

プレキャストトンネル構造の 力学的安定に関する実験的研究

足立 紀尚¹・木村 亮²・岸田 潔³・鮫島 竜一⁴・岩崎 喬夫⁵・河野 定⁶

¹フェロー会員 Ph.D. 工博 (財)地域 地盤 環境研究所理事 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail: adachi@geor.or.jp

²正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学助手 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 大阪市水道局 工務部工務課第2設計係 (〒559-8558 大阪市住之江区南港北1-14-16)

⁵モジュラーチ工法協会 技術委員長 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋2-24-14)

⁶モジュラーチ工法協会 技術副委員長 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋2-24-14)

プレキャストトンネル構造は、構造上土被り荷重そのものが覆工構造に作用するものと考えているため、土被りが大きくなる高盛土では作用荷重を大きく想定し覆工を必然的に厚くせざるを得ない。そこで本研究では、アルミ棒積層体2次元降下床実験を実施し、埋め戻しにより覆工に作用する荷重・モーメントを計測し、埋め戻し過程および土被りがプレキャスト構造に与える影響について検討を行う。また、低剛性材料を覆工構造周辺に設置することで、低剛性材料が埋め戻しに伴って変形することにより荷重の緩和材としての効果の検証を行う。実験結果より、低剛性材料を導入することで、土被り荷重を軽減できることが確認できた。

Key Words : pre-cast concrete tunnel, earth pressure, bending moment, trap door experiments, the stability of tunnel structure, loosening zone

1. はじめに

プレキャストトンネルは、多分割プレキャストコンクリート部材からなるアーチ構造である。ボックスカルバートが適用されていた箇所に適用が期待されている。景観性・施工性という点が優れているものの、土被りが大きくなる高盛土では、作用荷重を大きく想定し覆工を必然的に厚くせざるをえない。課題は、土被り荷重の評価、土被りの増大(高盛土)、耐震性に関する検討等があげられる。

土砂を埋め戻すことによりプレキャストトンネルを建設する場合には、プレキャストトンネルに作用する荷重(以下、トンネル荷重)は、土被り荷重以上になると共にプレキャストトンネル覆工(以下、トンネル覆工と呼ぶ)に発生する曲げモーメントが大きくなることが予想される。特に、土被りが大きい場合には、トンネル荷重を支持するためにはトンネル覆工を必然的に厚くせざるを得なくなり、不経済である。そのため、プレキャストトンネルの建設は、土被りの小さい場合に限られることが多い。そこで、土被りが大きい場合のプレキャストトンネル建設において、トンネル荷重を軽減させる方法として、低剛性材料をトンネル周辺部に設置する手法を

提案する。すなわち、埋め戻しに伴って低剛性材料が収縮することにより、トンネル掘削と同様のグラウンドアーチが形成されるのであれば、トンネル荷重は軽減されると考えられる。

本研究では、地盤材料にアルミ棒積層体を用い、種々のプレキャストトンネル覆工模型(脚部の有無、分割ヒンジの有無)について2次元降下床模型実験を実施し、土被りの変化に伴いトンネル覆工およびその周辺に作用する鉛直荷重ならびに覆工に発生する曲げモーメントについての検討を行った。また、低剛性材料をトンネル模型周辺に設置し、荷重の軽減効果、覆工に作用するモーメントへの影響を低剛性材料の剛性ならびに設置位置をパラメータとして検討を行った。

2. 模型実験の概要

本研究では、埋め戻しによりプレキャストトンネルを建設する際のプレキャストトンネル覆工構造およびその周辺地盤の力学挙動を把握することを目的として、地盤材料にアルミ棒積層体を用いたトンネル模型実験を実施した。さらに、プレキャストトン

ネル覆工構造周辺部に低剛性材料を設置することにより、低剛性材料（土被り荷重緩和材料：以下緩和材）を挿入することの効果・有効性を覆工および周辺地盤の力学挙動を解明することで検討を行う。

なお、模型実験を実施するにあたり、以下のような仮定を行う。

- 1) 2次元平面ひずみ状態を仮定する。
- 2) 地盤材料は通常粘着力を有するが、粘着力のないアルミ棒を用い、砂質地盤を対象とする。
- 3) 実地盤は様々な形状および大きさの粒子の集合体であるが、本実験では直径 1.6 mm, 3.0 mm の円形断面を有する 2 種類のアルミ棒を混合している。
- 4) アルミ棒積層体を積み上げるにより、地盤の埋め戻しを模擬している。

このような仮定のもとで実施した本実験は、実際の地盤条件、施工条件とは異なっており、実験結果を直接的に実際の地盤に適用することは困難である。しかしながら、種々の要因が複雑に絡み合った現実の問題を、そのまま解明しようとするのは容易なことではない。そこで、いくつかの要因を取り除いて、特定の要因だけを考慮した模型実験により、基礎的な現象を把握し、プレキャストトンネルの設計規範の確立を目指そうとするのが、本研究の立場である。

(1) 地盤材料

砂質土の 2 次元モデルを想定して、地盤材料にアルミ棒積層体を用いる。これは長さ $b = 50 \text{ mm}$ 、直径 1.6 mm と 3.0 mm を重量比 3:2 で混合したもの（単位体積重量 $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$ ）で、豊浦珪砂の粒径加積曲線にほぼ平行となる割合である^{1), 2)}。これらを横に並べて積み上げ、模型地盤を作成する。

(2) トンネル覆工模型および緩和材

トンネル覆工模型として 3 種類の覆工模型を用いる。それぞれの覆工模型は半円筒形状で奥行き $b_t = 65 \text{ mm}$ 、トンネル幅 $D = 200 \text{ mm}$ 、厚さ $t = 2 \text{ mm}$ のアクリル製（弾性係数 $E = 2.5 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$ ）の模型である。各覆工模型の仕様を Fig.1 に示す。それぞれの覆工模型の種類による覆工の境界条件を Fig.2 に示すように想定している。

また、Fig.3 のように、覆工模型前方（アルミ棒積層体と支持板に干渉しない位置）の表側と裏側にひずみゲージ（GFLA-3-70）を貼付け、表裏のひずみの値 ϵ_{out} 、 ϵ_{in} から次式に示すように各点に発生する曲げモーメント M を算出している。なお、ひず

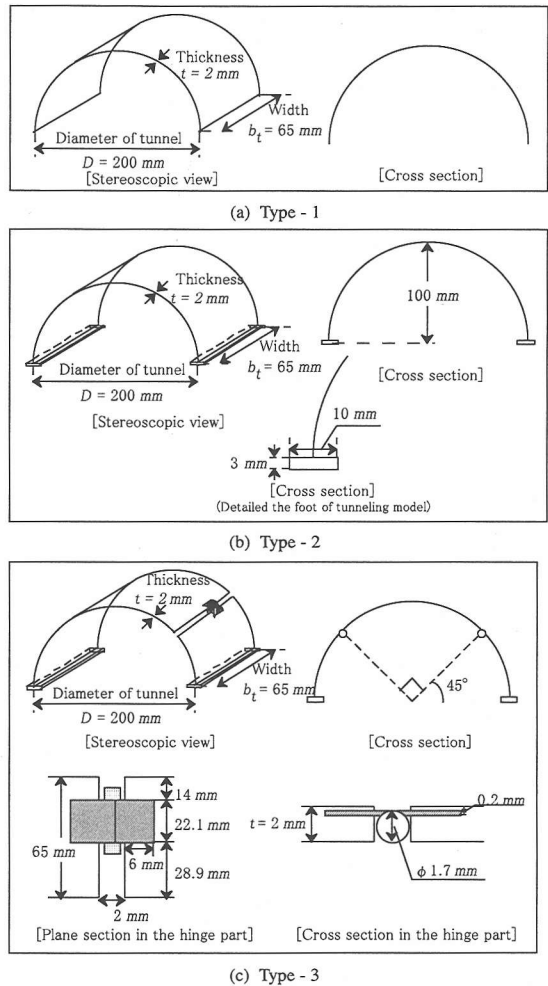


Fig.1 Three kinds of tunnel lining (pre-cast concrete) models (Materials of hinge and tunnel lining are brass and acrylic, respectively.)

