

空気型枠の変形性状に関する実験的解析

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DEFORMATIONAL CHARACTERISTICS OF AIRMAT AS FORMWORK

上田多門¹⁾ 吉田安範²⁾ 中村敦³⁾ 小野武彦⁴⁾
 小野定⁵⁾ 小原由幸⁶⁾ 林川俊郎¹⁾ 角田與史雄⁷⁾

By Tamon UEDA, Yasunori YOSHIDA, Atsushi NAKAMURA, Takehiko ONO
 Sadamu ONO, Yoshiyuki OHARA, Toshiro HAYASHIKAWA and Yoshio KAKUTA

Loading tests of airmats, in which stringers are internally arranged to keep height of the airmat, are conducted to clarify their applicability to formwork of concreting. Lightness and easy handling of the airmat assure good constructivity for concreting. The airmats are supported at the four sides and distributed loads are applied on their top surfaces. Observed deformations of the airmats can be predicted by numerical analysis. Effects of initial distortion of the airmat on the airmat deformation, however, are found not to be negligible. Thin steel plate superimposed to the airmat can reduce the deformation of the airmat significantly. Construction tests of tunnel lining are conducted using models of a tunnel section. It is found that the airmats as formworks can be easily removed and that surfaces of concrete lining are very smooth.

Key Words: formwork, airmat, deformation

1. はじめに

技術の進歩及び経済の発展とともに、各産業における労働環境も確実に向上している。しかし、近年、3 K などと呼ばれ社会問題ともなっているように、他の産業と比較すると建設産業の労働環境はまだ悪いのも事実である。その理由としては、不十分な安全性、肉体的な重労働性などが挙げられる。典型的な例として、コンクリート工事の型枠工がある。支保工の上に型枠を設置する場合、重量のある型枠を手作業で据え付け、取り外すことは、重労働であるとともに、安全性の確保がなかなか困難である。そこで、軽量構造の一つとして使われているエアマット¹⁾を型枠として適用することを試みた。エアマットは、宇宙飛行体を大気圏内に緩やかに突入させるためのグライダー用に、膨らまし方式の構造体として米国のGoodyear社によって開発されたものであり²⁾、飛行機などの重量物を支えるジャッキ、空気の代わりに砂を入れて防音壁などに使われている。本論文では、型枠として必要な構造的な諸性状、及び、施工上の諸性状を有しているかどうかを実験的に明らかにすることを目的としている。エアマット自身は十分安全と考えられるが、空気が抜けることへの対処などは別途検討中であり、本論文では取り扱っていない。

1) 工博 北海道大学助教授、7) 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

2) 北海道土木部小樽土木現業所余市出張所 (〒046 余市郡余市町黒川町1248番)

3) 日本鉄道建設公団東京支社工事9課 (〒108 東京都港区芝5丁目33-8)

4) 部長、5) 工博 課長、6) 課長 清水建設株式会社土木本部技術第一部 (〒105-07 東京都港区芝浦 1-2-3 シーバンスS館)

2. 空気型枠（エアマット）

型枠として用いられるエアマットを本論文では空気型枠と呼ぶこととする。空気型枠の補強膜（外皮）には、塩化ビニルで被覆したポリエステル製の織布を用いた。この補強膜は非常に多くのポリエステル製の落とし糸で結ばれ、型枠の板としての厚さを一定に保つようにしてある（図1¹⁾参照）。使用した空気型枠は2種類で、安全にかけられる内圧が0.03MPaのものと0.08MPaのもので、寸法は各々2000×1000×300mm、2000×1000×200mmである。以降、前者を空気型枠Y、後者を空気型枠Nと呼ぶ。補強膜及び落とし糸は弾性体とみなすことができ、その材料定数は表1に示すようである。

Table 1 Reinforced membrane and stringer

(a) Airmat formwork - Y						(b) Airmat formwork - N					
Membrane			Stringer			Membrane			Stringer		
E_x	E_y	ν_x, ν_y	G	t	E	E_x	E_y	ν_x, ν_y	G	t	E
MPa	MPa		MPa	mm	MPa	MPa	MPa		MPa	mm	MPa
78.5	143.9	0.5	233.9	1.5	3.44	245.8	215.6	0.5	71.9	0.56	5.17

