

V-3

コンクリート型枠として用いたエアマットの変形性状について

北海道大学工学部 吉田 安 範
 清水建設(株) 正 員 小 原 由 幸
 清水建設(株) 正 員 小 野 定
 北海道大学工学部 正 員 上 田 多 門
 北海道大学工学部 正 員 林 川 俊 郎
 北海道大学工学部 正 員 角 田 與史雄

1. はじめに

コンクリートを打設する型枠として、今日までは木や鋼板などが使用されてきた。しかし最近、土木作業現場では人手不足などで能率性が問題になってきている。また、NATM工法では粉塵のため衛生面での問題もある。そこで現在、注目を集めている複合材料の一つのエアマットをコンクリートの型枠として利用することを考えた。現状では、高い構造物の天井や、トンネル上部などのコンクリートを打設するのに鋼製の型枠を使用している。しかし、このエアマットを利用することによって能率良く作業ができ、衛生面も安全性も向上すると思われる。また、膜構造物であるエアマットは今までの型枠より軽量であり、変形も自由なので様々な形状にすることができる。

本研究におけるエアマットとは、ネオプレンで被覆したナイロン布を、またはそれを数層に積層した膜板を上下の外皮として配し、それを落とし糸(drop yarn)と称する多数の平行な糸で結び付けたものである。この落とし糸によりエアマットの形状が維持されるのである。これは、グライダー用のふくらまし方式の構造方法を Goodyear Co (アメリカ)が開発したもので、内圧が与えられて、はじめて剛性が生じる構造形式である。現在までの、エアマットに関する研究としては、林らによる膜の分布荷重によるたわみなどの解析⁽¹⁾や、矩形状のエアマットの基礎方程式を導くことによる四辺単純支持の解析が行われている⁽²⁾。また、峰山の卒業論文⁽³⁾では、実際に膜とエアマットのたわみやモーメントを数値解析し内圧との関係をグラフ化してある。

本研究は昨年度の研究⁽⁵⁾の継続として行うものであり、四辺単純支持されたエアマットのたわみを既往の研究に基づいて数値解析により予測し、同じ条件下で行ったエアマットの載荷実験結果と比較を行った。さらに四辺単純支持された平板上にあるエアマットの変形性状を解析するためのモデルを試みた。この後半部分は、エアマットを板と重ねて型枠として使用することを構想に置いているためである。

2. 四辺単純支持されたエアマットの変形

2-1 モデル化

ここでは簡単にするため、外皮は直交する縦糸、横糸方向に弾性主軸を持つ直交異方性膜とし、落とし糸は不伸長、内

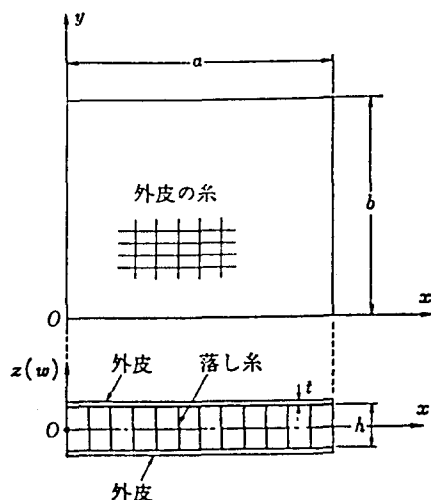


図-1 エアマット (2)

Deformational Behavior of Airmat as Formworks of Concrete

by Yasunori Yoshida, Yoshiyuki Ohara, Tadashi Ono, Tamon Ueda, Toshiro Hayashikawa and Yoshio Kakuta

圧 p は一定であるとする。このようなエアマットでは、厚さ方向のせん断変形が生じやすく、そのせん断剛性は $N_x = p h$ である (h : エアマットの厚さ)。

図-2 に定義した平均膜力 (N_x, N_y, N_{xy})、せん断力 (Q_x, Q_y)、モーメント (M_x, M_y, M_{xy}) による平衡方程式は次のようである。