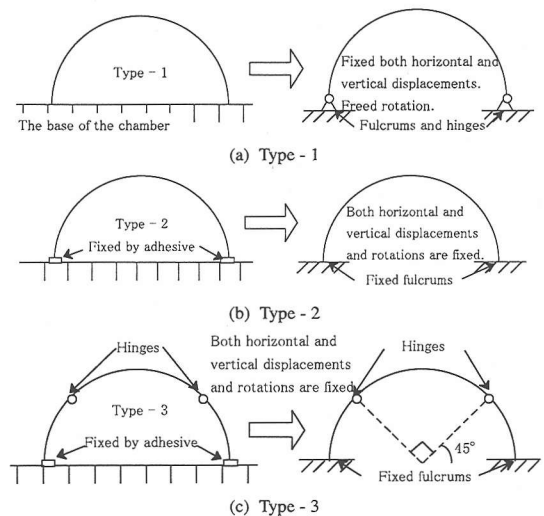


Fig.2 The boundary condition of tunnel lining models

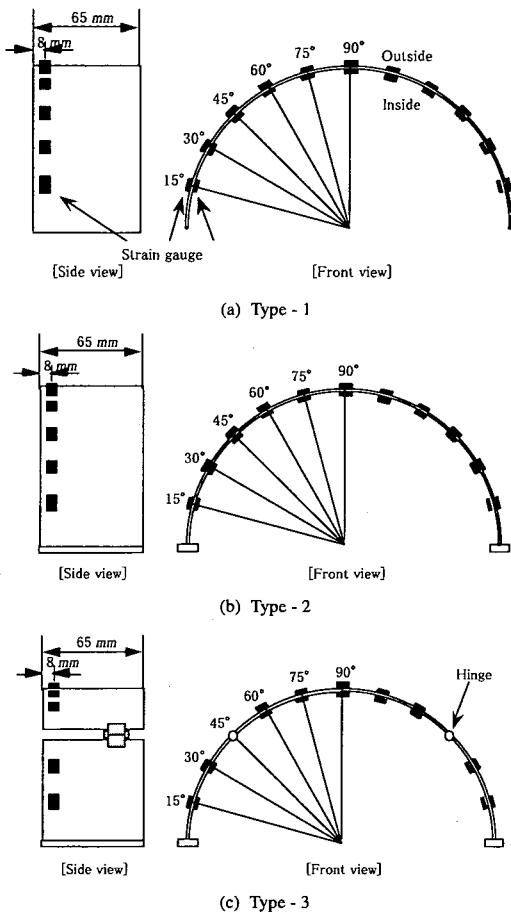


Fig.3 Introduced strain gauge in each tunnel lining model

みの計測点は Type-1, 2 では計 11 点, ヒンジ部が存在するため Type-3 では計 9 点である。

$$M = -\frac{2EI(\epsilon_{out} - \epsilon_{in})}{t} \quad (1)$$

ただし, E : 覆工模型の弾性係数[N/mm²]
 I : 断面模型の断面 2 次モーメント [mm⁴], $b_t^3/12$
 t : 覆工模型の厚さ[mm]
 $\epsilon_{out}, \epsilon_{in}$: 覆工模型外側・内側のひずみである。

緩和材として 2 種類のスポンジを用いた。それぞれのスポンジは直方体で奥行き 50 mm, 厚さ 10 mm である。スポンジ A はマウスパッド用スポンジ, スポンジ B はクッション用スポンジである。それぞれのスポンジに対して, 平板載荷試験を実施した結果を Fig.4 に示す。また, 二軸試験の結果からアルミ棒積層体の弾性係数 E [Pa] = $0.4903 + 100 \cdot \sigma_h$ [Pa]と求められており³⁾, Fig.4 には側圧 $\sigma_h = 0.8\sigma_v$ としてアルミ棒積層体の応力-ひずみ関係をプロットして

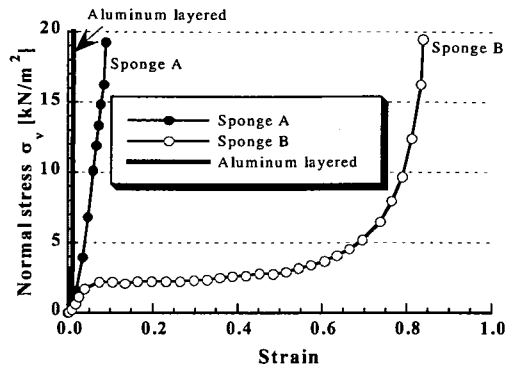


Fig.4 The stress - strain relation of the sponges

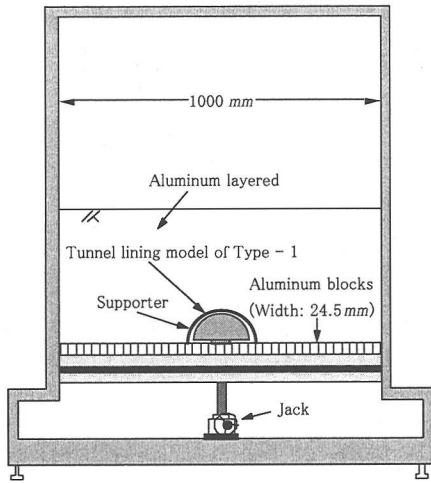
いる。平板載荷試験は, 厚さ 10 mm のスポンジ(200 × 50 mm)の上面に, 厚さ 3 mm のアルミ板(200 × 50 mm)を載せ, そのアルミ板の中心にジャッキを用いて一点載荷を行った。なお, ジャッキの先端部に設置したロードセル (CLS-20KA) により載荷荷重を計測し, 計測した荷重をスポンジの面積 (200 × 50 mm) で除した値を垂直応力 σ_v としている。また, レーザ変位計 (LB-60) により, 載荷点付近の変位を 2 点計測し, これらを平均し, スポンジ厚さで除してひずみに換算している。この図からスポンジ A よりもスポンジ B のほうが剛性は小さいことがわかる。

(3) 実験装置

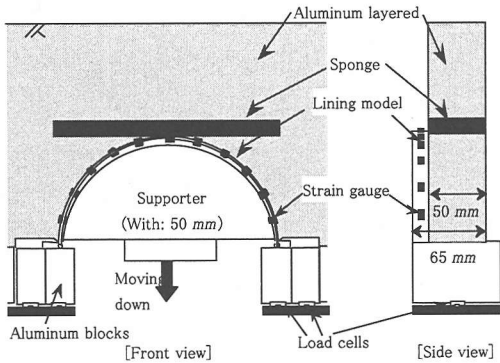
本実験で用いた実験装置の概要を Fig.5 に示す。本実験装置は, 足立ら^{4), 5)}が従来トンネル降下床実験に用いてきた土圧分布計測型降下床実験装置を用い, プレキャスト構造を想定したトンネル覆工模型を適用したものである。この装置の底面は幅 24.5 mm のアルミ製のブロックを並べたもので構成されており, 覆工を支持するブロックの底面に取付けたロードセル (CLS-10KA) と覆工周辺を支持するブロックの底面に取付けたロードセル (CLS-5KA) により, 装置底面に作用する鉛直荷重を分布として捉えることができる。また, 隣接するブロックの間には 0.05 mm の隙間を取っており, ブロック同士が干渉しないようになっている。また, 3 個のブロックを支持する受け皿はジャッキに接続され, ハンドルを回転させるとブロック上に接続した支持板は下降する。

(4) 実験パターン・計測項目・実験手順

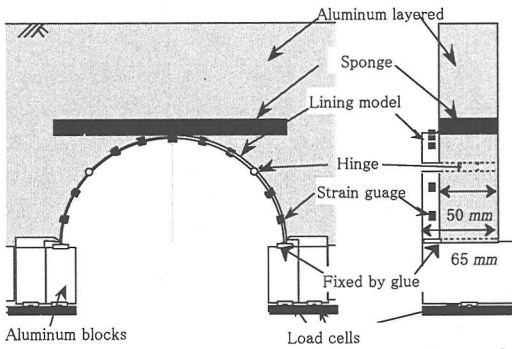
覆工に作用する土圧は, 覆工あるいはトンネルの種類や緩和材の剛性, 厚さ, 設置位置によって異なると考えられる。本研究では, 覆工模型について 3



(a) Testing apparatus



(b) Set up of the Type - 1



(c) Set up of the Type - 2 or 3

Fig.5 Trap door tester and setting up the tunnel lining models

パターン、スポンジの種類、厚さおよび設置位置について7パターンで計21パターンの実験を行い、単純にそれぞれの影響の把握を試みた。

その実験パターンを Fig.6 に示す。なお、スポンジ厚さが 20 mm の場合には、厚さ 10 mm のスポンジを2枚重ねたものを用いて実験を行った。

本実験での計測項目は、覆工およびその周辺に作用する鉛直荷重および覆工各点に発生するひずみで

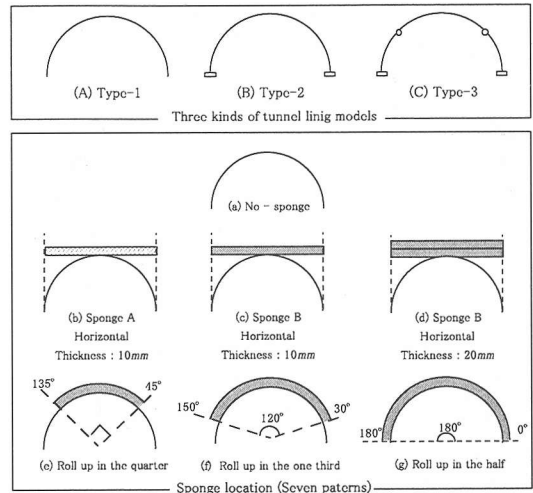


Fig.6 Experimental patterns

(Three kinds of tunnel lining models and seven patterns of sponge location. Total : 21 patterns)

ある。なお、覆工天端から土被り $H = 700 \text{ mm}$ ($3.5 D$)まで、土被り 50 mm ($0.25 D$)ごとに計測を行う。

実験手順は、覆工模型の種類によって異なる。

Type - 1 の場合、

- 1) ロードセルが正しく作動するかどうかをすべての装置底面のブロックについて確認する。
- 2) 覆工模型を支える支持板を装置底面のブロック上に設置し、ロードセルを初期化する。
- 3) 覆工模型を設置し、支持板で内側から支える。
- 4) 覆工の天端までアルミ棒を積み上げる。
- 5) 覆工模型と接触しないように支持板を大きく下降させた状態を初期状態とし、その状態の鉛直荷重およびひずみを計測する。
- 6) 各パターンに応じた位置にスポンジを設置する。
- 7) 天端を基準として土被り H が 50 mm ($0.25D$) 毎に、鉛直荷重、覆工のひずみを計測し、土被り H が 700 mm ($3.5D$) になるまでアルミ棒を積み上げていく。