E : Young's modulus of stringer

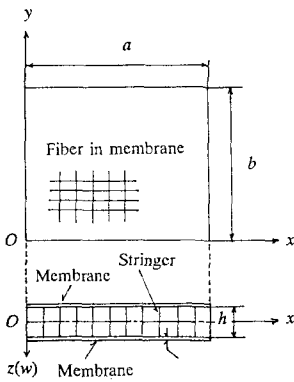


Fig.1 Airmat

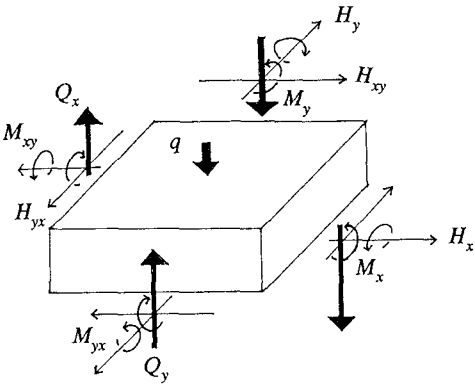


Fig.2 Force equilibrium

3. 空気型枠の基礎方程式²⁾

空気型枠の基礎方程式は赤坂¹⁾のエアマットの基礎方程式を参考にし、断面力である水平力（軸力）、鉛直力（せん断力）、モーメントに関する式が以下のように導かれる。

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_{xy}}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial H_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + H_y \frac{\partial w}{\partial x} + H_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} - Q_x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} + H_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} + H_y \frac{\partial w}{\partial y} - Q_y = 0 \quad (5)$$

ここに、 H_x 、 H_y 、 H_{xy} は水平力、 Q_x 、 Q_y は鉛直力、 M_x 、 M_y 、 M_{xy} はモーメント、 w は鉛直たわみ、 q は鉛直荷重である（図2参照）。次に、断面力と内力との関係は以下のように表せる。

$$H_x = T_x - ph \quad (6)$$

$$H_y = T_y - ph \quad (7)$$

$$H_{xy} = T_{xy} \quad (8)$$

$$Q_x = T_x \frac{\partial w}{\partial x} + T_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} - ph\alpha \quad (9)$$

$$Q_y = T_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} + T_y \frac{\partial w}{\partial y} - ph\beta \quad (10)$$

$$M_x = \frac{h}{2}(T_x^l - T_x^u) \quad (11)$$

$$M_y = \frac{h}{2}(T_y^l - T_y^u) \quad (12)$$

$$M_{xy} = \frac{h}{2}(T_{xy}^l - T_{xy}^u) \quad (13)$$

ここに、 T_x 、 T_y 、 T_{xy} は補強膜の面内力（上下の補強膜の面内力の和）、 p は内圧、 h は空気型枠の厚さ、 α 、 β は落とし糸の鉛直軸からの x 軸、 y 軸方向への傾き、上付きの l 、 u は上下の補強膜を表す（図3参照）。ここで、空気型枠の厚さの変化は微小で無視し得るとしている。Hookの法則を考慮するとモーメントを表す式(11)(12)(13)は、次のように書き換えられる。

$$M_x = -\frac{h^2}{2}(C_x \frac{\partial \alpha}{\partial x} + C_{xy} \frac{\partial \beta}{\partial y}) \quad (14)$$

$$M_y = -\frac{h^2}{2}(C_{xy} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + C_y \frac{\partial \beta}{\partial y}) \quad (15)$$

$$M_{xy} = -\frac{h^2}{2}C_s(\frac{\partial \beta}{\partial x} + \frac{\partial \alpha}{\partial y}) \quad (16)$$

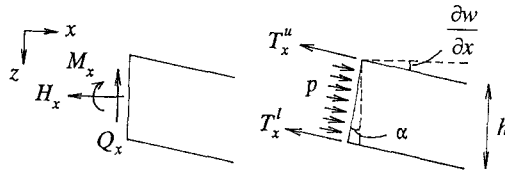


Fig.3 Equilibrium between sectional and internal forces

ただし、

$$C_x = \frac{tE_x}{1-\nu_x\nu_y} \quad (17)$$

$$C_y = \frac{tE_y}{1-\nu_x\nu_y} \quad (18)$$

$$C_{xy} = \frac{t\nu_y E_x}{1-\nu_x\nu_y} = \frac{t\nu_x E_y}{1-\nu_x\nu_y} \quad (19)$$

$$C_g = tG \quad (20)$$

ここに、 t は補強膜の厚さ、 E_x 、 E_y は補強膜の弾性係数、 ν_x 、 ν_y は補強膜のポアソン比、 G は補強膜のせん断弾性係数である。

今、空気型枠が4辺単純支持される場合を考える。空気型枠の端部で水平方向の拘束がなければ、

$$H_x = H_y = H_{xy} = 0 \quad (21)$$

従って、式(21)を式(6)(7)(8)に代入して、

$$T_x = T_y = ph \quad (22)$$

$$T_{xy} = 0 \quad (23)$$

式(22)(23)を式(9)(10)に代入して、

$$Q_x = ph\left(\frac{\partial w}{\partial x} - \alpha\right) \quad (24)$$

$$Q_y = ph\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \beta\right) \quad (25)$$

