

論文

[1080] 円筒状構造物の外部拘束度に関する研究

正会員 ○江渡正満 (清水建設土木本部)
 正会員 木村克彦 (清水建設土木本部)
 正会員 小野 定 (清水建設土木本部)
 正会員 館崎真司 (清水建設北海道支店)

1. はじめに

LNG地下式貯槽軀体、人工島などで代表されるように、コンクリート構造物の大型化に伴って生ずる、マスコンクリートの温度ひびわれ制御は、重要な課題である。

温度ひびわれ制御について検討する場合、コンクリート打込み後のセメントの水和熱に起因するコンクリート温度解析、それに伴う温度応力の評価が重要なポイントになる。温度応力の解析方法としては、構造物細部の応力評価が可能である有限要素法がある。これに対し、構造物の応力を簡易的に求める方法としてはコンペンセーションプレーン法[1]や簡易法[2,3]があり、これらは、有限要素法などより計算する労力、費用が少なく済むため、構造物に発生する応力を容易に計算するには有用な方法である。

さて、簡易法で温度応力を推定するためには、コンクリートの力学定数、温度変化とともに、外部拘束度の評価が重要であり、小野[3]、ACI[4]、吉岡[5]などの方法が提案されている。しかし、これらの方法は、一方向に連続しているコンクリートブロックに対するものであり、LNG地下式貯槽の側壁のような円筒状構造物の場合は、一方向に連続している構造体に比べ、半径方向の変形により応力が緩和されるため発生する応力が相違すると考えられる。このため、簡易法を用いて円筒状構造物の温度応力をより精度よく推定するには、半径方向の変位を考慮して算定された拘束度を用いることが必要と考えられるが、現状では、円周方向および半径方向に同時に変位する円筒状構造物の外部拘束度に関する研究、報告は少ない。

本研究では、円筒状構造物の外部拘束度に及ぼす諸要因のうち影響が大きいと考えられる被拘束体と拘束体のヤング係数比、高さ比などの影響について有限要素法により解析的に検討し、その結果をもとに、外部拘束度を要因の関数として表わした。また、本論で提案した拘束度と既往の研究による拘束度の比較を行った。

2. 解析条件

2.1 解析モデルおよび境界条件

解析に用いたモデルおよ

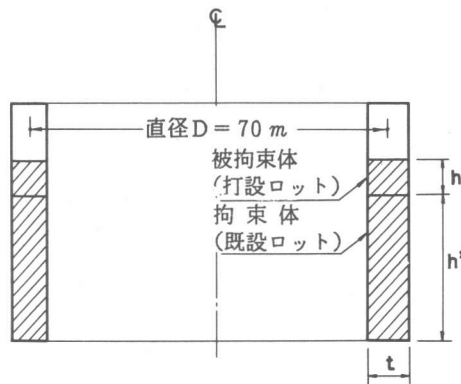


図-1 解析対象

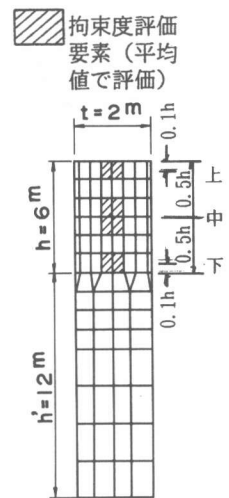


図-2 解析モデル例

び要素分割の一例を図-1および図-2に示す。図に示すように解析モデルは、地盤上にある直径 $D=70\text{m}$ の円筒状構造物を順次下から施工するケースをモデル化したもので、壁厚 t 、拘束体（既設部）の高さ h' および被拘束体（打設ロット）高さ h である。解析には、軸対称回転体モデルによる三次元温度応力解析プログラムを用いた。解析に用いる定数のうちヤング係数については一般に拘束度が被拘束体と拘束体のヤング係数比 E/E' の関数として与えられるため、 $E/E' = 0.5, 0.75, 1.0$ とし、拘束度の算定を容易にするため、 $E = 1.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ （一定）とした。拘束体および被拘束体のポアソン比は $\nu = 1/6$ 、熱膨張率 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ とした。また、被拘束体の温度降下量は $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ とした。

