

矩形断面トンネルの免震メカニズム に関する解析的検討

粕田金一¹・鈴木猛康²

¹正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

矩形断面トンネル横断面方向に関して等価線形解析による2次元動的FEM解析を実施し、免震のメカニズムに関する検討を行った。その結果、トンネルの時刻歴応答は免震層の有無にかかわらず周辺地盤と同位相であり、トンネルの水平および鉛直方向の相対変位は免震層の設置により半減すること、免震層の設置がトンネル・周辺地盤の応答に悪影響を与えないこと、免震層によるトンネルの断面力低減効果はせん断土圧低減の寄与が大きいことなどの知見が本検討事例より得られた。

Key Words : seismic isolation, rectangular tunnel, underground structure, earthquake response, dynamic finite element analysis

1. はじめに

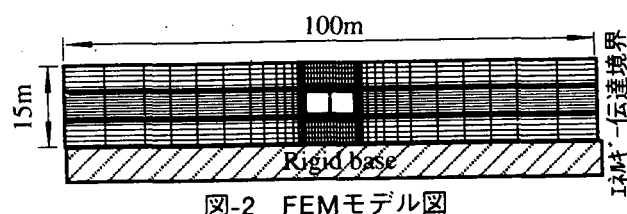
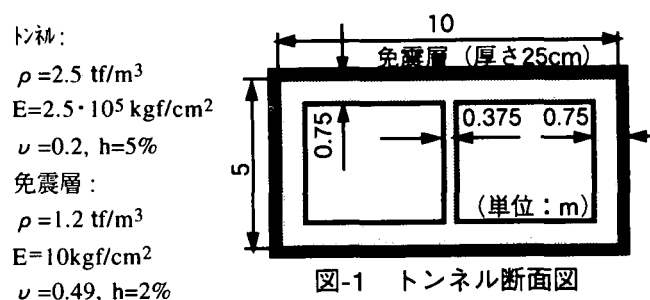
筆者らは、矩形断面トンネルの地震時横断面変形による発生断面力の低減を図る1つの手法として、トンネルの外周に柔らかな免震層を形成することによる免震化手法を提案し、解析的・実験的な検討を実施してきた^{1)~3)}。これらの成果によれば、免震層と周辺地盤のせん断弾性係数の剛性との比を1/100程度に設定すると曲げモーメントやせん断力が約半分に低減されることが明らかとなっており³⁾、免震層の物性値を定める上での1つの目安が示されている。しかし、これまでの検討では免震層の物性値と断面力の低減効果の關係に主に着目していたため、トンネルの変形、周辺地盤の応力・ひずみ分布などについてはあまり詳しい検討がなされていなかった。そこで本検討は、矩形断面の開削トンネル横断面方向の2次元動的FEM解析を実施し、単なる断面力の比較にとどまらずにトンネルの変形、トンネル周辺の応力・ひずみ分布などを詳細に分析することにより免震のメカニズムに関する考察を行うものである。

2. 解析手法と解析条件

検討対象は、厚さ15mの表層地盤の中央の深度に設置されたRC造の2連の開削トンネルであり、既に実施済の模型振動実験²⁾の「プロタイプ」と同一のモデル、物性値である。解析手法は、複素応答法による2次元動的FEM解析であり、地盤および免震層を2次元平面ひずみ要素で、トンネルを梁要素でモデル化した。解析は非免震・免震の計2ケースを等価線形解析により実施した。トンネルと免震層の断面図を図-1に、FEMモデルを図-2に示す。解析に用いた地盤の物性値は、S波

速度217m/sec、単位体積重量1.53tf/m³、ポアソン比0.42であり、動的変形特性は模型振動実験に使用した豊浦標準砂の室内試験結果に基づいて設定した。免震材料の地盤に対するせん断弾性係数の比は実験条件に合わせて1/220とし、厚さ25cmの免震層をトンネル全周にわたり配置した。免震材料の動的変形特性は室内試験結果に基づき線形とし、トンネルのヤング率は初期物性を用いた線形とした。FEMモデルの境界条件は、側面はエネルギー伝達境界、底面は固定境界である。

