

# [7] 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

正会員 ○吉 岡 保 彦(竹中技術研究所)

正会員 米 沢 敏 男(竹中技術研究所)

## 1. まえがき

マスコンクリートの外部拘束応力度を評価する場合、ヤング係数やクリープの材料的な特性とともに、拘束度は計算結果に大きな影響を与える。JCI 指針や土木学会標準示方書では、マスコンクリートのひびわれ防止対策の検討を定量的に行うことを定めており、外部拘束度の評価についてより詳細な検討を行う必要がある。拘束度については古くからタムの水和熱によるひびわれ問題を対象に研究が行われてきた<sup>1)</sup>。ACI 207委員会では<sup>2)</sup>、拘束度の分布と算定の基本的な方法を提案しており、現在でも多くの解析に適用されている。しかし、最近の有限要素法を中心とした解析から、これらの方法ではマスコンクリート打設ブロックの形状(矩形ではその高さ $h$ と長さ $l$ の比  $h/l$  あるいは  $l/h$ )の影響を十分考慮することができない点で不十分であることが永山ら<sup>3)</sup>、小野ら<sup>4)</sup> JCI マスコンクリートの温度応力研究委員会<sup>5)</sup>によって指摘されている。

本研究は、このような観点から拘束体、被拘束体のヤング係数および形状等の要因を変化させた有限要素法による解析を行い、拘束度とこれら要因の関係について整理することを試みたものである。解析では、半無限地盤上に矩形ブロックが打設された場合のほか、ベースマット状マスコンクリート部材で一般に行われている矩形ブロックが積層打設される場合をも含めて検討した。

## 2. 半無限地盤上のマスコンクリートブロックの拘束度

### 2.1 ヤング係数の影響

(a)解析方法：解析は有限要素法により行った。図-1に解析に用いたモデル、要素分割の例を示す。半無限地盤の寸法の影響を避けるため、被拘束体の高さ( $h$ ) 1.5 m、長さ( $l$ ) 2.4 mに対し、地盤の深さ( $H$ )を50 m、長さ( $L$ )を100 mと十分に大きくした。ここでは地盤のヤング係数( $E_f$ )を  $1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 一定とし、被拘束体のヤング係数を  $E_g/E_f = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の4種類に変化させ、被拘束体に一様に  $10^\circ\text{C}$ の温度変化が生じたときの応力を求めることとした。底面においては鉛直方向の、側面では水平方向の変位をそれぞれ拘束し、平面応力下での解析を行った。

### (b)解析結果および考察

応力解析結果のうち、鉛直ひびわれの原因となる中央断面の水平方向応力( $\sigma_x$ )の高さ方向の分布を図-2に示す。本解析では  $l/h = 16$ と比較的大きいことから、被拘束体内の応力分布はほぼ一様となっている。ブロック面での最大応力を次式に代入すれば、底面における拘束度  $R$ を求めることができる。

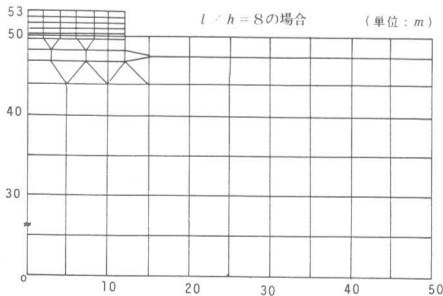


図-1 解析モデルと要素分割例

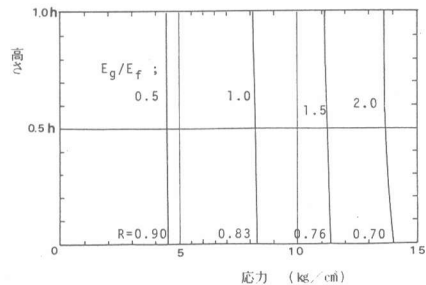


図-2 ヤング係数比の応力分布への影響

$$\sigma_x = R \alpha E_g \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\alpha$  : 熱膨張係数,  $\Delta T$  : 温度変化 (10℃)

R を求めたものを図-2中に示すように、被拘束体のヤング係数が小さくなるとともに大きくなる。図-3は拘束度RとEg/Efの関係を示したものであるが、RはEg/Efに逆比例することが認められる。すなわち、次式で近似できることがわかる。

$$R = 1 / (1 + \frac{1}{\alpha_r} \cdot \frac{E_g}{E_f}) \dots\dots\dots(2)$$

上式において $\alpha_r$ は定数であるが、単純拘束モデルではブロックの断面積を1としたときの地盤の拘束体断面積に相当する。本解析では $\alpha_r = 4.5$ としたときに解析値とよい一致を示している。図中にはACI207委員会会で採用されている $\alpha_r = 2.5$ の場合の拘束算定式を併せて示すが、解析結果とはかなり異なっていることがわかる。後述するように $l/h$ の影響で拘束度が変化するので、ACI式は $l/h$ の大きいときには相当危険側の推定となる場合のあることに注意する必要がある。