2.2 拘束度の定義

温度変化により発生する応力が式(1)で与えられるとし、外部拘束度 R は、式(2)で定義する。なお、(2)式の $\alpha \Delta T E$ は完全拘束時の応力を表わす。

$$\sigma_\theta = R \alpha \Delta T E \quad (1)$$

$$R = \frac{\sigma_\theta}{\alpha \Delta T E} \quad (2)$$

ここに、

- σ_θ : 温度降下 ΔT による被拘束体の円周方向 (θ) 応力
- R : 外部拘束度
- α : 熱膨張率
- ΔT : 温度降下量
- E : 被拘束体のヤング係数

2.3 解析ケースおよび解析要因

表-1に解析ケースの一覧表を示す。解析で取り上げた要因は、円筒状構造物の拘束度に影響を及ぼすと考えられる、拘束体と被拘束体の高さ h' および h 、壁厚 t 、被拘束体と拘束体のヤング係数比 E/E' である。モデル条件で設定した h, h', t の値はLNG地下タンクなどでの実績をふまえて決定した。No.1からNo.7のケースは、1ロットの高さ h を6mとし、順次施工していった場合に、拘束度に及ぼす E/E' および t の影響を検討するものである。No.4、No.9、No.12は既設部高さ $h' = 18\text{m}$ とした場合の打設ロット高さ h および E/E' の

表-1 解析ケース一覧

No	モデル条件			弾性係数比 E/E'		
	h (m)	h' (m)	t (m)	0.5	0.75	1.0
1	6.0	12.0	2.0	○	○	○
2	"	"	2.3	○	-	○
3	"	"	2.8	○	-	○
4	6.0	18.0	2.0	○	○	○
5	"	"	2.3	○	-	-
6	"	"	2.8	○	-	○
7	6.0	30.0	2.0	○	○	○
8	6.0	60.0	2.0	○	○	○
9	2.0	18.0	2.0	○	○	○
10	"	"	2.3	○	-	-
11	"	"	2.8	○	-	○
12	4.0	18.0	2.0	○	-	-
13	"	"	2.8	-	-	○

註) ○ は解析したケースを示す。

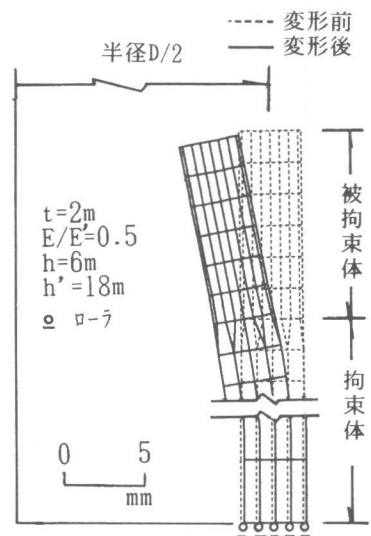


図-3 変形状態の一例

影響を検討するものである。また、構造物下端の境界条件の影響を検討するために、下端の境界条件を可動および固定とした場合についても解析を行った。さらに、被拘束体の温度上昇時と降下時の拘束度についても解析によって検討した。

解析条件で設定した要因の範囲を無次元化して示せば次のとおりである。

$$D/t = 25.0 \sim 35.0, \quad h'/h = 2.0 \sim 10.0$$

$$D/h' = 1.17 \sim 5.83, \quad D/h = 11.7 \sim 35.0$$

3. 解析結果および考察

3.1 変形状態

図-3に被拘束体の温度降下前後の変位図を示す。温度降下させることにより、被拘束体部分は半径方向内側に変位している。このように、内側または、外側の面外変形により、円筒状構造物の拘束応力は緩和される。

3.2 拘束度に及ぼす諸要因の影響

(1) ヤング係数比の影響

図-4に拘束度Rとヤング係数比 E/E' の関係の一例を、壁厚と、被拘束体の上側、中央、下側(図-2参照)について示した。これより、 E/E' および D/t が大きくなるほど、また、被拘束体上部ほど拘束度は小さくなる傾向にあることが認められる。このような傾向は、一方に連続しているコンクリートブロックなどの拘束度においても認められる。

(2) 被拘束体高さや円筒直径の比の影響

図-5に拘束度Rと被拘束体高さや円筒直径の比 D/h との関係の一例を、被拘束体の上側、中央、下側について示した。これより、 D/h が小さいほど、すなわち同一直径であるならば被拘束体の高さが高いほど、また、被拘束体上部ほど拘束度は小さくなる傾向が認められる。また、