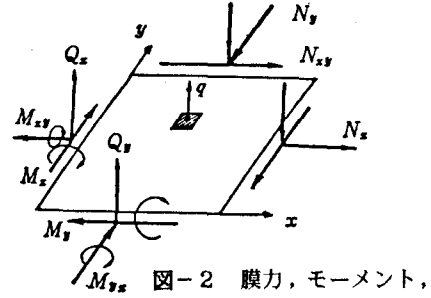


図-2 膜力，モーメント，せん断力の定義⁽²⁾

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0 \quad [1], [2]$$

$$N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y} - p h \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + q = 0 \quad [3]$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad [4], [5]$$

第3式の第6項は曲げ曲率によって、下面が上面に対し面積増加し、その分だけ内圧による力の増加分である。また、図-3のように z 軸に対する落とし糸の x, y 方向の傾角を α, β とすると Q_x, Q_y は次のように表せる。

$$-Q_x = p h \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \alpha \right), \quad -Q_y = p h \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \beta \right)$$

[6], [7]

また、線形理論より $N_x = N_y = p h, N_{xy} = 0$ 、Hookeの法則より結局、 α, β, w について次のようにまとめられる。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \beta}{\partial y} + \frac{q}{p h} = 0 \quad [8]$$

$$C_x \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \Gamma_{xy} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} + (C_{xy} + \Gamma_{xy}) \frac{\partial^2 \beta}{\partial x \partial y} = \frac{2 p}{h} \left(\alpha + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad [9]$$

$$(C_{xy} + \Gamma_{xy}) \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x \partial y} + \Gamma_{xy} \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + C_y \frac{\partial^2 \beta}{\partial y^2} = \frac{2 p}{h} \left(\beta + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad [10]$$

ここに

$$C_x = \frac{E_x t}{1 - \nu_x \nu_y}, \quad C_y = \frac{E_y t}{1 - \nu_x \nu_y}, \quad C_{xy} = C_{yx} = \frac{\nu_y E_x t}{1 - \nu_x \nu_y}$$

$$\Gamma_{xy} = G_{xy} t$$

[11], [12], [13], [14]

で、 $E_x, E_y, \nu_x, \nu_y, G_{xy}, t$ は、それぞれ外皮としての膜のヤング係数、ポアソン比、せん断係数、および肉厚である。また、四辺単純支持条件として

$$x = 0, a \quad \text{で} \quad w = \beta = \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0 \quad [15]$$

$$y = 0, b \quad \text{で} \quad w = \alpha = \frac{\partial \beta}{\partial y} = 0 \quad [16]$$

と与えられ、これを満足するように

$$w = \sum \sum W_{mn} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad [17]$$

$$\alpha = \sum \sum \alpha_{mn} \cos \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad [18]$$

$$\beta = \sum \sum \beta_{mn} \sin \frac{m \pi x}{a} \cos \frac{n \pi y}{b} \quad [19]$$

と二重Fourier 級数に展開し、エアマットのたわみ w を求める。

数値計算として、以下の数値を使用する。

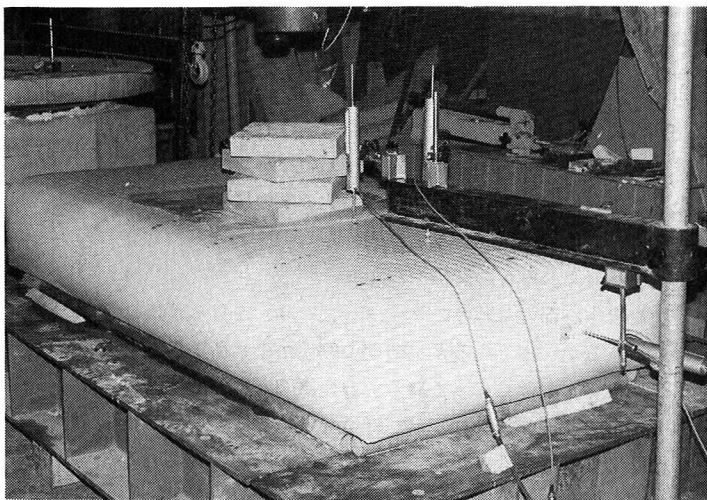
$a=180$ cm, $b=90$ cm, 膜厚 $t=0.15$ cm, エアマットの厚さ $h=30$ cm, ポアソン比 $\nu_x=\nu_y=0.5$