2.2 ブロックの長さ高さの比 ( $l/h$ ) の影響の検討

(a)解析方法：先に用いた解析モデルと基本的に同じであるが、 $E_g/E_f = 1.5$ および $l = 24$  mは一定とし、ブロックの打設高さを1~8 mにまで、すなわち $l/h = 4, 8, 16, 32$ と4段階に変化させた場合について有限要素法による応力解析を行った。この解析においても地盤の深さを50 mと大きくし、地盤の寸法の影響を少なくするよう配慮した。

(b)解析結果および考察：被拘束体に生じた $\sigma_x$ の分布を図-4に示す。これより $l/h$ が8以上であれば拘束度はほぼ一様に分布するとみなしてもよいことがわかる。底面の応力を1としたときの応力の分布はACI207委員会と与えられているものとほぼ一致している。

底面での拘束応力は完全に拘束した場合に15 kg/cm<sup>2</sup>となるが、図中に示したように $l/h$ によって相当異なり、拘束度は0.5~0.9の範囲となっている。Rがブロックの形状に影響されることは最近の研究が指摘されているが、本解析でもその影響が極めて大きいことを示している。拘束度が(2)式で示されるとして、 $l/h$ と $\alpha_r$ の関係を求めたものを図-5に示す。 $l/h$ が特に小さい場合を除き、 $\alpha_r$ と $l/h$ の間には線型関係が認められる。すなわち従来ACI式においては $l/h$ の値にかかわらず $\alpha_r$ を2.5と一定に仮定していたが、 $\alpha_r$ は $l/h$ の影響を加味すべきであり、本解析から次式で示すことができる。

$$\alpha_r = 0.33 l/h \dots\dots\dots(3)$$

(2)式と併せて考えると、 $E_g/E_f = \kappa$ として半無限地盤上のマスコンクリートブロックの底面の拘束度は次式で与えられる。

$$R = 1 / (1 + 3.3 h \kappa / l) \dots\dots\dots(4)$$

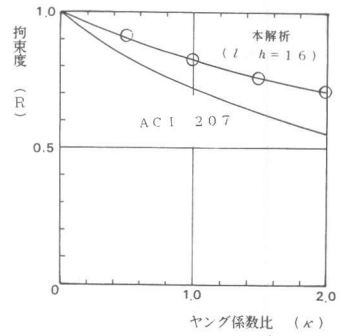


図-3 ヤング係数比と拘束度の関係

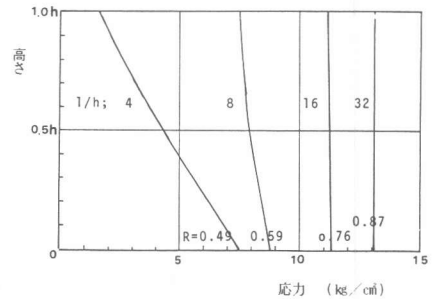


図-4  $l/h$ と応力分布の関係

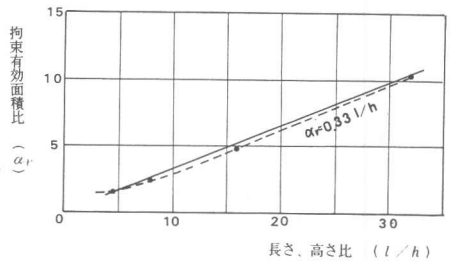


図-5  $\alpha_r$ と $l/h$ の関係

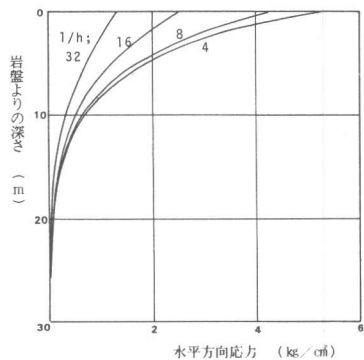


図-6 地盤内の応力分布

図-6には地盤内の水平方向応力の分布を示すが、上記のように $l/h$ の増加に従って拘束度も増すのは、応力伝播深さは $l/h$ が変化しても一定(ほぼ $l$ とみなせる)であるのに対し、 $h$ が小さいほど拘束応力の減衰が小さいためであると考えられる。