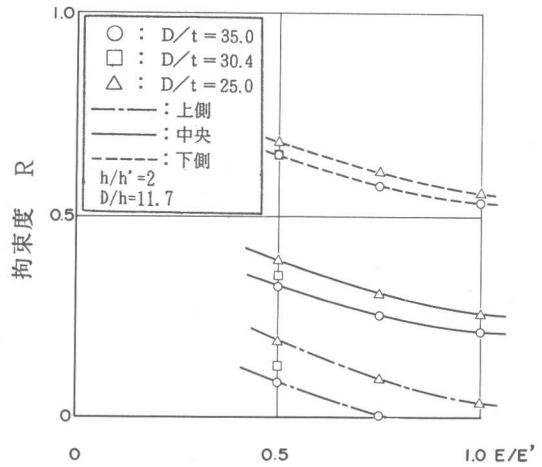


図-4 拘束度Rとヤング係数比 E/E' の関係例

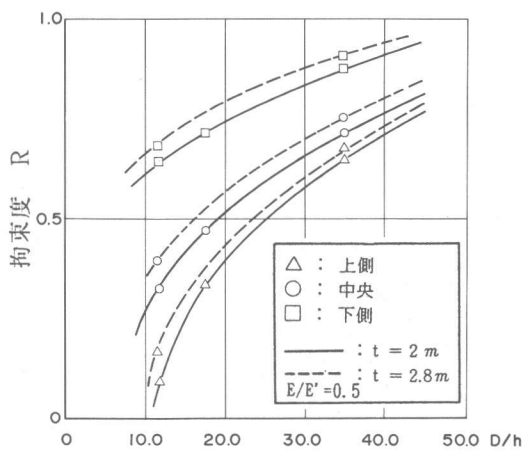


図-5 拘束度Rと直径と打設ロット高さの比 D/h の関係例

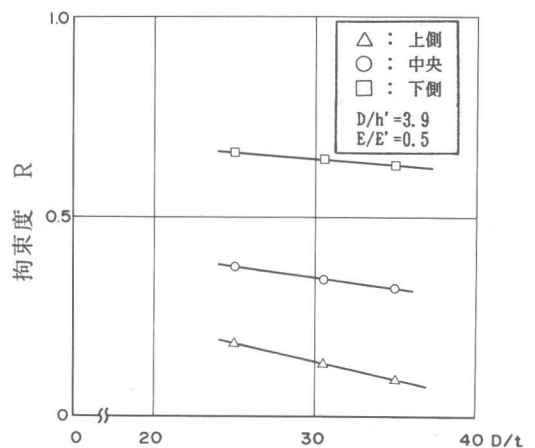


図-6 拘束度Rと直径と壁厚との比 D/t の関係例

壁厚が厚いほど拘束度は高くなる傾向も認められる。このように D/h すなわち被拘束体高さとなさの比が、拘束度に大きく影響することは、既往の研究においても認められている。

(3) 壁厚と円筒直径の比の影響

図-6に拘束度と壁厚 t と円筒直径 D の比 D/t の関係を一例を、被拘束体の上、中、下部について示した。図示のように D/t が小さいほどすなわち同一直径の場合には、壁厚が厚いほど拘束度が大きくなっている。これは、壁厚が厚いほど半径方向への変形が、拘束体により拘束される度合いが強いためと考えられる。下側になるほどその差は小さくなる。

(4) 拘束体と被拘束体の高さの比の影響

図-7に、拘束体と被拘束体の高さの比 h'/h の関係を示す。これより、本検討の範囲($2.0 \leq h'/h \leq 10.0$)では、拘束体と被拘束体の高さの比 h'/h は、拘束度に対してはほとんど影響しないことが認められる。同様な傾向は、吉岡らの一方向拘束に関する研究においても認められている。