入力地震波はモデル地盤の1次固有振動数に相当する3~4Hzの振動数成分が卓越する記録である釧路沖地震(1993.1.15, M7.8)の際に釧路地方気象台において観測された水平EW成分(最大加速度922gal)を最大振幅200galに調整して用いた。入力地震動の時刻歴波形を図-3に、フーリエスペクトルを図-4に示す。



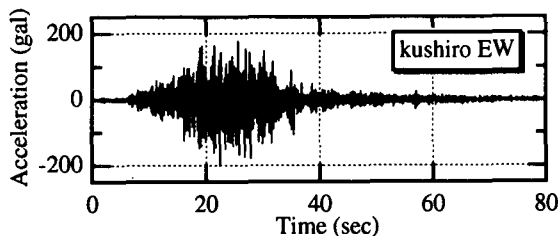


図-3 入力地震動の時刻歴

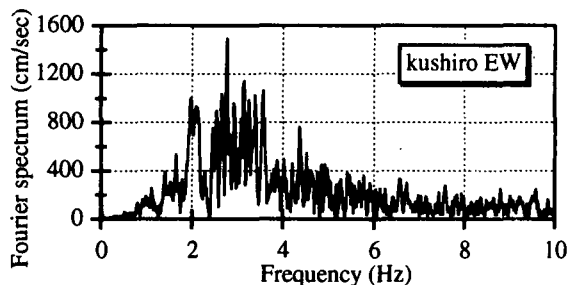


図-4 入力地震動のフーリエスペクトル

3. 解析結果

本検討では、トンネル頂版～底版間に最大相対変位が発生する時刻における各種応答値に基づいて考察を行うが、非免震のケースでは $t=25.92$ 秒、免震のケースでは $t=25.72$ 秒に対応する。この両者の時刻におけるせん断変形の向きが左右逆であるため、比較の便宜上、非免震のケースの各種応答値の符号を反転させて免震のケースと符号の向きを合わせて作図を行った。すなわち、地盤およびトンネルが左向きにせん断変形した状態について議論する。なお、免震層の有無にかかわらずトンネルの時刻歴応答は基本的に周辺地盤と同位相で振動することを時刻歴波形から確認している。

(1) 地盤の加速度・相対変位

自由地盤表面では、200galの入力に対して約300galの最大加速度応答値が得られ、自由地盤の剛性低下は0.27～0.91、減衰定数は2.4%～27%の値に収束した。トンネルの側壁に沿った測線上および自由地盤においてトンネル頂版～底版間に最大相対変位が発生する時刻の加速度分布、相対変位分布を図-5(a),(b)に示す。非免震のケースでは、本検討で設定したトンネルの見かけ剛性 1075kgf/cm^2 が周辺地盤の初期剛性 735kgf/cm^2 よりも大きいため、自由地盤の応答と比べてトンネルの下部および上部では応答値の増幅率が若干増加するが、トンネル位置では逆に増幅率が低下する現象がみられ、加速度分布、相対変位分布ともにトンネル頂版、底版位置で折れ曲がりが見られる⁴⁾。一方、免震層を設置したケースでは免震層に大きなせん断変形が集中する影響により、トンネルの頂版および底版のレベルで大きな水平変位が発生するが、免震層の位置以外のトンネルの下部および上部の地盤では非免震のケースとは逆に応答値の増幅率が自由地盤の応答よりも低下し、トンネル位置においても免震層の影響によって非免震のケースよりも増幅率が低下する。

(2) トンネルの加速度・相対変位

トンネル側壁上端レベルにおける水平加速度の伝達関数を図-6に示し、側壁下端レベルにおける鉛直加速度の伝達関数を図-7に示す。図-6から2Hz付近の地盤のせん断振動の卓越振動数は変わらないが、免震層のケースでは6.6Hz付近に2次のピークが現れる。このピークは図-7の鉛直方向の伝達関数におけるピークと一致している。しかし、本検討例では1次のピークに比べて増幅倍率が小さく、1以下であること、入力地震動における高振動数成分のパワーが小さいことから、免震層がトンネルの応答に悪影響を及ぼすことはない。