式(3)に式(24)(25)を代入して式(26)が、式(4)(5)に式(14)(15)(16)(24)(25)を代入して式(27)(28)がそれぞれ得られる。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \beta}{\partial y}\right) + \frac{q}{ph} = 0 \quad (26)$$

$$C_x \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + C_g \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} + (C_{xy} + C_g) \frac{\partial^2 \beta}{\partial x \partial y} + \frac{2p}{h} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \alpha\right) = 0 \quad (27)$$

$$C_g \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + C_y \frac{\partial^2 \beta}{\partial y^2} + (C_{xy} + C_g) \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x \partial y} + \frac{2p}{h} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \beta\right) = 0 \quad (28)$$

3つの未知数 w 、 α 、 β を2重フーリエ級数で表し、3つの式(26)(27)(28)を連立させて解くことができる。

4. 実験概要⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

空気型枠の荷重実験及び打設実験を行った。空気型枠の形状は図4に示すようであり、支持条件は4辺単純支持で行い、長辺を1800mm、短辺を900mmとして鋼製の丸棒により空気型枠を直接下から支持した。コンクリート製ブロックとアムスラー試験機により空気型枠中央部に部分分布荷重を(図4参照)、また、コンクリート製ブロックもしくは鋼板により等分布荷重をかけた。空気型枠のたわみを1/100mm精度の変位形で測定し、内圧は内圧計により常時管理し一定に保つようにした。

荷重実験としては、空気型枠単独に対してと、空気型枠と鋼製の薄板を重ね合わせたものに対して行った。

打設実験はトンネルの覆工コンクリートの打設を考慮したモデル実験を行った(図5参照)。アーチ型の空

気型枠を発泡スチロールで支持し、トンネル断面を模擬した通常の鋼製型枠との間にコンクリートを15cm程度の厚さで打設した。パイプレータを鋼製型枠の外側からあて締め固め作業を行った。アーチ部にはコンクリート上面にも型枠をあてがった。空気型枠の内圧を一定に保ちながら、打設後数日以内に空気型枠を取り外した。空気型枠の変形を測定するために、打設前の空気型枠のコンクリートと接触する面の位置と、型枠を取り外した後のコンクリートの型枠と接触していた面の位置を多数の箇所です1mmの精度で測定した。

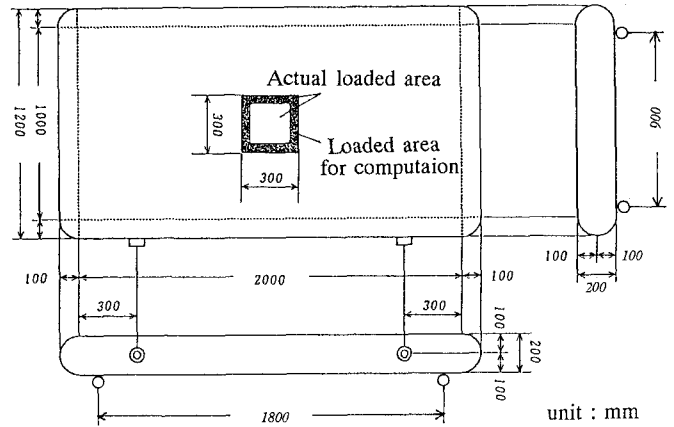


Fig.4 Airmat formwork - N and loaded area

5. 実験結果及び考察

5. 1 载荷実験（空気型枠のみの場合）

部分分布荷重を与えた場合の荷重と空気型枠下面の中央点での鉛直たわみとの関係を図6に示す。測定されたたわみは、概ね荷重と比例して増加するが、荷重が大きくなると増加の割合が小さくなる傾向も見られる。解析結果と比較すると、荷重が小さい間は測定されたたわみの方が増加割合が大きく、荷重が大きくなると逆に小さくなる傾向が見られる。実験結果と解析結果との差は、最大内圧が小さい空気型枠Yの方が小さい。これは、空気型枠Yの方が空気を充填した後の形状の初期不整が小さいことによるものと考えられる。形状の初期不整に関しては、5. 2節でも議論する。