(5) 下部境界条件および温度降下・上昇の影響

(1)から(4)に述べた解析結果は、拘束体の下端の境界条件は、全て可動支承としており(図-2参照)、温

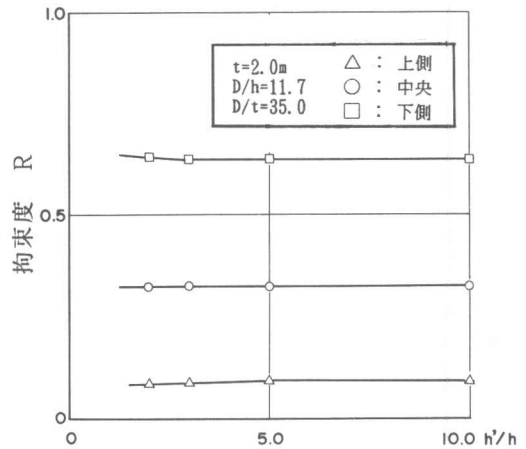
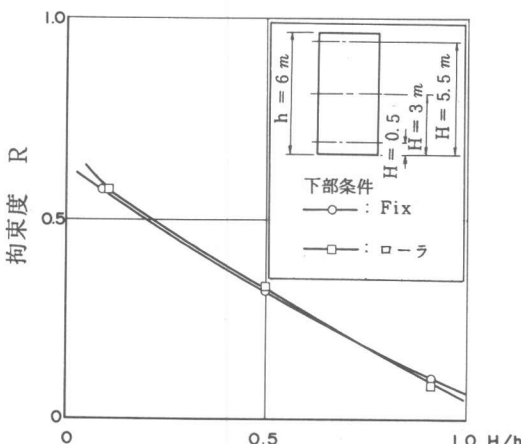


図-7 拘束度 R と既設ロットと打設ロットの高さの比(h'/h)の関係例

表-2 下部境界条件および変形状態

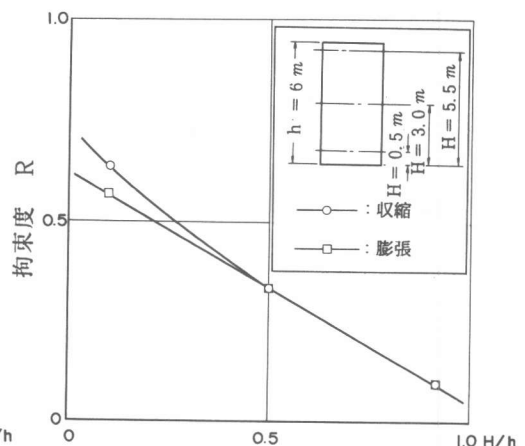
モデル	下部条件	変形状態	h/h'
1	Fix	収縮	2.0
2	ローラ	収縮	2.0
3	ローラ	膨長	3.0
4	ローラ	収縮	3.0

$E/E' = 0.5$



拘束度 R と H/h の関係

図-8 下部境界条件の差による影響



拘束度 R と H/h の関係

図-9 変形状態の差による影響

度降下時の収縮変形を対象として
ている。

ここでは表-2に示すように、
構造物下端の境界条件を、可動
(剛性なし)あるいは固定(完
全剛結)という両極端で設定し、
また、温度上昇時も想定して、
拘束度に与える影響を検討した。

図-8、9に検討結果を示す。これらの図より拘束体下端の境界条件や、温度上昇、下降時の
変形状態は、拘束度にはほとんど影響していないことがわかる。このことから下端の境界条件を
可動とし、また、温度降下時を想定して得られた解析結果は、実構造物に十分適用できるものと
考えられる。

3.3 拘束度の要因による表示

表-1のパラメータ解析によって得られた拘束度Rと各要因との関係を用いて、拘束度を重回
帰分析により各要因の関数として表わした。分析においては、 D/h 、 h'/h 、 h/t などの
拘束度に影響を与えると考えられる要因により、逐次回帰した結果、式(3)に示すような重回帰式
が得られた。

$$R = A_0 + A_1 \times (D/h) + A_2 \times (D/h') + A_3 \times (D/t) + A_4 \times (E'/E) \quad (3)$$

ここに、 $A_0 \sim A_4$: 表-3に示した定数。ただし、同表で上、中、下部は被拘束体の拘束度
評価位置である(図-2参照)

各位置における回帰式は高度に有意であることから、これらの式を用いて円筒状構造物の拘束
度を精度よく推定できると考えられる。

4. 既往の研究による拘束度との比較

図-10に、 $D=70\text{m}$ 、 $h=6\text{m}$ 、 $h'=18\text{m}$ 、 $t=2\text{m}$ とした場合の被拘束体中央部の拘束度
と E/E' の関係を、図-11には、同条件において $E/E'=0.5$ とした場合の被拘束体の拘束
度の分布を、小野ら、吉岡らおよびA
C Iの方法とともに示す。吉岡らの方
法については被拘束体下面でのRにつ
いて示した。小野ら、吉岡らおよびA
C Iの方法は、前述のように、半無限
体の拘束体上のコンクリートブロック
を対象としたもので、半径方向変形は
考慮できない。また、円筒状構造物の
被拘束体長Lの設定についてその方法
が定められてないので、ここでは、 L
 $=\pi D$ 、 $\frac{1}{2}\pi D$ と設定して、その結果
を図中に示した。図示のように著者ら
の方法で求めた拘束度は、既往の方法
に比べて、約半分と小さい値となっ
ている。また、既往の方法における断面