次に、トンネル頂・底版間の水平方向の最大相対変位が発生する時刻におけるトンネル左半分の変形図を図-8に示す。これより免震層の設置によってトンネルの相対変位量は水平方向、鉛直方向ともに半減することがわかる。なお、トンネルの見かけ剛性が周辺地盤の剛性よりも小さな場合の事例では、免震層の設置によるトンネルの相対変位量の低減は小さいことが報告されている¹⁾。したがって、トンネルと周辺地盤の相対的な剛性比によって、トンネルの変形状態に及ぼす免震層の効果が異なるものと考えられる。

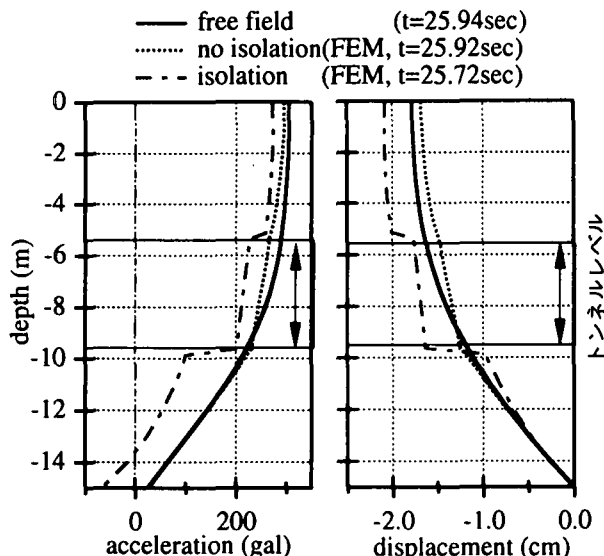


図-5(a) 加速度分布 図-5(b) 相対変位分布

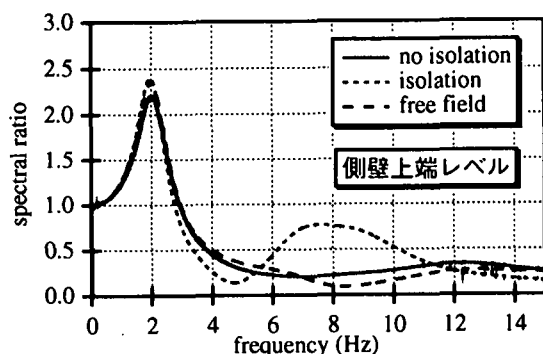


図-6 水平動の伝達関数(トンネル)

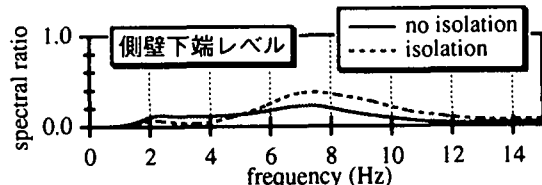


図-7 鉛直動の伝達関数(トンネル)

(3) 周辺地盤・免震層のひずみ・応力

まず、免震層のせん断ひずみは底版部で約3%、頂版部と側壁部で約1%の値をとり、非免震の同じ位置における地盤のせん断ひずみの約10~20倍の大きさのひずみが発生する。