せん断係数 $G_{xy}=2385$ kgf/cm², ヤング係数 $E_x=800$ kgf/cm², $E_y=1476$ kgf/cm²

等分布荷重, 部分分布荷重 (30 cm × 30 cm) $q=0.0215$ kgf/cm²

2-2 実験概要

今回使用した矩形形状のエアマットは、内圧 p が $0.2 \sim 0.3$ kgf/cm² まで安全にかけられるもので、寸法は 200 cm × 100 cm × 30 cm であり、支持は四辺単純支持とした。載荷方法は、コンクリート製ブロック (30 cm × 30 cm × 5 cm, $12 \sim 14$ kgf) を、写真のように一つずつ中心に重ねて載せることにより、たわみ w の分布を測定した。たわみ w の測定位置は、図-4の通りである。また内圧 p を $0.1 \sim 0.2$ kgf/cm² と変化させて中心部のたわみ w との関係も調べた。本実験では、荷重と内圧をパラメータとした。



実験風景

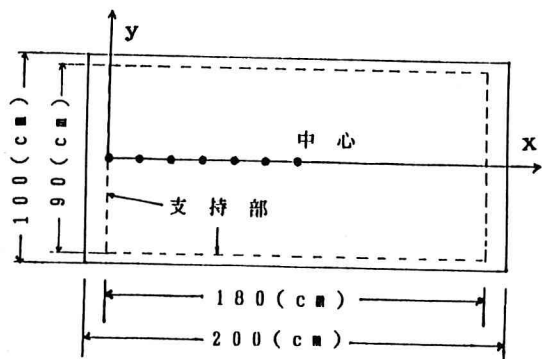
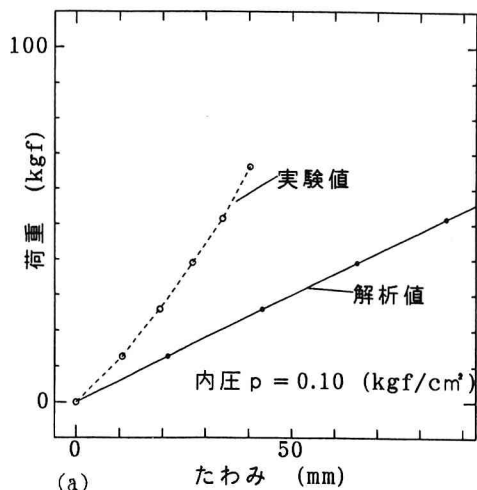


図-4 エアマットの実験におけるたわみの測定位置



(a)