図-7に(4)式から算定した拘束度とヤング係数比の関係を $l/h$ をパラメータとして示す。永山<sup>3)</sup>も同様の図を示しているが、比較的良い対応を示している。従来、ダムではひびわれ防止のために経験上ブロック長に制限を設けているが、一般のマスコンクリートにおいても打設区画の決定はひびわれ防止上の有効な対策の一つと考えられ、図-7、式(4)は事前の検討に有効に用いるものと思われる。

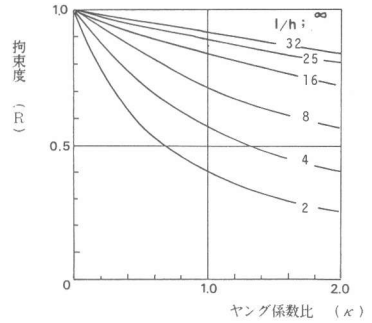
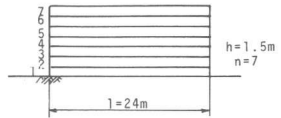


図-7 拘束度と $l/h$ , Kの関係

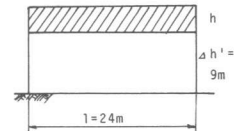
### 3. 同幅の拘束体上に積層打設されたブロックの拘束度

#### 3.1 解析方法

図-8(a)に示すように半無限地盤上に長さ $l$ 、高さ $h$ のマスコンクリートブロックが順次打ち重ねられる場合に、最上打設ブロックが一様な温度変化( $10^{\circ}\text{C}$ )を生じたときの拘束度について検討する。このため、 $l=24\text{ m}$ 、1層の厚さ $h$  1.5 mとし、7リフトまで打ち重ねた場合の応力を有限要素法により求めた。2と同様、半無限地盤は深さ50 m、幅100 mと十分大きくした。ヤング係数は、地盤、既設コンクリートおよび被拘束体である新規打設ブロックに対し、それぞれ $10 \times 10^4$ 、 $25 \times 10^4$ 、 $15 \times 10^4\text{ kg/cm}^2$ とした。



(a)



( $h=0.75, 1.5, 3, 6\text{ m}$ )

(b)

また、図-8(b)に示すように、地盤の影響が無視しうる高さまで打設された既設コンクリート上に、これと同幅を有するブロックが打設された場合の形状の影響を明らかにするため、7リフト目の高さを0.75, 1.5, 3.0, 6.0 m ( $l/h=32, 16, 8, 4$ )に変化させた応力解析を行った。

図-8 解析モデル

#### 3.2 解析結果および考察

図-9に各リフトにおける水平方向応力分布を示す。1~3リフトにおいては地盤よりも既設コンクリートのヤング係数の方が大きいので、拘束応力は次第に大きくなっているが、4リフト以上ではほぼ一定の応力となっている。

図-10は拘束体内の応力分布を示したものであるが、4リフト以上では地盤に作用する応力はかなり小さくなっていること

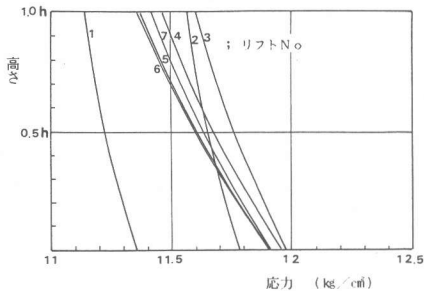


図-9 各リフト内の拘束応力分布

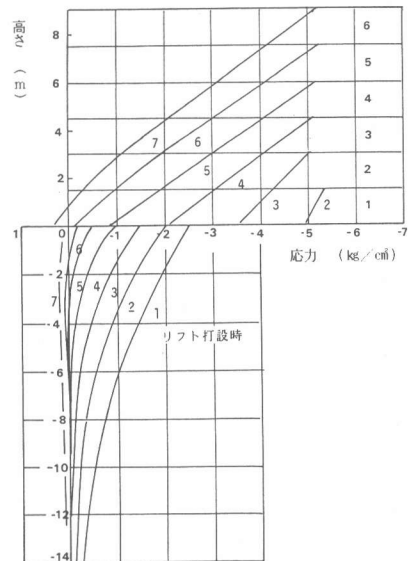


図-10 拘束体内の応力分布

がわかる。本解析では、地盤のヤング係数を  $1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  としているが、これは通常の岩盤のうちでかなり硬いものに相当することから、このような積層打設では3~4リフト以上では地盤の拘束の影響は無視してもよいものと考えられる。地盤、既設コンクリートの有効面積、ヤング係数をそれぞれ  $A_f, E_f$  および  $A_e, E_e$  としたとき、両方による拘束を受けた場合の拘束度は次式で与えられる。