以上が、Type - 1 の覆工模型における実験手順である。これに対し、Type - 2, 3 は以下の通りである。

- 1) 支持板を取り除く。
- 2) Type - 1 の 1) と同じ。
- 3) 実験装置底面の中心に覆工模型を設置する。
- 4) 覆工の天端までアルミ棒を積み上げ、その状態を初期状態と定義し、鉛直荷重およびひずみの計測を行う。
- 5) Type - 1 の 6) と同じ。
- 6) Type - 1 の 7) と同じ。

また、本稿で多用する記号について説明を加えて

おく。

H : トンネル覆工天端からの土被り高さ[mm]

D : トンネル覆工幅, 本実験では一定値 200 mm

H/D : 土被り比

b : 地盤の奥行き, 本実験では一定値 50 mm

なお, 以下に説明する鉛直荷重に関する実験結果は, 土被りが覆工天端の時 ($H = 0$) の鉛直荷重からの差をプロットする。

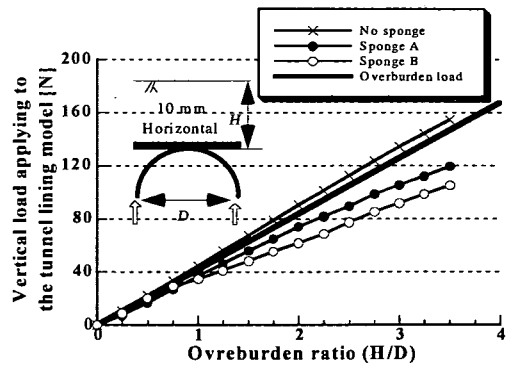
3. 実験結果および考察

(1) 覆工に作用する鉛直荷重

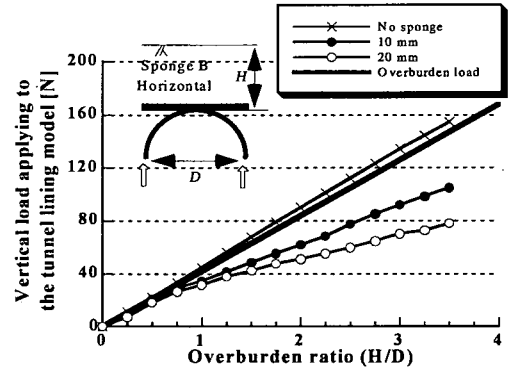
覆工の左右脚部に作用する荷重の合計を覆工に作用する鉛直荷重とし, 土被り比との関係を Figs.7-9 に示す。Fig.7 は Type - 1 の場合, Fig.8 は Type - 2 の場合, Fig.9 は Type - 3 の場合の結果である。また, (a)はスポンジの種類による比較, (b)はスポンジの厚さによる比較, (c)はスポンジの設置位置による比較を示している。図中の土被り荷重とは, $\gamma \times H \times D \times b$ によって求めた値である。ここで, γ はアルミ棒積層体の単位体積重量である。参考までに, 覆工模型を用いずに一般的な降下床 (幅 200 mm) で実施した降下床実験における降下床荷重の収束値を各図の(c)に示す。なお, 降下床実験における土被り高さ H は降下床から地表面までの距離である。これらの図から, 覆工模型の種類 (Type - 1~3) によらず, スポンジなしの場合には, 覆工に土被り荷重あるいはそれ以上の鉛直荷重が作用していることが確認できる。

Figs.7(a), 8(a), 9(a)より, 土被り比が大きくなると, スポンジなしに比べてスポンジを設置する場合, 覆工に作用する鉛直荷重は小さくなる。さらに, スポンジ A に比べてスポンジ B の場合, 覆工に作用する鉛直荷重は小さくなる。また, Figs.7(b), 8(b), 9(b)の結果から, 土被り比が大きい時には, スポンジ厚さが大きいほど覆工に作用する鉛直荷重は小さくなる。すなわち, スポンジを設置することにより, 覆工に作用する鉛直荷重が軽減され, 特に, スポンジの剛性が小さい場合およびスポンジの厚さが大きいほど, 覆工に作用する鉛直荷重の軽減効果が大きい。

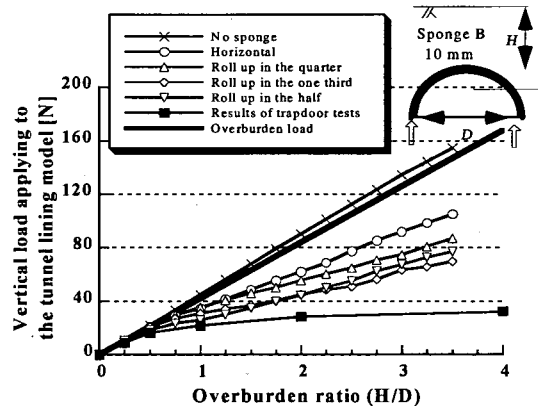
つぎに, スポンジの設置方法の違いによる覆工に作用する鉛直荷重への影響を Figs.7(c), 8(c), 9(c)により検討を行う。各図の結果から, 土被り比が大きくなると, スポンジを水平に設置する場合に比べ, 覆工周辺にスポンジを設置した場合, 覆工に作用する鉛直荷重は小さくなる。さらに, 1/4 周巻きの場合



(a) Influence of the difference of the sponge types



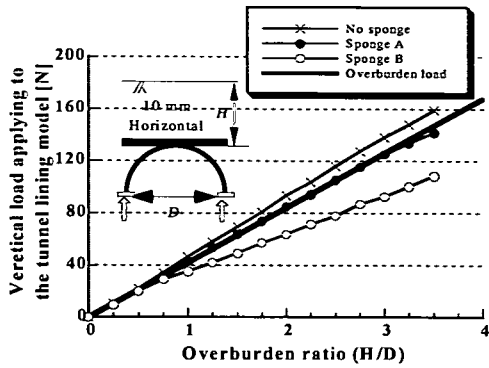
(b) Influence of the thickness of sponge



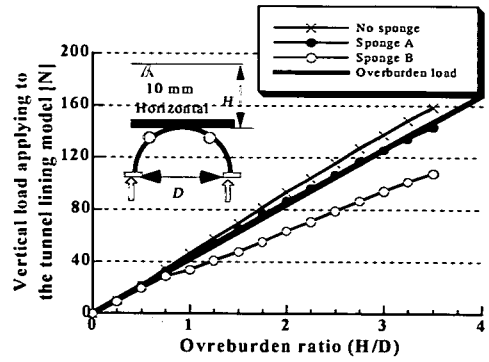
(c) Influence of the sponge location

Fig.7 The relationship between the vertical load and the overburden ratio (Type - 1)

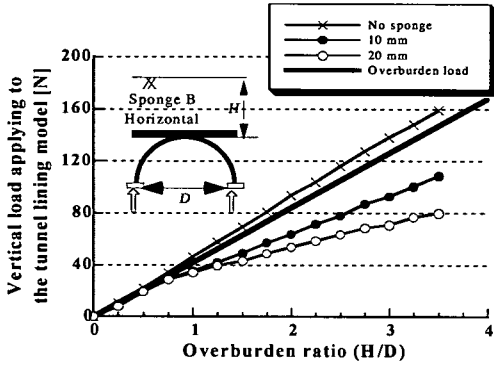
に比べて 1/3, 1/2 周巻きの場合のほうが, 覆工に作用する鉛直荷重は小さくなる。また, 土被り比が 2 で比較すると, スポンジを覆工周辺に設置した場合の覆工に作用する鉛直荷重は, 降下床実験に比べて約 2 倍であるが, スポンジなしの場合と比べて約 1/2 倍である。また, 従来の降下床実験の結果と比較すると, スポンジを設置することにより作用鉛直荷重が減少しており, スポンジが無い状態に比べて降下床実験の結果に近づいている。従来の降下床実験とは異なり, 本研究ではプレキャストトンネル施



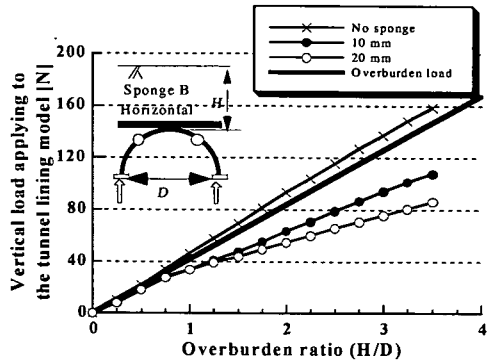
(a) Influence of the difference of the sponge types



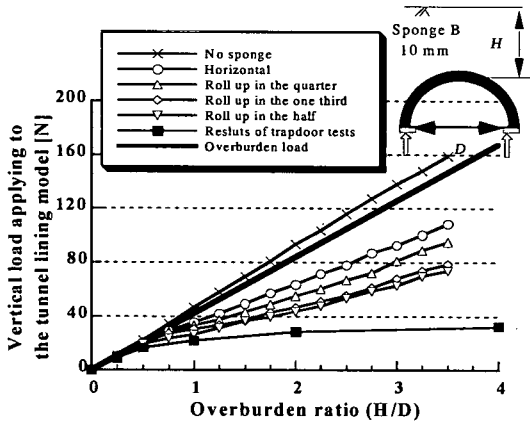
(a) Influence of the difference of the sponge types