表-3 重回帰分析結果

位置	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	重相関係数	F 値
下部	0.73806	0.00913	0.00426	-0.00243	-0.26182	0.99472	517.0**
中央	0.45123	0.01600	0.00228	-0.00510	-0.27045	0.99671	832.2**
上部	0.22032	0.02218	0.00186	-0.00689	-0.27943	0.99208	343.5**

F(3, 23, 0.05)=3.03

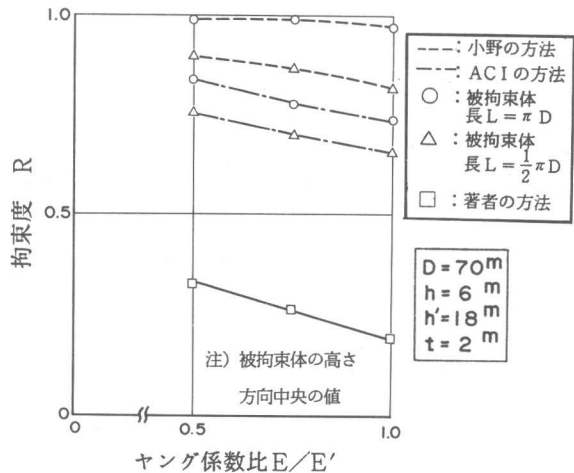


図-10 既往の研究と著者の方法との
比較 (Rと E/E' の関係)

内の拘束度分布は、ほぼ一定値を示しているのに比べ、本研究では、被拘束体上側ほど小さくなっている。このように、半径方向に変形する構造物では、一方向に連続した構造物と異なる値および断面内方向分布を示す。

5. まとめ

円筒状構造物の温度応力を簡易法によって計算する場合に必要な外部拘束度 R を、被拘束体および拘束体のヤング係数、部材高、壁厚を要因として、有限要素法により解析し、これら要因が拘束度に及ぼす影響について検討した。さらに拘束度を、これら要因との関係式で表示することを試み、得られた結果を、既往の研究による拘束度と比較した。

本研究で得られた主な成果を列挙すれば、以下のとおりである。

- (1) 円筒状構造物の拘束度に影響を及ぼす要因のうち、被拘束体と拘束体のヤング係数比、および直径と被拘束体の高さ比は大きな影響を及ぼし、直径と壁厚比、拘束体と被拘束体の高さ比は影響が小さい。
- (2) 構造物下端の境界条件が拘束度に及ぼす影響は小さい。
- (3) 円筒状構造物の拘束度を要因の関数として一次式で表わすことができる。
- (4) 円筒状構造物の拘束度は、一方向の連続した構造物の拘束度と比較して約半分と小さな値である。

(参考文献)

- [1] マスコンクリートの温度応力研究委員会；外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案 J C I, 1985.11
- [2] 建設省河川局；多目的ダムの建設・第3巻、土木管理施工技術研究会
- [3] 小野 定他；マスコンクリートの外部拘束による温度ひびわれ制御について、セメント技術年報34, 1980
- [4] ACI 207 Committee : Effect of Restraint Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, 1973
- [5] 吉岡保彦他；マスコンクリートの温度応力算定に用いる外部拘束度に関する研究；第8回コンクリート工学年次講演論文集、1986

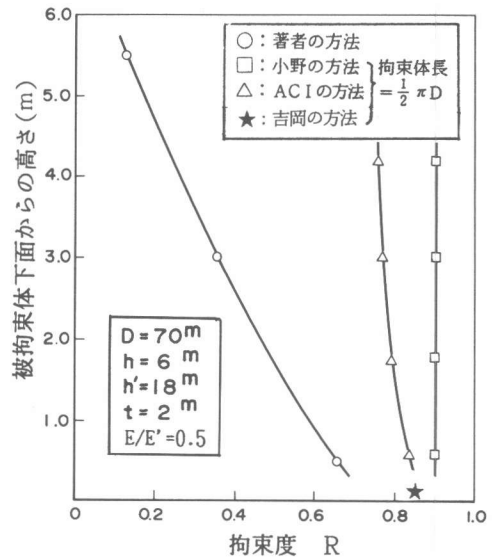


図-11 既往の研究と著者の方法との比較 (Rの被拘束体内の分布)