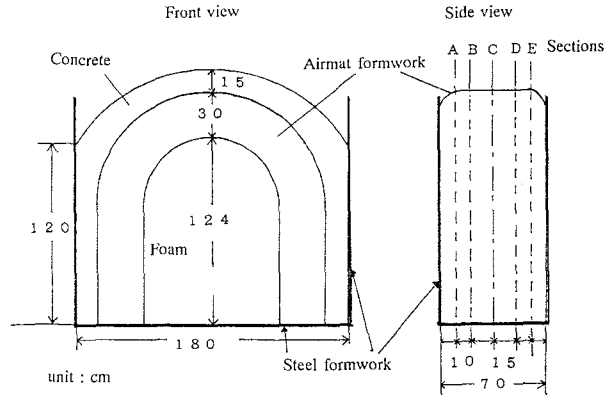
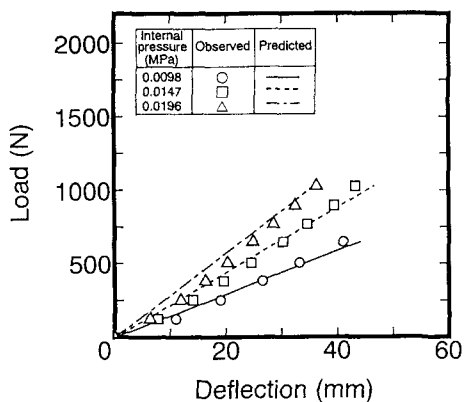


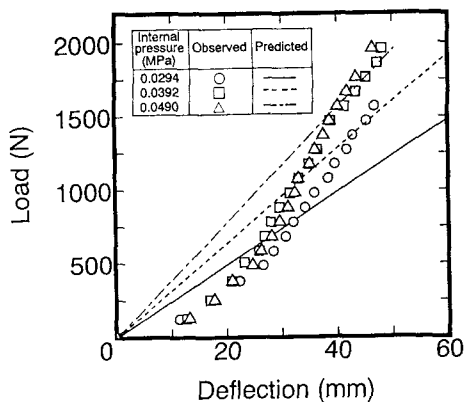
Fig.5 Test specimen for concreting of tunnel lining

空気型枠の短辺方向中点での長辺方向の鉛直たわみ分布を図7に示す。測定されたたわみ分布は、空気型枠の中央点に近いほどたわみ角が大きくなるが、分布荷重が作用している領域（図4参照）では、逆にたわみ角は小さくなる傾向がある。このような傾向は解析結果にも見られ、図7(a)でも明らかのように、たわみ分布形の解析結果と測定結果は類似している。分布荷重を空気型枠よりはるかに剛性の大きいコンクリートブロックで与えているので、実際の荷重分布は均等ではなく、ブロック端部に集中していると考え、空気型枠Nの解析では、ブロック端部にのみ分布荷重が作用している場合（図4参照）も解析を行った。この場合、たわみ分布形の解析結果は、測定結果により近くなった。図7(b)に結果の1例を示す。

たわみに与える内圧の影響を示したのが図8である。3章で示した解析理論からも推定されるように、内圧が大きくなるほどたわみは小さくなるが、このことを図8は明確に示している。また、解析理論によると空気型枠の厚さが厚くなるとたわみが小さくなる。図6において、厚さが厚い空気型枠Yの内圧が0.0196MPaの場合のたわみと、厚さが薄い空気型枠Nの内圧が0.0294MPaの場合のたわみの測定結果を、荷重が1000Nの時