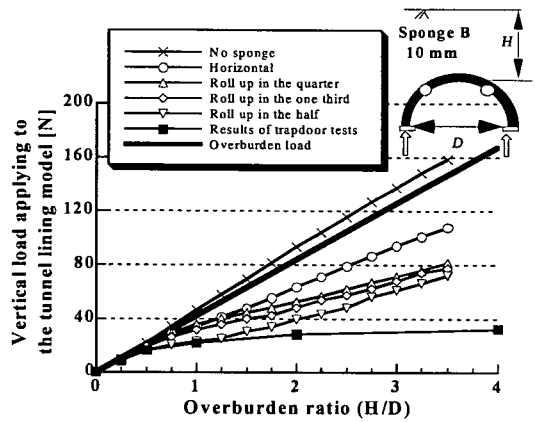
(b) Influence of the thickness of sponge



(b) Influence of the thickness of sponge



(c) Influence of the sponge location



(c) Influence of the sponge location

Fig.8 The relationship between the vertical load and the overburden ratio (Type - 2)

Fig.9 The relationship between the vertical load and the overburden ratio (Type - 3)

工を模擬するため模型地盤を積上げながら計測を行っている。模型地盤を積上げること、すなわち埋め戻しを行うことは、地山自身の荷重再配分（支保効果）を得にくい結果となっている。しかしながら、緩和材を導入することで人工的な変形が生じ地山にトンネルを掘削した状態に近づくことを示している。

スポンジを用いることで覆工に作用される鉛直荷重が減少され、特に、覆工にスポンジを巻く範囲が大きい場合に、覆工に作用する鉛直荷重の軽減効果

が大きい。これは、土被り比の増加にともない、スポンジに作用する鉛直荷重が増加し、スポンジが収縮することにより、アルミ棒積層体内のトンネル覆工上方にグランドアーチが形成されるためと考える。特に、1/2周巻きでは、覆工模型がいずれの形でも土被り比が1までは、従来の降下床実験と類似した作用鉛直荷重の推移を示す。従来の降下床実験が、土被り比1.5程度で鉛直荷重が収束するのにに対し、本研究ではスポンジを導入することで鉛直荷重の

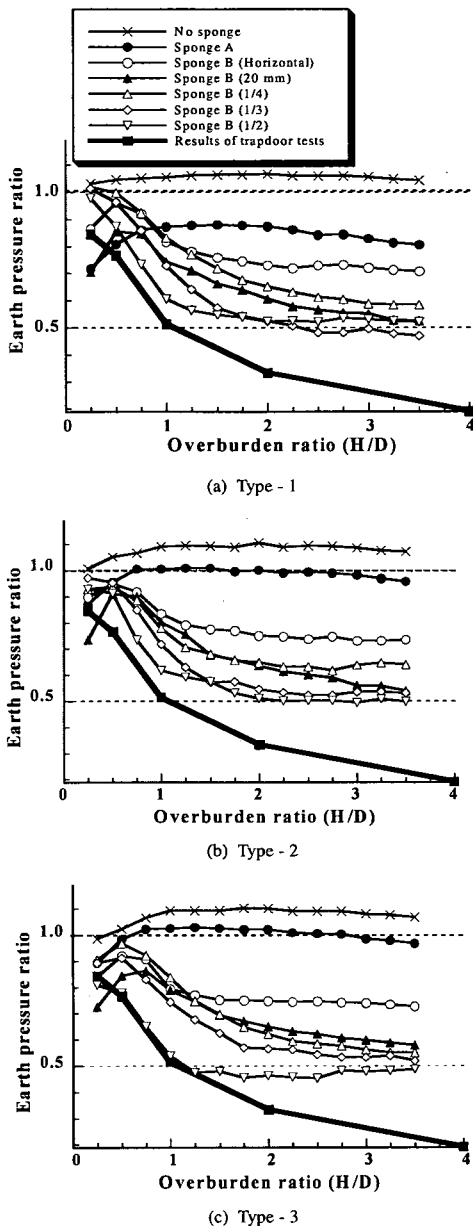


Fig.10 The relationship between the earth pressure ratio on the tunnel lining model and the overburden ratio

軽減を行っているが、収束値に至っていないのも事実である。本実験は、従来の降下床実験と異なり、モデル地盤を作成しながら計測を行う。このため、トンネル覆工模型に作用する鉛直荷重は、積上げた土被り荷重に影響され、例えば低剛性の緩和材を導入しても収束値には至らない結果となっている。

つぎに、スポンジの設置による覆工に作用する鉛直荷重の軽減効果について考察を行う。覆工模型の種類ごとに、覆工土圧比と土被り比の関係を Fig.10 に示す。(a)は覆工模型が Type - 1 の場合、(b)は

Type - 2 の場合、(c)は Type - 3 の場合の結果である。ここで、覆工土圧比とは、覆工に作用する鉛直荷重を作用している面積 ($D \times b$) で除して鉛直土圧とし、さらに計測時点での土被り圧 ($\gamma \times H$) で除したものである。なお、図中の破線で示すように覆工土圧比が 1 の場合には、覆工に作用する鉛直土圧は土被り圧に等しい。これらの図から、覆工模型の種類 (Type - 1 ~ 3) によらず、以下のことがいえる。

- 1) スポンジ B を設置した場合、土被り比の増加にともない、覆工土圧比は減少し、その後、ほぼ一定値に収束する。
- 2) スポンジ厚さ 10 mm の場合には、覆工土圧比の収束値は水平の場合に 0.8 程度、1/4 周巻きの場合に 0.6~0.7、1/3、1/2 周巻きの場合に 0.5~0.6 である。
- 3) スポンジ B を設置した場合には、土被り比が 1 以下の時には、土被り比が大きい時に比べて覆工土圧比は大きい。

これらより、土被り比が 1 以下の時には、覆工に作用する土圧の軽減効果が小さい。一方、土被り比が 1.5 以上の時には、覆工に作用する土圧の軽減効果が大きい。このことから、土被りが小さい時には、スポンジが収縮したとしてもグランドアーチが形成されにくく、また、土被りが大きい時には、スポンジが収縮することによりグランドアーチが形成されやすい。このため、土被り比が約 1.5 以上のような土被りが大きい場合の施工において、低剛性の緩和材をトンネル周辺に設置すると覆工に作用する土圧の軽減効果が大きいと考えられる。

(2) 覆工周辺に作用する鉛直土圧

Fig.11 に覆工周辺に作用する鉛直土圧と緩和材の配置効果の関係として、実験装置底面に作用する鉛直土圧分布を示す。これらは Type - 3、厚さ 10 mm のスポンジ B を設置した場合の結果である。ここで示す土圧比は、実験装置底面に作用する鉛直荷重を $b \times 24.5$ mm (1 ブロックの幅) で除して鉛直土圧とし、その鉛直土圧を計測時点での土被り圧で除した値である。これらの図から以下の知見が得られる。

- 1) 水平の場合および 1/3、1/2 周巻きの場合、土被り比によらず、覆工周辺 (0.5D 程度の範囲) に作用する鉛直土圧は土被り圧よりも大きい。
- 2) 1/2 周巻きの場合、土被り比の増加にともない、覆工脚部に隣接する位置での土圧比は減少する。上記の 2) の現象についての考察を以下に示す。

1/2 周巻きの場合には、土被り比の増加に伴って、覆工脚部に隣接する位置での土圧比が小さくなる。これは、覆工脚部に隣接する位置のアルミ棒積層体

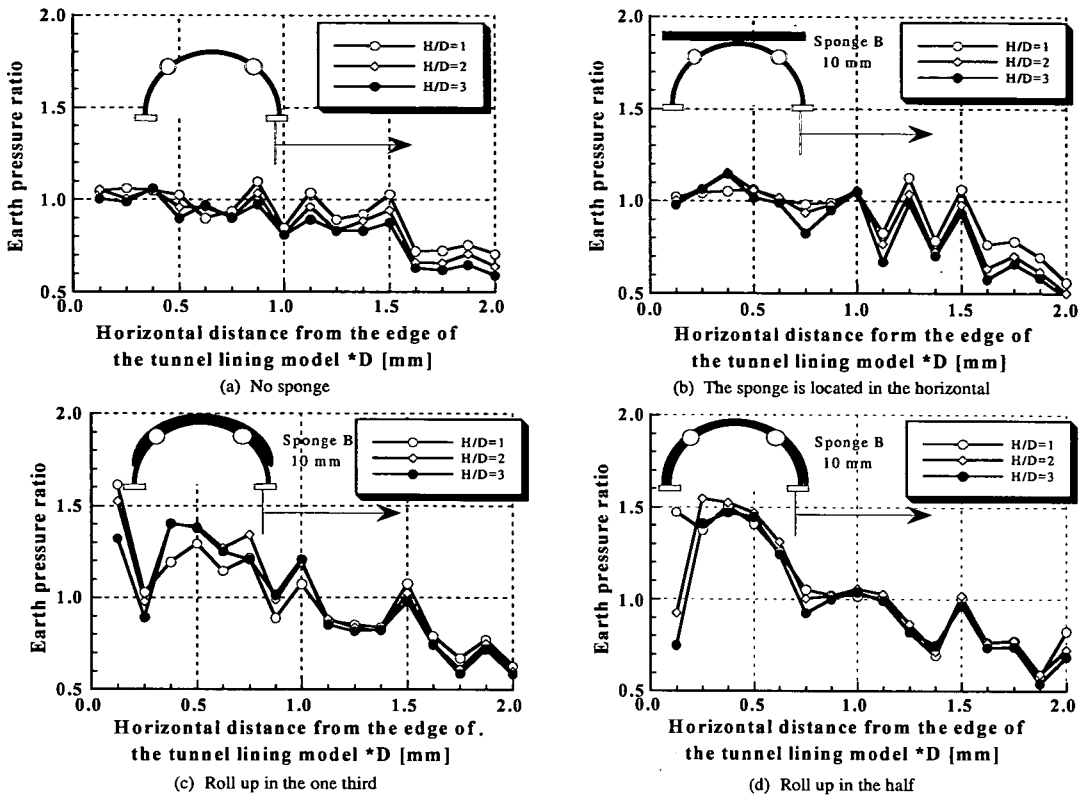


Fig.11 The distributions of vertical earth pressure around the tunnel lining model