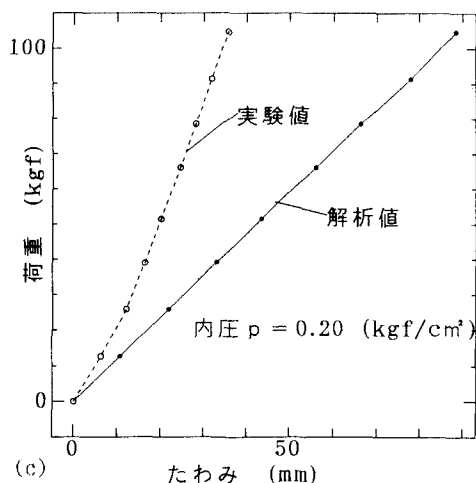
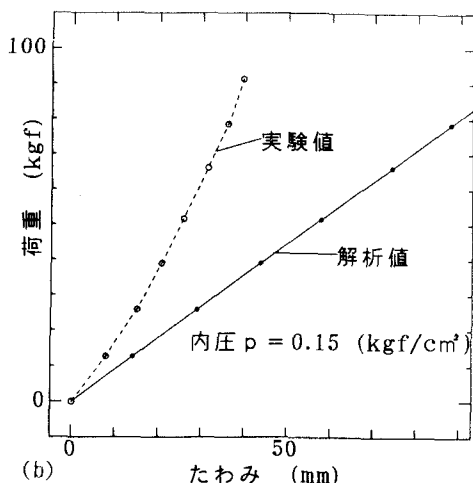


図-5 エアマットのたわみと荷重の関係 (a),(b),(c)

2-3 実験結果と考察

この実験は数回繰り返し行った結果、それぞれ同じ値とはならず不均一で、実験値に最大10%のバラツキがある。そこで今回の実験値は何回か行ったデータの信頼できると思われるものを使用しグラフに表した。

① 荷重 q ～ たわみ w の関係

荷重と中心部のたわみのグラフ(図-5)を見るとほぼ線形であるが、よくみると、初期の剛性が小さく荷重とともにだんだんと大きくなっている。この原因と思われる理由の1つとしては、エアマットが軽量なので支持部で完全には接触していないことから生じる局部的変形が考えられる。また解析値が実験値よりかなり小さくなっており、どの内圧でも荷重が大きくなるとその差も大きくなる。

② 荷重 q ～ たわみ w の分布

エアマットにコンクリート製ブロックを部分分布荷重として載せたが、たわみの分布形状は解析による予測結果と概ね一致している(図-6)。曲げ変形をする鋼板の数値解析の結果(図-7)とこの結果からエアマットがせん断変形が卓越していると言うモデルが、ある程度適していると考えられる。

③ たわみ w ～ 内圧 p の関係

この実験では内圧を 0.10, 0.15, 0.20 kgf/cm² と3種類しかできなかったが、内圧が高くなると変形が顕著に小さくなっている(図-8)。内圧 p が 0.10～0.20 kgf/cm² に増加することによるたわみの減少は、(内圧が 0.20 kgf/cm² のときの w) / (内圧が 0.10 kgf/cm² のときの w) × 100 で表す比を用いると50～60%の割合であり、実験、解析とも近い値になった。すなわち、実験を行った内圧の範

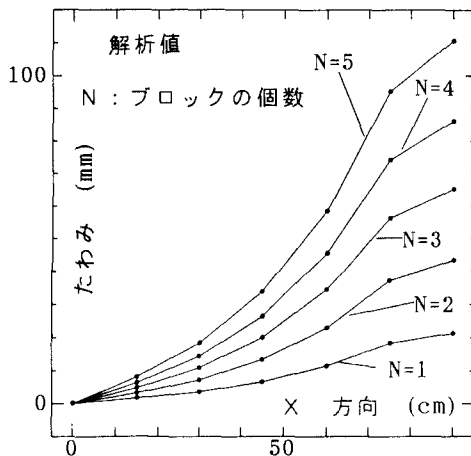
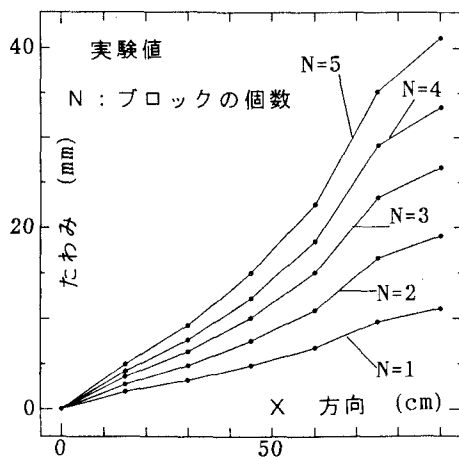