次に、図-9、図-10に最大相対変位発生時刻のせん断土圧および直土圧の分布図を示す。図示はいずれもトンネルの左半分を示し、各壁面の外側のプロットを圧縮、内側を引張として図示した。図-9から免震層のせん断土圧はトンネル全周にわたり非免震の場合の20%前後の値にまで低減した。一方、免震層の直土圧は底版側の下側隅角部を除いて非免震の場合の約2倍の直土圧が発生することが図-10からわかる。直土圧の符号は免震・非免震のケースともに、トンネルが左向きにせん断変形する場合には上側隅角部で引張、下側隅角部では圧縮の符号をとるため、直土圧はトンネルのせん断変形を増加させる向きに作用している。トンネル側壁の上部と下部とで作用方向が逆転するこのような地震時増分土圧の分布は、本検討で設定したトンネルの見かけの剛性が周辺地盤の剛性よりも大きいことに起因するものと考えられる^{4),5)}。一方、トンネルの見かけの剛性が周辺地盤の剛性よりも小さい場合には、免震層の設置によりせん断土圧は大きく低減する点は本検討と同一であるが、直土圧の値も減少し、また分布形状が変化することが報告されている¹⁾。これらの結果を併せて考えると、トンネルと周辺地盤の相対的な剛性比によらず、免震トンネルの断面力低減にはせん断土圧の低減が主要な役割を果たしているものと考えられる。

トンネル周辺地盤の最大相対変位発生時刻のせん断応力、水平方向・鉛直方向直応力の分布図をそれぞれ上段に非免震、下段に免震のケースを図-11、図-12、図-13に示す。図示はトンネルの上下左右約4mまでの範囲の要素を対象とし、FEMモデルの左半分とした。

せん断応力に関して免震のケースでは、トンネル頂版・底版・側壁の免震層の延長位置にあたるせん断応力の値が、その周囲の要素に比べて大きな値を示す。これは免震層に大きなせん断変形が発生した影響がその真横や上下の地盤要素にも及び、その位置のせん断変形が卓越する傾向を示すためと考えられる。水平方向直応力に関して図-12(a),(b)に示す等高線の形状をみた場合、応力レベルの高い個所がトンネルの隅角部に集中しているのは免震・非免震ともに共通であるが、免震層のある場合には、トンネル頂版、底版の免震層の真横の位置の地盤要素において応力の等高線が圧縮伸張の符号が異なる上下2つの山と谷に分離していることがわかる。また、図-13(a),(b)に示す鉛直方向直応力についても同様な傾向がみられ、こちらはトンネル側壁の免震層の上下位置の地盤要素において圧縮伸張の符号が異なる左右2つの山と谷に等高線が分離している。これらはせん断応力にみられた現象が直応力では別の形で等高線の形状に現れたものと考えられる。

(5) トンネルの断面力

最大相対変位発生時刻における断面力の比較結果をトンネルの左半分を対象として図-14(a),(b),(c)に示す。既往の解析結果^{1)~3)}と同様に、免震層の設置により頂版・底版・側壁および隔壁において曲げモーメント、せん断力は約半分に低減した。軸力についても低減傾向がみられるが、側壁下部など低減率が小さい個所もあり、本検討で設定した解析モデルにおいて底版側への変形が生じにくいと考えられる。

4. まとめ

矩形断面トンネル横断面方向に関して等価線形解析による動的FEM解析を実施した結果、トンネルの見かけの剛性が周辺地盤の剛性よりも大きい場合の1つの事例として、以下のような知見が明らかとなった。

- ① トンネルの時刻歴応答は、免震層の有無にかかわらず基本的に同位相であり、トンネルの水平および鉛直方向の相対変位は免震層の設置により半減する。また、免震層の設置がトンネル、周辺地盤の応答に悪影響を与えることはない。
- ② 免震層には、非免震の場合の10倍前後のせん断ひずみが発生した。また、免震層のせん断土圧は非免震の場合の20%前後の値にまで低減したが、直土圧は底版部を除いて約2倍に増加した。したがって、断面力の低減効果は主として免震層設置によるせん断土圧の低減により得られることが示された。
- ③ 免震層の設置により頂版・底版・側壁および隔壁において曲げモーメント、せん断力は約半分に低減する。軸力も低減傾向がみられるが、低減率が小さい個所も存在した。

謝辞：本研究は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターと民間17社による官民共同研究「地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) T. Suzuki : Damage of urban tunnels due to the Southern Hyogo Earthquake of January 17, 1995 and the evaluation of seismic isolation effect, 11WCEE, pp.413-416, 1996.
- 2) 柏田, 鈴木, 田中 : 矩形断面トンネルの免震構造に関する模型振動実験, 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.109 - 116, 1996.
- 3) 建設省土木研究所, 土木研究センター他17社 : 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書 (その1), 第154号, p.237, 1997.3.
- 4) 渡辺, 末広 : 地中ダクト側壁動土圧に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.155-163, 1991.
- 5) 当麻, 国生, 岩楯 : 非岩着地中構造物の耐震設計に関する研究 (その1) - 模型振動実験による地盤・ダクト系の動的応答の解明 -, 電力中央研究所研究報告, No.383023, 1984.