が、覆工からの水平反力を十分に得ることができず、モール円を考えると円が破壊規準に近づく方向に移動することが考えられ、その部分で降伏状態となり、鉛直土圧の分担を受け持てない状態になっていることを意味している。この原因は、他のパターンとは異なり、覆工と覆工脚部に隣接する位置のアルミ棒積層体の中にはスポンジが存在するためである。スポンジが存在することで水平方向の変形が助長され、水平反力を十分に得られない状況になっている。このことから、スポンジを覆工周辺に設置することにより、覆工に作用する水平土圧も軽減されていると考えられる。

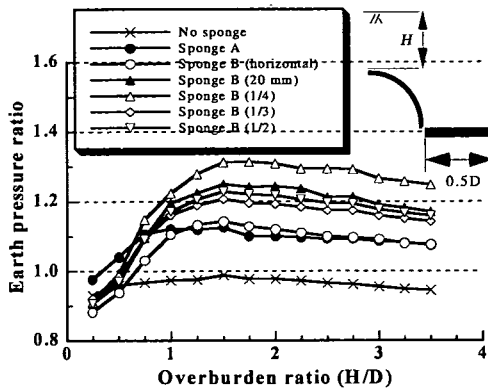
また、いずれのケースも覆工模型からの距離が $1.5D$ 以上の範囲で土被り比が 1 以下となっている。覆工形状や低剛性緩和材の影響で、水平方向の変形が許容され、このような現象が現れているものと考えられる。

覆工模型の種類毎に、覆工周辺土圧比と土被り比の関係を図 12 に示す。なお、覆工周辺土圧比は、覆工端から $0.5D$ の範囲の土圧比を平均した値である。この図から、覆工模型の種類によらず、スポンジを設置した場合には、土被り比の増加にともない

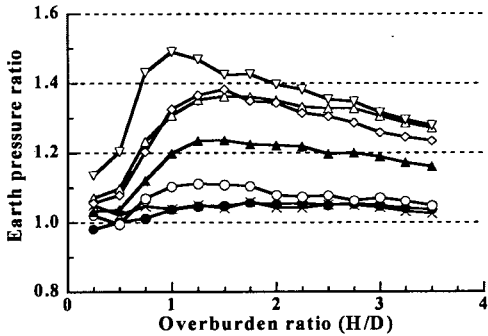
覆工周辺土圧比は増加し、その後、ほぼ一定値に収束している。その収束値について、土被り比が 3 の時の覆工周辺土圧比を比較すると以下のことが確認できる。

- 1) スポンジなしに比べ、スポンジを設置した場合、覆工周辺土圧比は大きい。
- 2) 厚さ 10 mm のスポンジを設置した場合に比べ厚さ 20 mm のスポンジを設置した場合、覆工周辺土圧比は大きい。
- 3) スポンジを水平に設置した場合に比べて、覆工周辺にスポンジを設置した場合のほうが、覆工周辺土圧比は大きい。

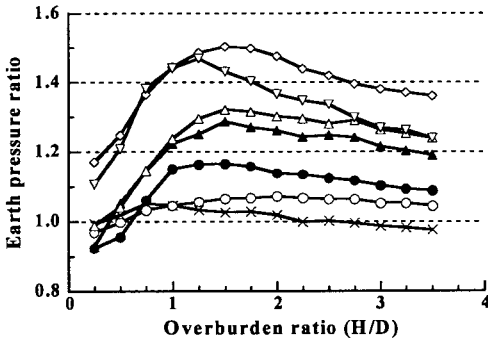
上記の結果より、スポンジを設置することにより、覆工に作用する土圧の軽減分を覆工周辺が受け持っていることが確認できる。すなわち、低剛性材料を導入することで、低剛性材料が変形し、覆工周辺にゆるみ域を形成する。覆工に作用する土圧は軽減され、それを周辺地山で分担する。荷重レベルは同等にはならないが、従来のトンネル掘削のアーチ効果と同等の効果が期待できる。



(a) Type - 1



(b) Type - 2



(c) Type - 3

Fig.12 The relationship between the earth pressure ratio around the tunnel lining model and the overburden ratio

(3) 覆工に発生する曲げモーメント

本研究で示す曲げモーメントの値は、覆工内側が引張りを受けるように作用する場合を正としている。また、すべての図中の縦軸を反転させており、覆工に発生する曲げモーメントを視覚的に捉えることができる。なお、一般に部材は曲げモーメントの正負にかかわらず、曲げモーメントの絶対値で評価されるため、特に説明がない限り、「曲げモーメント」は曲げモーメントの絶対値とする。また、覆工模型 Type - 3 における結果は、ヒンジでの曲げモーメントを 0 としてプロットしている。

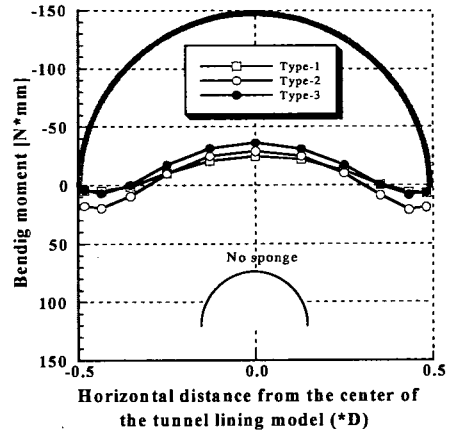


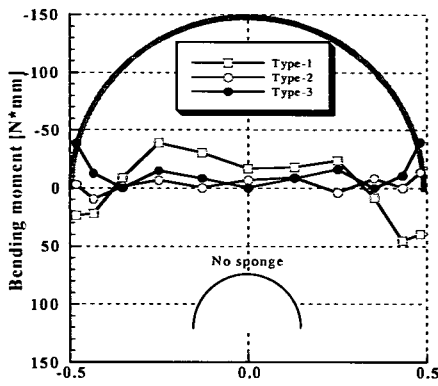
Fig.13 The distribution of the bending moment in each tunnel lining model ($H/D = 0$)

土被り比が 0 の時の曲げモーメント分布を覆工模型の種類 (Type - 1 ~ 3) 毎に Fig.13 に示す。なお、同じ覆工模型の場合には、スポンジの設置パターンによらず分布はほぼ等しいため、ここでは、スポンジなしの場合の結果を示す。これにより、覆工模型の種類によらず、曲げモーメント分布は、上に凸な形状であり、最大曲げモーメントが発生する位置は覆工天端であることが確認できる。

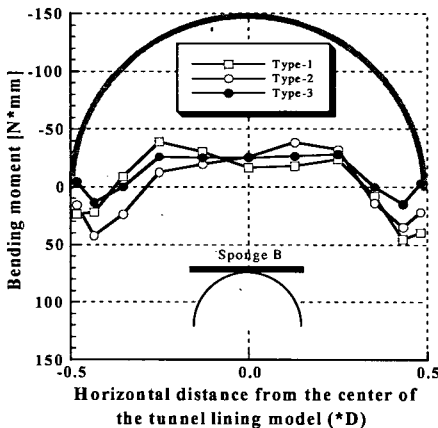
土被り比が 3 の時の曲げモーメント分布を覆工模型の種類 (Type - 1 ~ 3) をパラメータとして Fig.14 に示す。Fig.14(a) はスポンジなしの場合、(b) は厚さ 10 mm のスポンジ B を水平に設置した場合における結果である。スポンジなしの場合には、曲げモーメント分布は、覆工模型の種類によらず、やや上に凸な形状である。また、Type - 2 の場合に比べて Type - 3 の場合には、覆工脚部付近 (半径方向 15° 、 30° の位置) に発生する曲げモーメントは大きい。これに対し、厚さ 10 mm のスポンジ B を水平に設置した場合には、曲げモーメント分布は、覆工模型の種類によらず、上に凸な形状である。また、Type - 1, 2 の場合に比べて Type - 3 の場合には、覆工脚部付近 (半径方向 15° 、 30° の位置) に発生する曲げモーメントは小さい。

Fig.14(a) が示すように、土被り比が 3 においても曲げモーメント分布が上に凸な形状を示している。これは、覆工に対して比較的大きな水平反力が働いているためと考えられる。このことから、本実験のようにトンネル幅に対して十分に広く盛土幅を設けると、大きな鉛直土圧が作用している場合に十分な水平反力が期待できるため、覆工に発生する曲げモーメントは比較的小さくなる。

