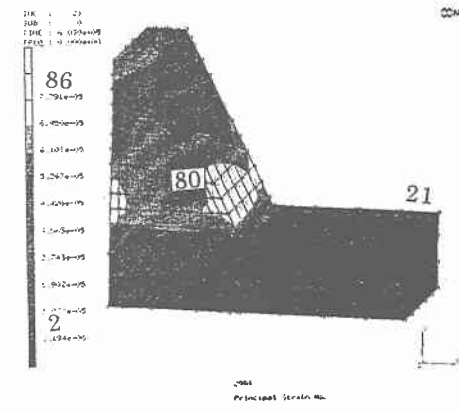


材令28日

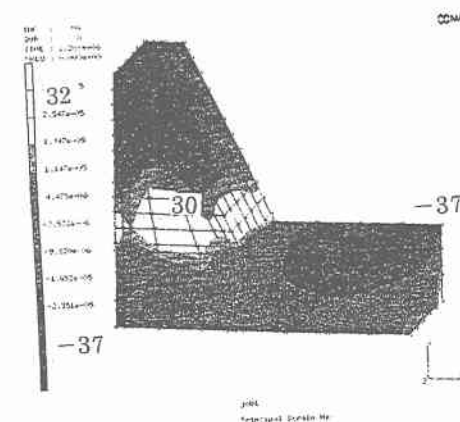
図3.1.1 温度分布(モデルA)



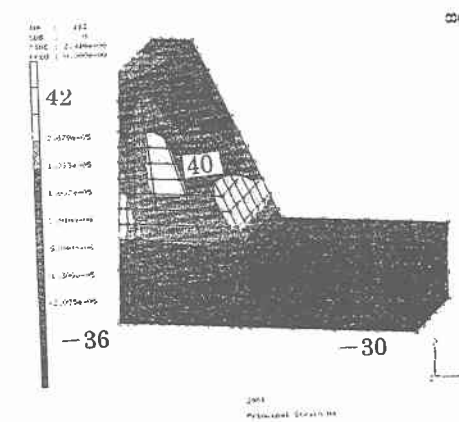
材令3日



材令7日

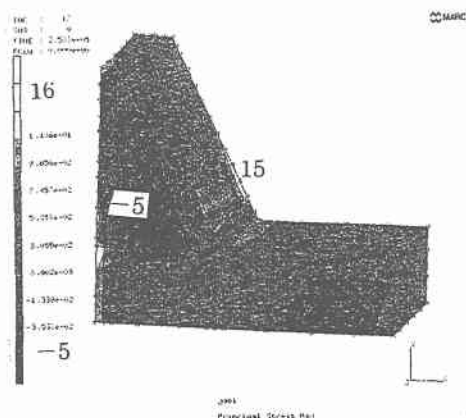


材令14日

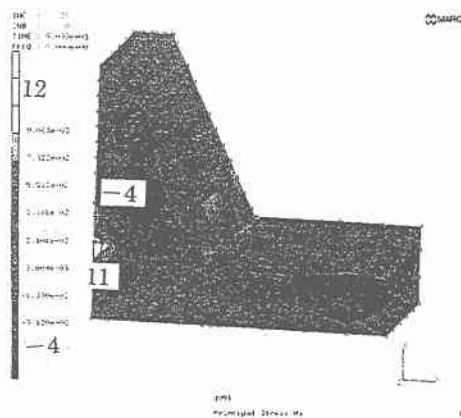


材令28日

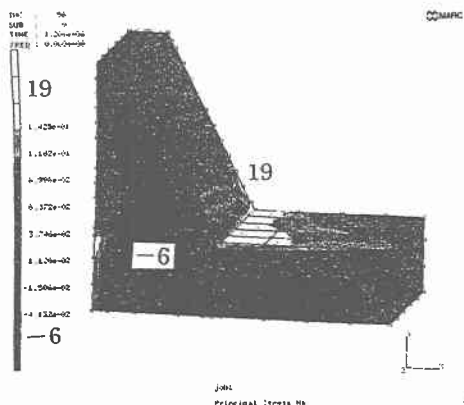
($\times 10^{-6}$)
図3.1.2 歪み分布(モデルA)