$$R = 1 / \{ 1 + A_g E_g / (A_e E_e + A_f E_f) \} \dots\dots(5)$$

図-9における底面の応力度から先述と同様の方法で拘束度を求め、各ヤング係数と1~3リフトで  $A_e = 0, 0.15, 3\text{m}$ 、4リフト以上では  $A_f = 0$  とする諸数値を(5)式に代入すると、リフトごとの拘束体の有効面積を求めることができる。このようにして求めたものを図-11に示す。これによれば4リフト以上では既設コンクリートからの拘束が支配的となり、また既設リフトの拘束有効面積は約3.5m、すなわち打設リフトの2.33倍が有効域となっていることがわかる。2.に述べた結果で半無限地盤では4.7であったことと比べると、被拘束体、拘束体が同一幅を有する場合には拘束有効面積がほぼ半減するとみなしてよいことがわかる。

次に第7リフト目の打設高さを0.75~6mまで4種に変化させたときの拘束度と  $l/h$  の関係について検討した。前と同様に底面の拘束応力から拘束度を求め、(2)式に代入して、打設リフト(被拘束体)の面積に対する拘束体の拘束有効面積の比  $\alpha_r$

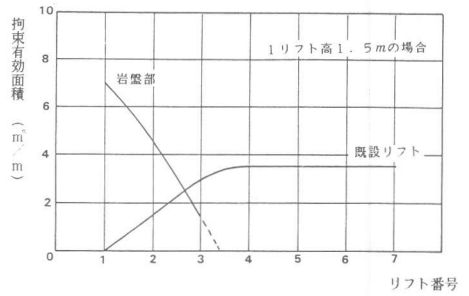


図-11 各リフトの拘束に關与する地盤、既設リフトの拘束有効面積

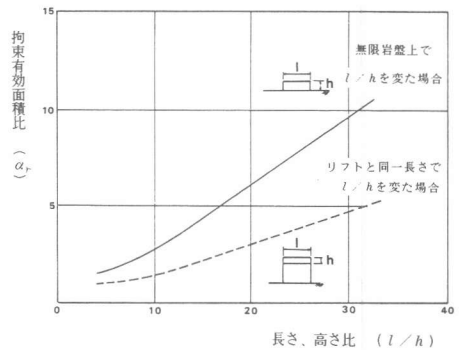


図-12 拘束有効面積比と打設リフトの  $l/h$  の関係

を求めた。この結果を図-12中の破線に示す。  $l/h$  が小さい領域を除けば  $\alpha_r$  は  $l/h$  に比例するとみなしてよいことがわかる。森は  $h$  が大きな場合の拘束度を  $R = 1 / (1 + \kappa^{0.7})$  で与えているが、図-12の  $l/h$  がかなり小さい領域で適合している。図中には実線で半無限地盤の場合を示すが、同一幅の拘束体では拘束応力球根の作用域が限定されるため、有効面積が半減すると考えてよいことがわかる。(4)と同様の型で表すと次式となる。

$$R = 1 / (1 + 6.7 \kappa h / l) \dots\dots(6)$$

(6)式は、ダムヤベースマットの積層打設の場合の拘束応力の計算に有効に用いるものと考えられる。

#### 4. 結 論

マスコンクリートの熱応力を求める場合に重要な拘束度について基本的な検討を加えた結果、次のような結果が得られた。(1)半無限地盤上に矩形コンクリートブロックが打設される場合、拘束度は両方のヤング係数のほか、ブロックの長さ、高さ比 ( $l/h$ ) の影響を大きく受ける。(2)ACI 207委員会はこの意味で問題があり、  $l/h$  が小さいときには危険側の評価となる。(3)拘束体の有効拘束面積は  $l/h$  が小さい場合を除けば  $l/h$  と比例関係にあるとみなしてよい。(4)岩盤上にマスコンクリートが積層打設される場合、岩盤のヤング係数が特に大きくなければ、4リフト目以上の拘束度の算定には地盤の影響を無視できる。(5)拘束体、被拘束体が同一の幅を有する場合には、拘束に寄与する有効面積は半無限地盤の場合  $1/2$  とみなせる。(6)これらの点から半無限体、同一幅の拘束体の場合の拘束度の算定式を本文(4)式、(6)式で示すように与えた。

【参考文献】 1) 森, 土木学会論文集, 第89号, pp.45~53, 昭和38年1月 2) ACI 207 Committee, Jour. of ACI, Vol.70, pp.445~470, July 1973 3) 永山, 矢沢: 土木技術資料, 22-9, pp.26~32, 1980 4) 小野, 楠田, 土木学会年次講演概要集, pp.45~46, 1981 5) マスコンクリート温度応力研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1985年11月