土被り比が 3 における、各覆工模型の覆工に発生する曲げモーメントの分布を Figs.15 ~ 17 に示す。



(a) No sponge



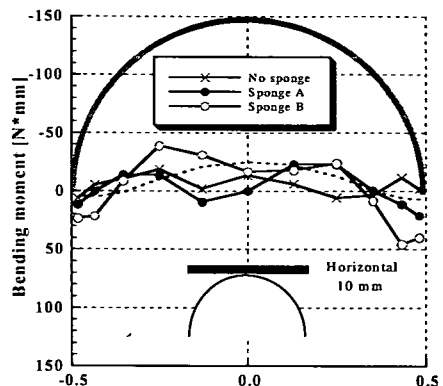
(b) Sponge B which thickness is 10 mm is set up in the horizontal

Fig.14 The distribution of the bending moment in each tunnel lining model ($H/D=3$)

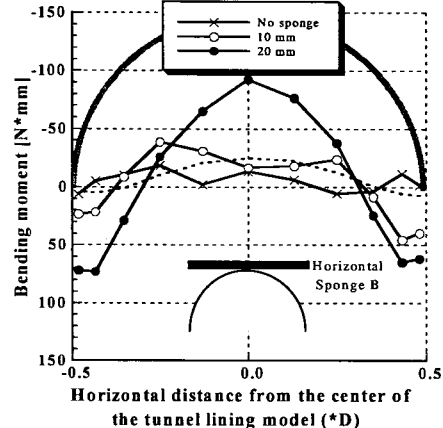
各図とも(a)はスポンジの種類による比較, (b)はスポンジの厚さによる比較, (c)はスポンジの設置位置による比較である。各図中の破線は、土被り比が0の時の曲げモーメントをプロットしている。

スポンジの有無および種類の違いを比較した場合、各設置パターンにおいて、曲げモーメント分布は上に凸な形状である。また、スポンジなしおよびスポンジ A の場合に比べて、スポンジ B の場合が覆工天端に発生する曲げモーメントは大きい。スポンジを水平に設置した場合は、スポンジなしおよびスポンジ A の場合に比べ、スポンジ B の場合が覆工に作用する鉛直土圧の軽減効果大きい。このため、スポンジなしに比べてスポンジ B の場合、鉛直土圧に対して水平土圧が相対的に覆工に大きく作用し、曲げモーメント分布は上に凸な形状になり、覆工天端に発生する曲げモーメントが大きくなる。

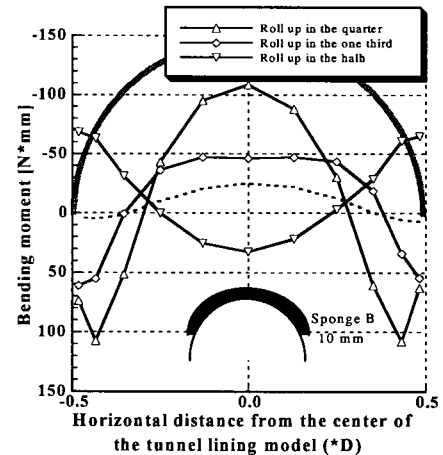
スポンジの厚さを比較した場合、各設置パターンにおいて、曲げモーメント分布は上に凸な形状であ



(a) Influence of the difference of the sponge types



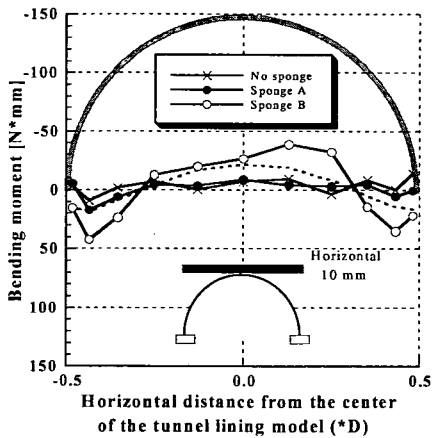
(b) Influence of the thickness of sponge



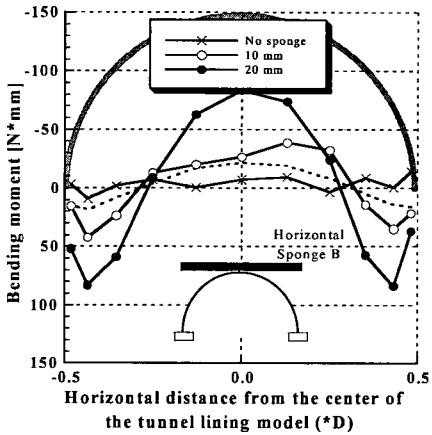
(c) Influence of the sponge location

Fig.15 Distribution of the bending moment (Type - 1)

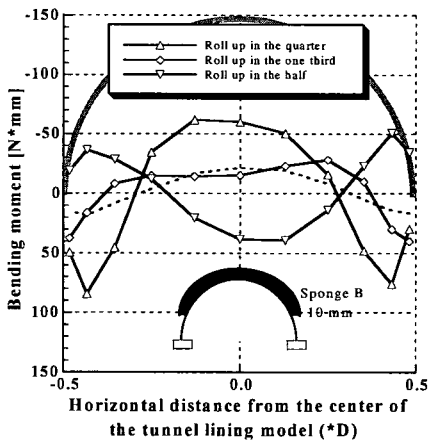
る。また、スポンジを水平に設置した場合、スポンジの厚さが大きいほど、覆工天端に発生する曲げモーメントが大きくなる。これは、スポンジの有無を比較した結果と同様で、厚さ10 mmの場合に比べて



(a) Influence of the difference of the sponge types

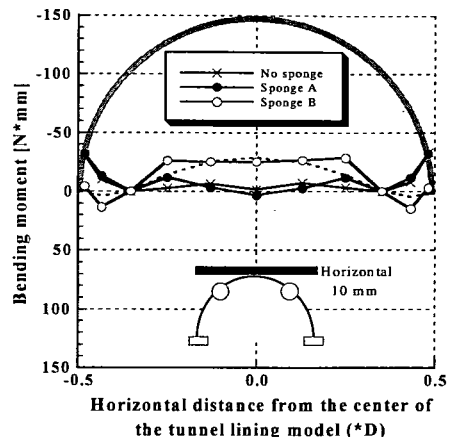


(b) Influence of the thickness of sponge

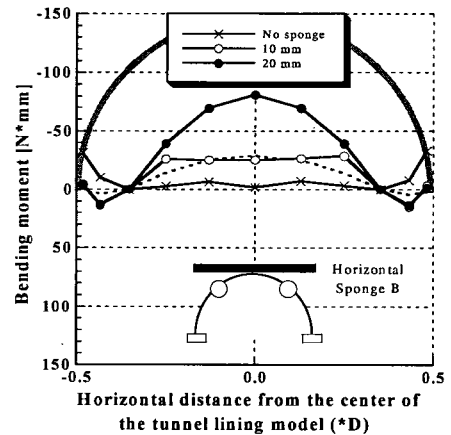


(c) Influence of the sponge location

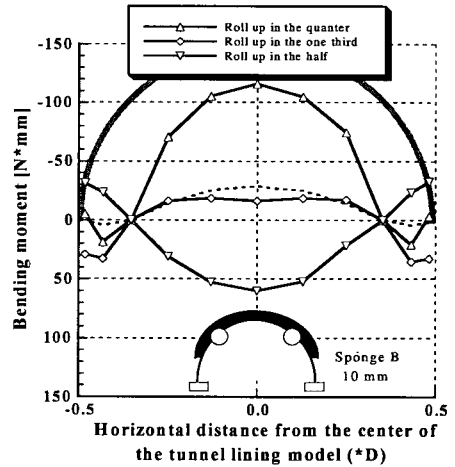
Fig.16 Distribution of the bending moment (Type - 2)



(a) Influence of the difference of the sponge types



(b) Influence of the thickness of sponge



(c) Influence of the sponge location

Fig.17 Distribution of the bending moment (Type - 3)

厚さ20 mmの場合には、鉛直土圧の軽減効果が大きい
 ため、鉛直土圧に対して水平土圧が相対的に覆工
 に大きく作用し、曲げモーメント分布は上に凸な形
 状になり、覆工天端に発生する曲げモーメントが大

きくなる。

つぎに、スポンジの設置位置が異なる場合の曲げ
 モーメント分布について検討を行う。1/4, 1/3周巻き
 の場合には、曲げモーメント分布は上に凸な形状で

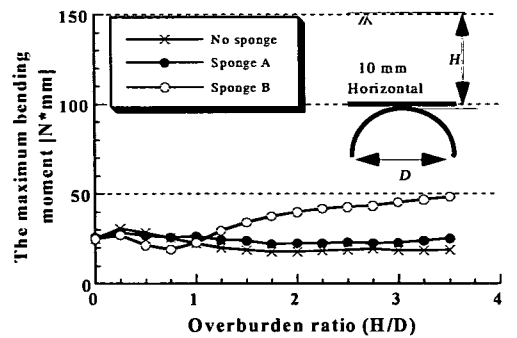
あるが、1/2周巻きの場合には、下に凸な形状である。また、1/4周巻きの場合と比べて、1/3周巻きの場合には、覆工天端に発生する曲げモーメントは小さい。これらの結果の理由として、スポンジの設置範囲に関係があると考えられる。1/4、1/3周巻きの場合とは異なり1/2周巻きの場合には、覆工脚部までスポンジが存在する。このため、覆工に作用する鉛直荷重の項で示したように覆工に、水平反力が十分に働かないため水平反力に対して鉛直土圧が相対的に覆工に大きく作用し、曲げモーメント分布は下に凸な形状を示す。また、1/4周巻きの場合には、1/3周巻きの場合に比べてスポンジの設置範囲は小さいため、水平土圧を受ける範囲が大きく、かつ、その範囲では覆工天端よりも大きな鉛直土圧を受けると考えられる。これらのことから、曲げモーメントは上に凸な形状で、覆工天端に大きな曲げモーメントが発生している。