図-6 エアマットのたわみ分布の実験値と解析値

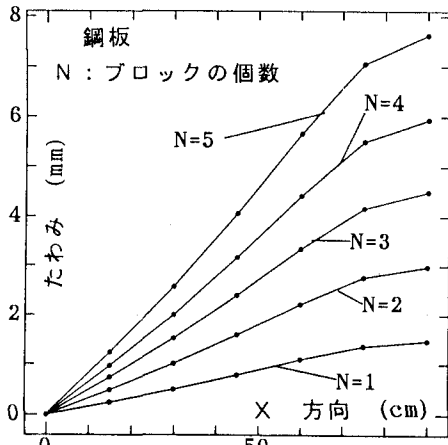


図-7 鋼板のたわみ分布の解析値

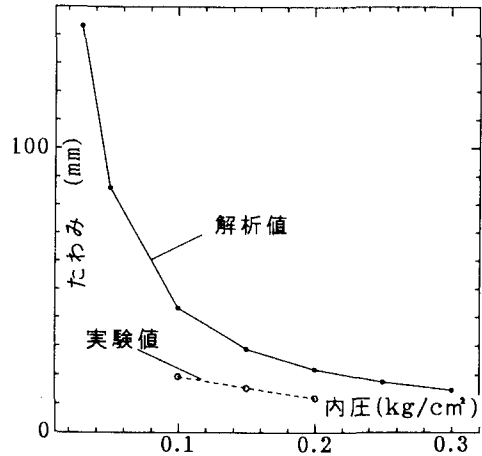


図-8 ブロックを2枚 (25.8kgf) 載せた状態
のエアマットの内圧とたわみの関係

図では、実験結果における内圧の変形に与える影響をエアマット構造のモデルが説明していると言える。

3. 四辺単純支持された平板上のエアマットの変形

3-1 モデル化

実際エアマットを使用する時のことを考えると、鋼板の平板などと重ね合わせたエアマットの変形について解析をする必要がある。このモデルとしてエアマットと鋼板の重ね板(図-9)を考えてみる。重ね板とは、合成板と違い2枚の板が何の抵抗もなく滑ることが出来るように重なっている状態のことである。その特徴としては、1)各々の板で平面保持がなされている。2)部分的に曲率(たわみ面)が等しい。3)2枚の板を別々に考えることが可能である。

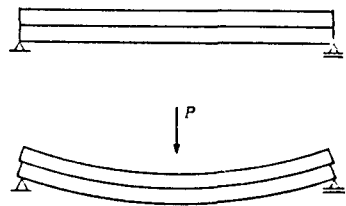


図-9 重ね板

以上より、エアマットと鋼板のたわみがどこかで等しい2枚の板と仮定する。したがって、加えた力はエアマットと板に次式のように分配される。

$$w = f_1 (P_1) \quad [20]$$

$$w = f_2 (P_2) \quad [21]$$

$$P = P_1 + P_2 \quad [22]$$

f_1 : エアマットのたわみの式

f_2 : 鋼板のたわみの式

P_1 : エアマットに分配される荷重

P_2 : 鋼板に分配される荷重

P : 全体にかかる荷重, w : たわみ

上記の3つの式より、たわみ w が求められる。

3-2 たわみの求め方

このモデルで考えると、たわみをどの位置で一致させるかということが重要である。そこで、エアマットと鋼板のたわみの分布形を解析結果を比較してみると、図-10, 11のようになった。これを見ると、ほぼ同じような傾向がみられる。したがって、中心部分のたわみを一致させることによって四辺単純支持の平板上にあるエアマットのたわみの分布は、求めることとする。