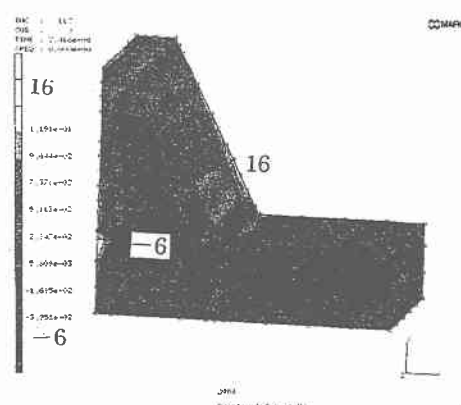
材令3日



材令7日



材令14日



材令28日

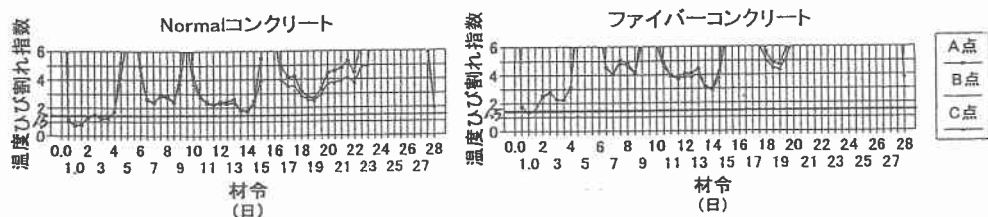
(kgf/cm²)

図3.1.3 応力分布(モデルA)

3. 1. 2 ひび割れ指数

Normalコンクリートのひびわれ指数の材令による変化を図3.1.2に、Normalコンクリートの値をファイバーコンクリートの引張強度で除して算出した、ファイバーコンクリートのひびわれ指数の材令による変化を図3.1.3に示す。現地の気象条件データを入れて解析すると、NormalコンクリートにおいてA点では材令1日～3.5日まで、C点では材令0.5日～3.5日までひび割れ指数1.5を切る。それに比べ、ファイバーコンクリートにおいてA点では材令1日～1.5日まで、C点では材令0.5日～材令1.5日までひび割れ指数1.5を切る。しかし、ひび割れ指数が1.5を切る期間は少なくなった。これらは、気象条件による温度の変動による影響も受けている。この結果からわかるように、ファイバーを入れることによって全体的にひび割れ指数の値が1～3大きくなる。これはひび割れの発生確率が少なくなると考えられる。しかし、初期のひび割れ指数の低下は避けられないが、脱型前なのであまり重要ではないと考えられる。なお、ファイバーコンクリートの引張強度は曲げ試験の結果から推定しました。

図3.1.2 Normalコンクリート及びファイバーコンクリートの
ひび割れ指数の材令による変化



3. 2 考察

3. 2. 1 解析精度の向上

本解析はクリープによる応力の緩和を考慮していないため、ひび割れ指数は安全側の値となっている。今後これらを逆解析等により考慮するとより精度の高い予測が可能となる。

3. 2. 2 寒冷地コンクリート構造物の高品質化

今回解析したモデルは、部材が比較的薄かったことと、1998/9/21～10/18の気象条件を用いたため、比較的ひび割れ指数は高めになったが、水和熱による温度上昇によりひび割れ指数が1.5を切るところがあった。これはファイバーコンクリートで1日間に低減できたが、材令1.5日までは1.5を切ってしまう。この打設が冬期になったら、さらにひび割れ指数は低くなると考えられる。それを防ぐためには、部材の温度降下速度が大きくならないよう、コンクリート温度をできるだけ緩やかに外気温に近づける方法をとる必要があると考えられる。

4. まとめ

寒冷地コンクリート構造物の三次元温度応力連成解析のまとめとして、①寒冷地コンクリート構造物では、ひび割れ等の可能性の把握と制御を効果的に検討するため、三次元温度応力連成解析が有効である。②寒冷地の構造物は、打設時にひび割れが入らなくても、一冬越すと凍害などによりひび割れが入ることがあるので、今後も引き続き検討する必要がある。③ファイバーを入れると脱型後のひび割れは防げるが、水和熱による1.5日までの初期材令のひび割れ指数の低下は避けられないので、できるだけ温度の上昇と降下速度を小さくする対策の検討が必要となってくる。

謝辞

本研究の遂行において、(株)西村組、日本マーク株式会社の関係者各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) コンクリート標準示方書・施工編, 土木学会
- 2) コンクリート工学ハンドブック, 近藤 泰夫・坂 静雄 監修, 朝倉書店