これらの結果は、いずれも覆工模型の種類にかかわらず言えることであり、スポンジの設置範囲が1/3周～1/2周巻きの間曲げモーメント分布のモードが変換する設置範囲が存在すると考える。

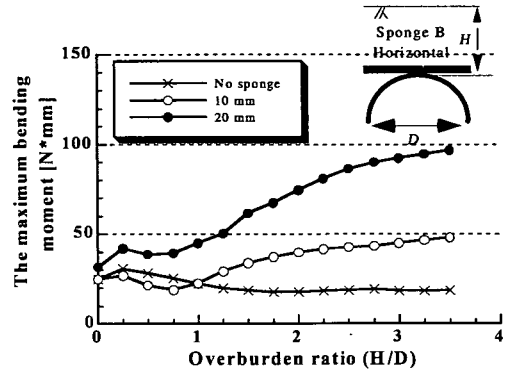
覆工模型の種類毎に、スポンジの設置パターンをパラメータとして、覆工に発生する最大曲げモーメントと土被り比の関係を図18～20に示す。最大曲げモーメントは、計測した覆工全点における曲げモーメントの最大値であり、土被り比により最大曲げモーメントの発生する位置が異なる場合がある。

Type - 1, 2 (Figs.18, 19) において、以下のような知見が得られた。

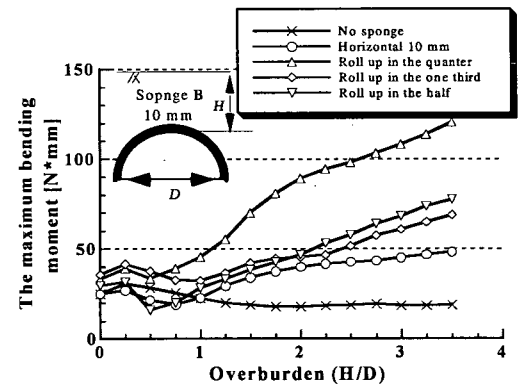
- 1) Figs.18(a), 19(a)の結果より、スポンジなしの場合およびスポンジAの場合には、土被り比によらず、最大曲げモーメントはほぼ一定値を示す。また、スポンジBの場合には、土被り比が1以下において、最大曲げモーメントは、スポンジなしの場合およびスポンジAの場合とほぼ等しい値を示す。しかし、土被り比が1以上では、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加傾向を示す。
- 2) Figs.18(b), 19(b)の結果より、スポンジを設置した場合には、土被り比が1以上において、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加する。また、厚さ20 mmの場合では、厚さ10 mmの場合よりも最大曲げモーメントの増加割合が大きい。
- 3) Figs.18(c), 19(c)の結果より、スポンジを設置した場合には、土被り比が1以上において、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加している。また、1/3、1/2周巻きの場合には、



(a) Influence of the difference of the sponge types



(b) Influence of the thickness of sponge



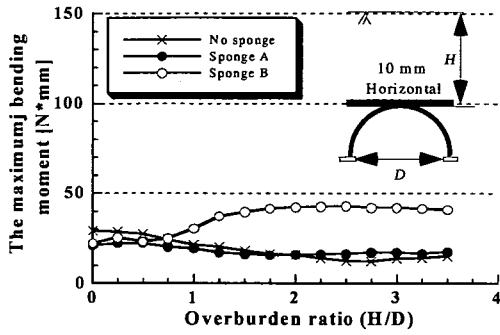
(c) Influence of the sponge location

Fig.18 The relationship between the overburden ratio and the maximum bending moment (Type - 1)

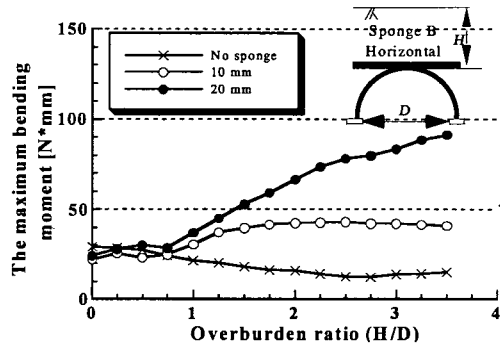
1/4周巻きの場合に比べて最大曲げモーメントの増加割合は小さい。また、土被り比が2の時には、最大曲げモーメントはスポンジの設置が水平の場合とほぼ等しい値を示す。

これに対し、Type - 3 (Fig.20) では、以下のような知見が得られた。

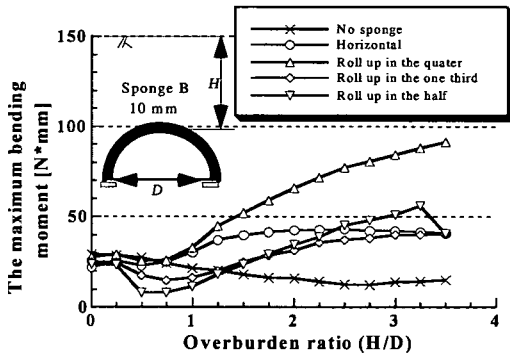
- 1) Fig.20(a)の結果より、スポンジBの場合には、土被り比が1以上において、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加し、スポンジなしの場合とほぼ等しい値を示す。
- 2) Fig.20(b)の結果より、スポンジを設置した場合



(a) Influence of the difference of the sponge types

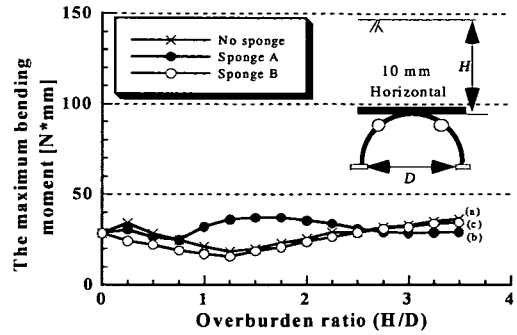


(b) Influence of the thickness of sponge

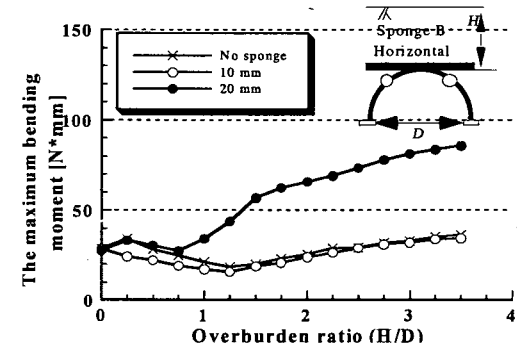


(c) Influence of the sponge location

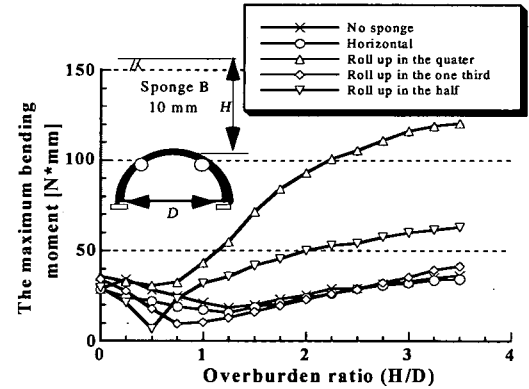
Fig.19 The relationship between the overburden ratio and the maximum bending moment (Type - 2)



(a) Influence of the difference of the sponge types



(b) Influence of the thickness of sponge



(c) Influence of the sponge location

Fig.20 The relationship between the overburden ratio and the maximum bending moment (Type - 3)

には、土被り比が1以上において、土被り比の増加にともない最大曲げモーメントは増加しており、厚さ20 mmの場合には、厚さ10 mmの場合よりも増加の割合が大きい。

- 3) Fig.20(c)の結果より、すべてのスポンジ設置パターンで、かつ土被り比が1以上の場合、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加している。また、1/3周巻きの場合には、1/4、1/2周巻きの場合に比べて、最大曲げモーメントの増加割合は小さく、スポンジなしの場合とほぼ等しい値を示す。

また、Figs.18 ~ 20より、スポンジの設置パターン

および覆工模型の種類 (Type - 1 ~ 3) をパラメータとして、覆工に発生する最大曲げモーメントと土被り比の関係について説明を加える。

スポンジなしの場合、土被り比が1.5以下の時では、覆工模型の種類による最大曲げモーメントの差異はない。しかし、土被り比が1.5以上の時では、Type - 3の場合に比べてType - 1, 2が最大曲げモーメントは小さい。スポンジAの場合には、いずれの土被り比に対しても、覆工模型の種類にかかわらず最大曲げモーメントはほぼ一定値を示している。また、土被り比が2以上の時には、Type - 3の場合に比べてType - 1, 2の場合のほうが、最大曲げモーメントは小さい。