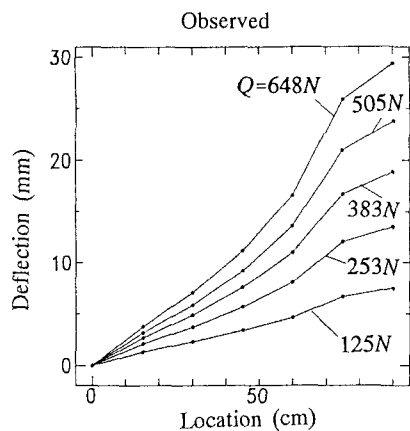
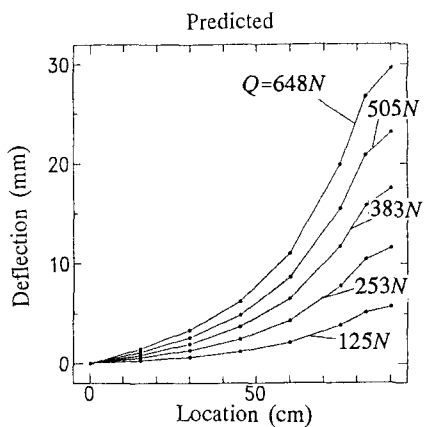


(a) Airmat formwork - Y

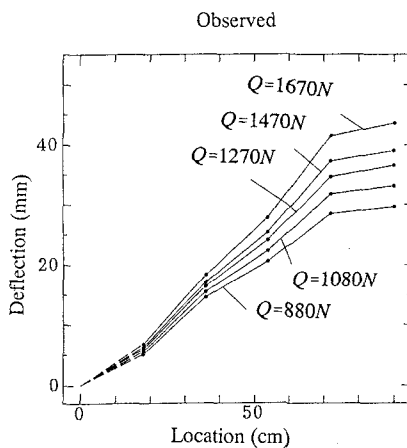
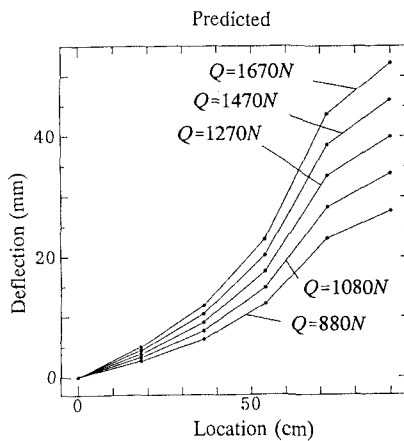


(b) Airmat formwork - N

Fig.6 Relationship between load and deflection (partially distributed load)



(a) Airmat formwork - Y ($p=0.0147\text{MPa}$)



(b) Airmat formwork - N ($p=0.0392\text{MPa}$)

Fig.7 Deflection distribution (partially distributed load)

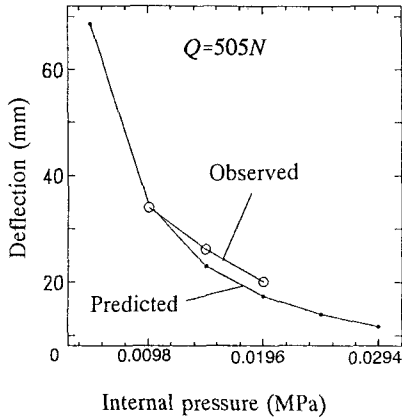


Fig.8 Relationship between internal pressure and deflection

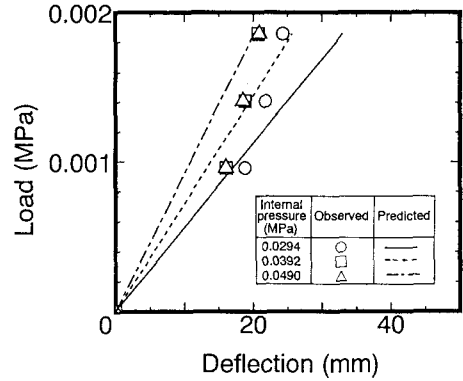


Fig.9 Relationship between load and deflection
(uniformly distributed load)

に比較すると両者は概ね同じであることから、厚い方がたわみが小さいと言える。

等分布荷重を与えた場合の、荷重と空気型枠中央部の鉛直たわみとの関係を示したのが図9である。この場合も、荷重が小さい間は測定されたたわみが大きく、荷重が大きくなると測定されたたわみが相対的に小さくなっている。内圧の大きさによるたわみの大きさの差異は、実験結果の方が小さくなっている。また、図10にたわみ分布を示した。測定されたたわみ分布は、解析により推定されるたわみ分布と比較すると、支承部付近を除いてほぼ一樣なたわみ分布となっているのが特徴である。