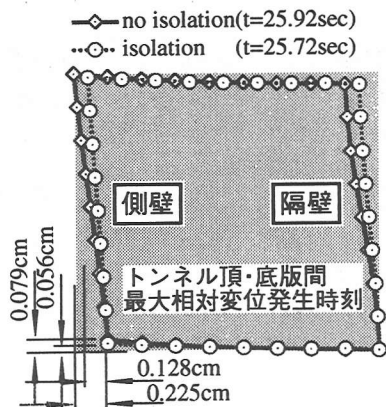


図-8 トンネル変位図

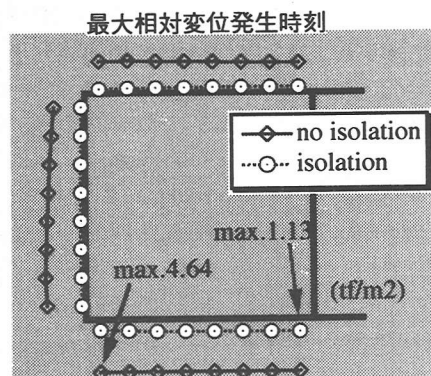


図-9 トンネルのせん断土圧分布

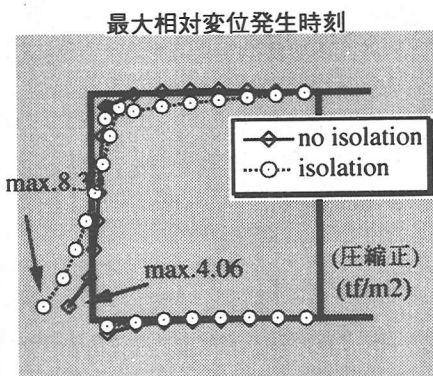


図-10 トンネルの直土圧分布

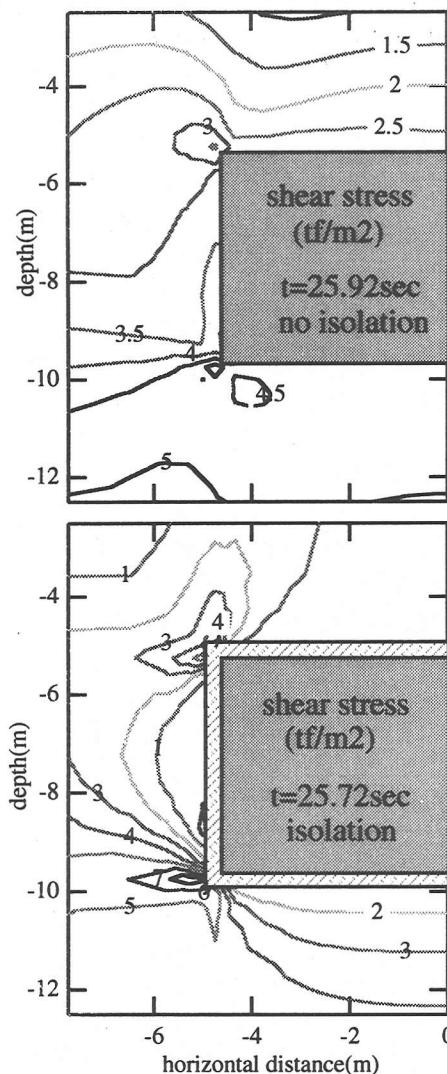