厚さ10 mmのスポンジBを水平に設置した場合には、土被り比が1以上の時では、覆工模型の種類によらず、土被り比の増加にともない、最大曲げモーメントは増加している。また、土被り比が2以上の時には、Type - 1, 2の場合に比べてType - 3の場合のほうが、最大曲げモーメントは小さい。一方、厚さ20 mmのスポンジBを水平に設置した場合には、覆工模型の種類によらず土被り比の増加にともない最大曲げモーメントは大きく増加する。土被り比が2以上の時には、Type - 1, 2の場合に比べてType - 3が最大曲げモーメントは小さい。

1/4周巻きの場合には、覆工模型の種類によらず、土被り比の増加にともなって最大曲げモーメントは大きく増加する。また、土被り比が2以上の時には、Type - 1, 3の場合に比べてType - 2が最大曲げモーメントは小さい。1/3周巻きの場合、土被り比が1以上では、覆工模型の種類にかかわらず土被り比の増加にともない最大曲げモーメントは増加している。また、土被り比が2以上では、Type - 1の場合に比べてType - 2, 3が、また、Type - 2の場合に比べてType - 3が、最大曲げモーメントは小さい。1/2周巻きの場合には、土被り比が1以上の時では、覆工模型の種類によらず、土被り比の増加にともない最大曲げモーメントは増加する。また、覆工模型の種類による最大曲げモーメントの明確な差異はみられない。

以上、覆工に作用する曲げモーメントの実験結果から全体として以下のような知見が得られた。

土被り比が3の時の曲げモーメント分布の結果および最大曲げモーメントの結果から、スポンジ（低剛性材料）の設置パターンが同じ場合、ほぼすべての覆工模型に共通した傾向を示すことから、スポンジを設置することによる影響が覆工模型の種類による影響よりもはるかに支配的であるといえる。つまり、本実験で用いたスポンジBのように、覆工や地盤よりも非常に小さい剛性の材料を用いると、覆工模型の種類(Type - 1 ~ 3)ではなく、スポンジの設置パターンによって覆工に作用する外力がほぼ決定されると考えられる。また、その外力は、「(2) 覆工周辺に作用する鉛直土圧」で示したグラウンドアーチに大きく影響を受ける。つまり、そのグラウンドアーチの規模は、スポンジの剛性、厚さおよび設置位置によって決定されると考える。

4. まとめ

本研究では、プレキャストトンネル建設を想定し、緩和材をスポンジで模擬し、地盤材料にアルミ棒積

層体を用い、種々のトンネル覆工模型を用いた2次元模型実験を実施し、トンネル覆工およびその周辺部に作用する鉛直荷重ならびに覆工に発生する曲げモーメントについて検討を行った。

低剛性材料（スポンジ）を設置することによって、覆工に作用する鉛直荷重は軽減される。特に、低剛性材料の剛性、厚さおよび覆工に巻く範囲により、覆工に作用する鉛直荷重の変化することが確認された。

















一般に、降下床実験で降下床を下降させると、降下床荷重は減少し周辺荷重が増加する。すなわち、降下床部分が受け持っていた土被り荷重が、降下床下降に伴い周辺地盤に分散されたことになる。これをグラウンドアーチが形成されたと称している。本研究でも、低剛性材料を導入することでトンネル覆工模型に作用する荷重が低減されること、周辺地盤の荷重が増大していることを踏まえてグラウンドアーチが形成されると考える。したがって、土被り比の増加にともない、低剛性材料に作用する鉛直荷重が増加するとともに低剛性材料が変形することにより、アルミ棒積層体内のトンネル覆工上方にグラウンドアーチが形成されることになる。一方で、低剛性材料の設置による覆工に作用する土圧の軽減分は、周辺地盤が受け持っている。

低剛性材料の変形は、土被り比に影響を受けるものである。したがって、土被り比の大小が低剛性材料の変形に影響を及ぼし、グラウンドアーチの形成に影響を及ぼす。本研究では、土被り比が約1.5以上のような土被りが大きい場合（高盛土）の施工において、低剛性の緩和材をトンネル周辺に設置すると覆工に作用する土圧の軽減効果が大きく期待される。

一方、覆工に発生する曲げモーメントについては以下のような結論を得た。

低剛性材料を設置しない場合、土被り比が0の時は、覆工模型の種類によらず、曲げモーメント分布は上に凸な形状であり、最大曲げモーメントが発生する位置は覆工天端である。土被り比が3の時は、覆工模型の種類によらず、曲げモーメント分布はやや上に凸な形状である。また、Type - 2の場合に比べてType - 3の場合には、覆工脚部付近（半径方向15°、30°の位置）に発生する曲げモーメントは大きい。土被り比が3においても、曲げモーメント分布が上に凸な形状を示していることから、覆工に対して比較的大きな水平反力が働いているといえる。このことから、本実験のようにトンネル幅に対して十分な盛土幅を設けると、大きな鉛直土圧に対して十分な水平反力が期待できるため、覆工に発生する曲げモーメントは比較的小さくなると考えられる。

Table 1 Summarized experimental results in this research work

Pre-cast lining model	Pattern	Stiffness of introduced material			Thickness of introduced material		
		Large ← Stiffness → Small			Thin ← Thickness → Thick		
		 No sponge	 Sponge A	 Sponge B	 No sponge	 10 mm	 20 mm
Item							
 Type - 1	Earth pressure acting on the lining	Large ×	×	Small △	Large ×	△	Small ○
	The maximum bending moment	Small ◎	◎	Large ○	Small ◎	○	Large ×
 Type - 2	Earth pressure acting on the lining	Large ×	×	Small △	Large ×	△	Small ○
	The maximum bending moment	Small ◎	◎	Large ○	Small ◎	○	Large ×
 Type - 3	Earth pressure acting on the lining	Large ×	×	Small △	Large ×	△	Small ○
	The maximum bending moment	◎	◎	◎	◎	◎	Large ×
Pre-cast lining model	Pattern	Introduced location of lower stiff material					
		Small ← Set up range → Large					
		 No sponge	 Quarter	 One third	 Half		
Item							
 Type - 1	Earth pressure acting on the lining	large ×	Small △	◎	○		
	The maximum bending moment	Small ◎	Large ×	△	△		
 Type - 2	Earth pressure acting on the lining	large ×	Small △	○	◎		
	The maximum bending moment	Small ◎	Large ×	○	△		
 Type - 3	Earth pressure acting on the lining	large ×	Small △	○	◎		
	The maximum bending moment	Small ◎	Large ×	◎	△		

◎ : Excellent, ○ : Good, △ : Poor, × : Very poor

一方、低剛性材料を設置すると、設置パターンが同じ場合、ほぼすべての覆工模型に共通した傾向を示すことから、低剛性材料を設置することによる影響のほうが覆工模型の種類による影響よりもはるかに支配的であるといえる。つまり、本実験で用いたスポンジ B のように、覆工や地盤よりも非常に小さい剛性の材料を用いると、覆工模型の種類 (Type - 1 ~ 3) ではなく、スポンジの設置パターンによって覆工に作用する外力がほぼ決定されるのである。

以上、一連の実験結果をまとめて Table 1 に示す。限られた実験条件での結論ではあるが、力学的に最適な緩和材の剛性、厚さおよび設置位置が存在し、覆工に作用する外力をほぼ均一なものにすることは可能であると考えられる。また、覆工に作用する土圧および曲げモーメントの双方を考慮した場合、本研究で行った実験パターンでは Type - 3 の 1/3 周巻きが最適のパターンである。覆工模型の種類にこだわらなければ、低剛性材料の設置範囲が 1/3 周 ~ 1/2

周巻きの間にも最も良い設置範囲が存在すると思われる。

参考文献

- 1) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧，京都大学防災研究所年報，第 11 号 B, pp. 123 - 138, 1968.
- 2) 村山朔郎，松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 187 号，pp. 95 - 108, 1971.
- 3) 湯浅 泰則，足立 紀尚，小嶋 啓介：アルミ棒積層体を用いた降下床実験とその解析に関する研究，第 23 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1891 - 1894, 1988.
- 4) 足立 紀尚，田村 武，木村 亮，荒巻 智：落し戸実験における土圧分布，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1989 - 1992, 1994.

5) 足立 紀尚, 田村 武, 木村 亮, 神谷 信毅 : 双
設降下床の力学挙動, 第 30 回土質工学研究発表会

講演集, pp. 1977 – 1980, 1995.

(2000. 12. 7 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL STABILITY OF THE PRE-CAST TUNNEL STRUCTURES

Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Kiyoshi KISHIDA,
Ryuichi SAMEJIMA, Takao IWASAKI and Sadamu KOHNO

In constructed the pre-cast tunnel structures, it assumed that the earth pressure acting on the tunnel lining is larger than the overburden pressure and the bending moment becomes increasing. In particular, in case of higher overburden, tunnel lining must be became heavy thickness so as to support the large earth pressures. This is the reason why the pre-cast tunnel structures are mainly used in the shallow overburden tunnels. In this paper, performing two dimensional trap door tests using by the aluminum rods layer, the earth pressure and the bending moment on the pre-cast tunnel lining models are measured in consideration of the constructed process. Then, to introduce the lower stiff material around the tunnel lining, the effect of the lower stiff material are verified. Based on the experimental results, it is found that the earth pressures acting on the tunnel lining can be decreased to applying the lower stiff material.