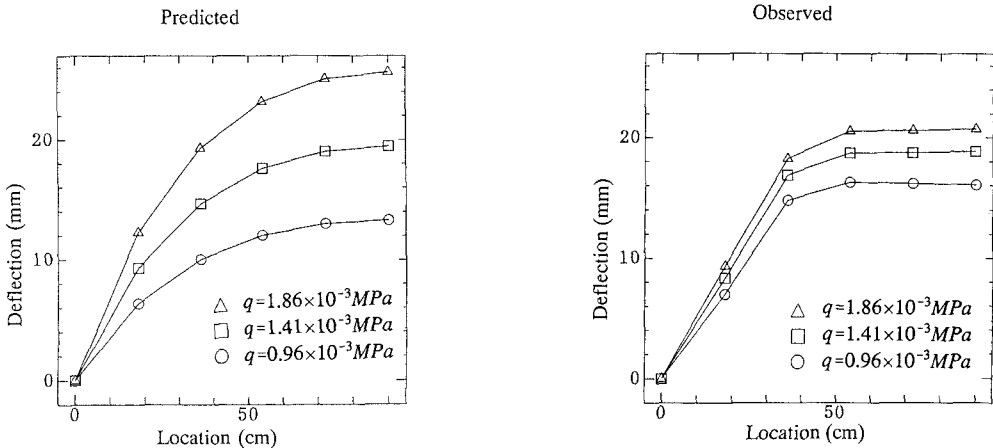


Fig.10 Deflection distribution of airmat formwork - N
(uniformly distributed load, $p=0.0392\text{MPa}$)

5. 2 载荷実験 (空気型枠と鋼板とを重ねた場合)

現実の施工を考えると、空気型枠と薄い板とを重ねて用いる場合が十分に考えられる。支保工の空気型枠に

対する集中荷重を避けるためであるとか、空気型枠の継目での型枠面としての不連続を避けるためであるとかの理由で、空気型枠のコンクリートと接しない側もしくは接する側に薄板を挿入し、重ねて用いることが考えられる。ここでは、薄い鋼板を空気型枠Nの下側に重ね、載荷実験を行った。

たわみの推定は、重ね板であると仮定し、次のように行った。すなわち、空気型枠と鋼板とのたわみ曲線が等しいとし、空気型枠と鋼板とが受け持つ荷重の和が実際に与えた荷重に等しいとして、たわみを求めた。

短い支承辺から長辺方向に54cm、長い支承辺から短辺方向に45cmの位置の鉛直方向のたわみを示したのが図11である。空気型枠の上面で測定したたわみの方が鋼板の下面で測定したたわみよりかなり大きい。このことは、空気型枠のみが何らかの理由で変形していることを示している。そこで、空気型枠を床に直接置き、空気型枠を押しつぶすように荷重をかけ、空気型枠上面でたわみを測定したところ、載荷直後から図11に示されている空気型枠と鋼板の鉛直たわみの差程度の大きさの鉛直たわみが観察された。つまり、空気型枠が荷重を載荷する前から形状に不整があり、補強膜面が平坦でなく床との間にすき間があり、載荷されたことによりこのすき間分だけたわみとして測定されたと考えられる。測定されたたわみは、内圧が大きいほど大きく、また、空気型枠の端部に近いほど大きかった。空気型枠Nの場合、内圧が大きいほど形状の初期不整が大きくなる。図11において、空気型枠と鋼板との測定されたたわみの差が荷重によらずほぼ一定であることから、空気型枠を直接床に置いた時のように、空気型枠と鋼板との間にすき間があり、その分がたわみの差として測定されたと考えられる。なお、内圧や荷重による落とし糸の伸張量は、計算ではここで測定されているたわみより1桁オーダーが違うので、これによる補強膜の変形（換言すれば空気型枠の厚さの変化）の影響は小さいと考えられる。図11の空気型枠と鋼板のたわみの差が荷重によらずほぼ一定であることは、空気型枠の厚さがほぼ一定であることを示している。

今、図11に示されている鋼板のたわみが、空気型枠と鋼板とを重ねた場合のたわみを代表していると考えれば、解析理論により推定されるたわみよりかなり小さいことになる。このことは、空気型枠と鋼板との間で滑りが自由に起こるとした仮定、つまり、両者が非合成であるとした仮定が、正しくない可能性もある。空気型枠と鋼板との間で合成作用が期待できるとも言えよう。