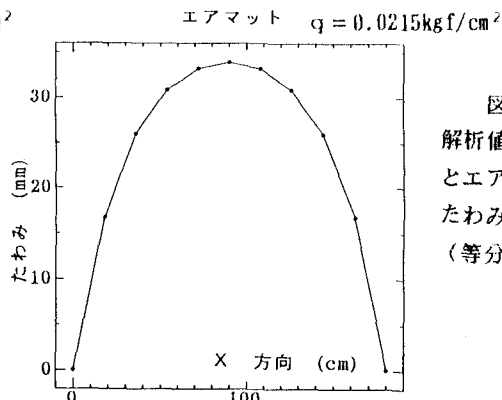
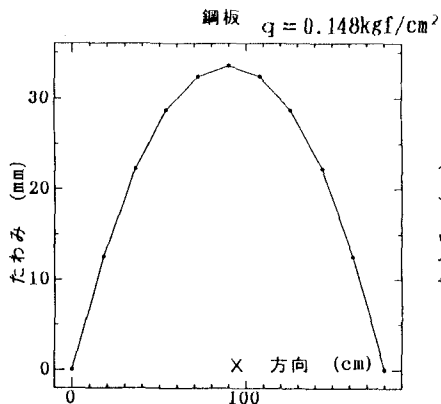


図-10
解析値による鋼板
とエアマットの
たわみ分布の比較
(等分布荷重)

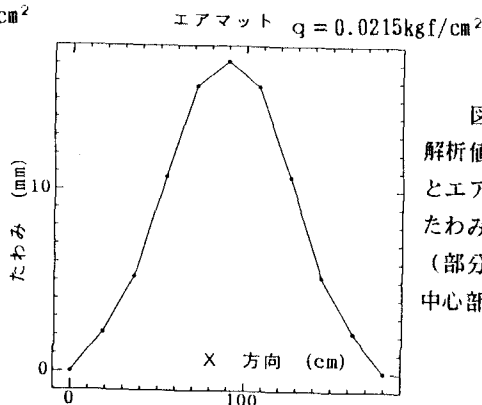
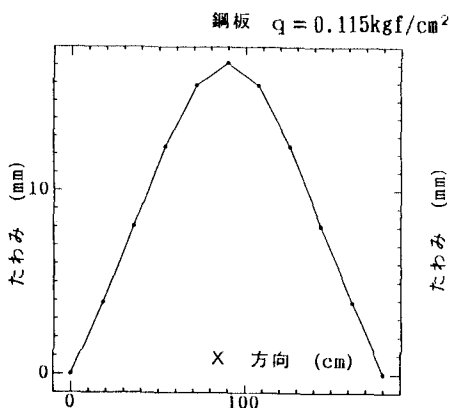


図-11
解析値による鋼板
とエアマットの
たわみ分布の比較
(部分分布荷重
中心部分36cm×18cm)

4. あとがき

本研究のエアマットは、まだ余り土木の分野ではなじみがなく、まだまだ未知なところが多い。したがって、この報告も中間報告的なものとなっている。また、エアマットの実験においても正確な値が測定されているのか、載荷方法などをさらに検討する必要がある。今後は、重ね板モデルの実験をして解析結果と比較し、さらに実際に小型トンネル断面のモデルをエアマットを用いて打設して、エアマットの適用性を検討する。

謝辞：これらの研究や、本実験を行うに当たり、北海道大学の木村 勉技官、構造工学講座の学生諸君、ならびに、エアマットを製作してくれた太陽工業の本城 豊氏の協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 毅 ほか 「複合材料工学」 日本科学技術連盟 1979
- 2) 林 毅 ほか 「軽構造の理論とその応用 下」 日本科学技術連盟 1966
- 3) 熊沢 周明・島田 静雄 「合成桁の理論と設計」 山海堂
- 4) 安部 清孝 「フーリエ級数」 森北出版 1971
- 5) 峰山 端香：内圧を受ける膜構造の静的解析 北海道大学提出卒業論文, 1991