5. 3 施工実験

トンネル断面を模擬した試験体による施工実験結果として、型枠面のコンクリート打設前の位置と打設後の位置との比較を図12に示した。この図は空気型枠Yを用いた実

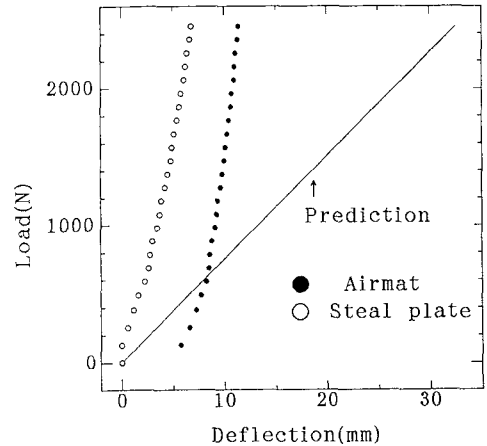


Fig.11 Relationship between load and deflection (airmat formwork - N with superimposed steel plate)

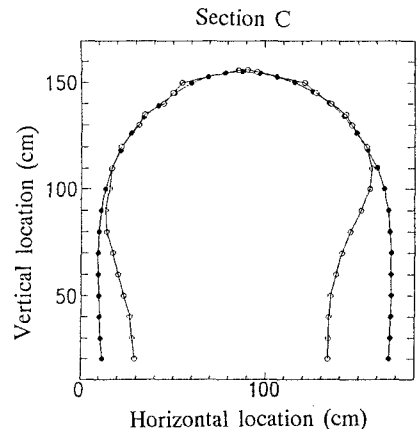


Fig.12 Deformation of airmat formwork - Y after concreting (• and ○ : before and after concreting)

験結果であり、内圧は0.01MPaである。内圧より大きな外圧が作用した場合の空気型枠の変形性状も併せて観察するために、内圧をこの大きさに設定した。この内圧では、厚さ40cmのフレッシュコンクリートの重量まで空気型枠の補強膜面がへこまないはずであり、図12でも、最も高い位置から概ね40cmより下の箇所では型枠面が大きく変形しているのが明かである。それより上の箇所ではほとんど変形が観察されていない。空気型枠Nを用いての施工実験では、内圧を0.015MPaに保ったが（型枠からの空気の漏洩により、これ以上の内圧を保持できなかった）、鉛直部のコンクリートの幅が狭く、側圧が伝達されなかったのか、型枠の変形は小さかった。

空気型枠は容易に取り付け、取り外すことができ、コンクリートの型枠と接していた面は非常に滑らかであった。すなわち、空気型枠の良好な施工性が示されたと言える。

6. 結論

エアマットをコンクリート型枠（空気型枠）として適用することを念頭に置いて行った、載荷実験及び施工実験より、以下のことが結論できた。

- (1) 本研究で使用した空気型枠であれば、コンクリートの型枠として十分に適用できる剛性を有している。
- (2) エアマットの解析理論により、4辺単純支持された空気型枠の変形は概ね推定できる。ただし、空気型枠の形状の初期不整（平坦性の乱れ）がたわみに与える影響は大きい。
- (3) 空気型枠の内圧がフレッシュコンクリートの重量もしくは側圧より大きければ、型枠としての形状を良好に保持することができる。また、空気型枠の取り付け、取り外しは容易で、コンクリート表面も良好に仕上がる。

現時点では、たわみの実験値と解析理論値との間にまだ差異があり、その原因の究明はさらに行われるべきである。現在、有限要素解析と実大構造物での施工実験を行っており、これらの結果と合わせ、今後新しい研究成果を発表していく予定である。

謝辞

本研究を行うに際し、エアマットの製作で太陽工業株式会社の本城豊氏、載荷、施工実験の実施で北海道大学工学部の木村勉氏、論文の作成で北海道大学工学部4年生の佐々木理文氏より多大なる援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 林剛・赤坂隆ほか：軽構造の理論とその応用 下、日本科学技術連盟、pp.186-189、1966年。
- 2) 峰山瑞香：内圧を受ける膜構造の静的解析、北海道大学工学部土木工学科卒業論文、1991年3月。
- 3) 吉田安範：コンクリート型枠として用いたエアマットの変形性状、北海道大学工学部土木工学科卒業論文、1992年3月。
- 4) 中村敦：空気型枠の変形について、北海道大学工学部土木工学科卒業論文、1993年3月。
- 5) 上田多門・吉田安範・小原由幸・小野定・林川俊郎・角田與史雄：空気型枠の力学的挙動に関する実験的研究、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.554-555、1992年9月。

（1993年9月16日受付）