図-11 地盤のせん断応力分布

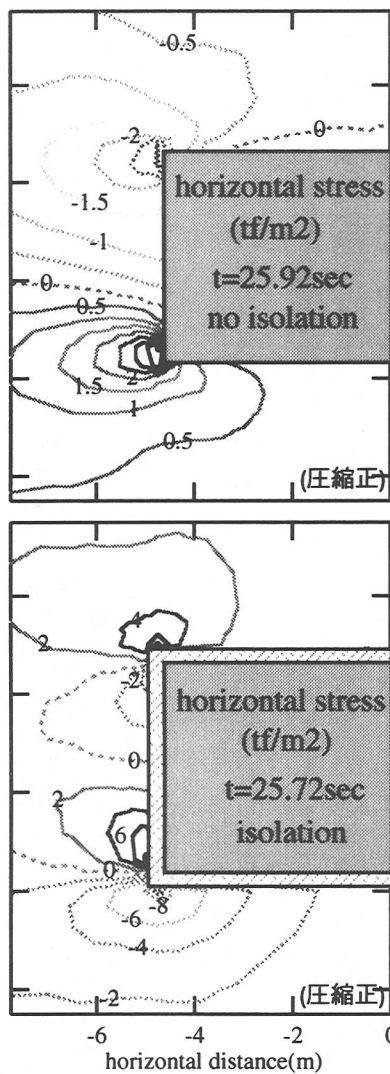


図-12 地盤の水平方向直応力分布

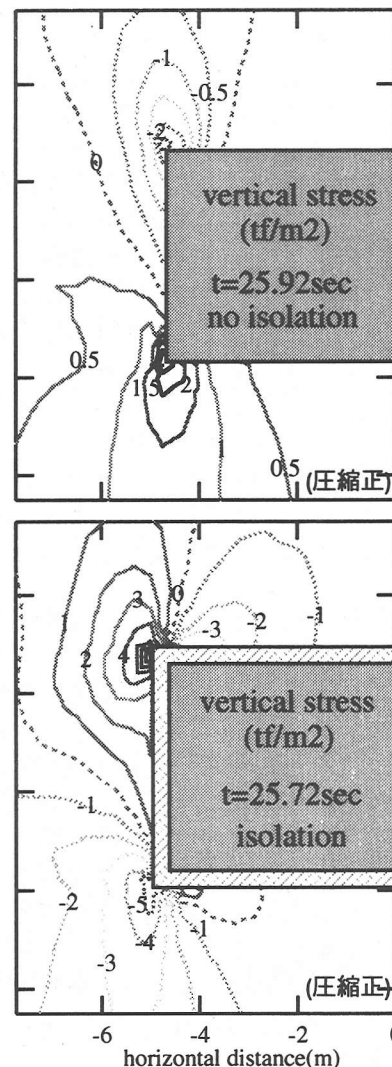


図-13 地盤の鉛直方向直応力分布

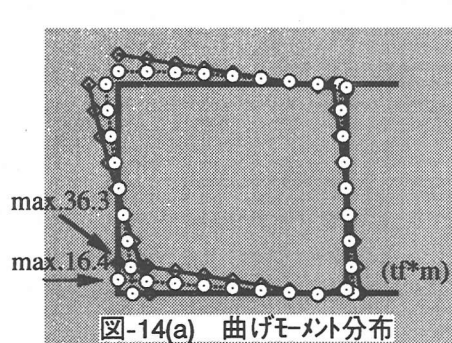
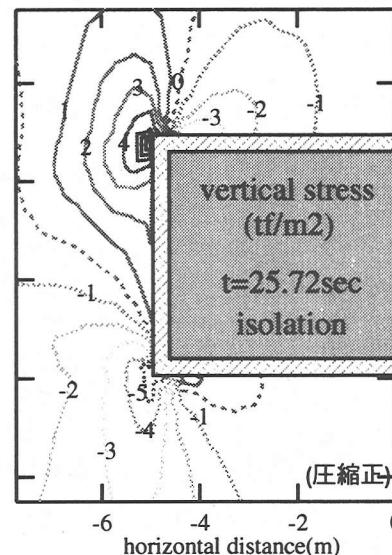
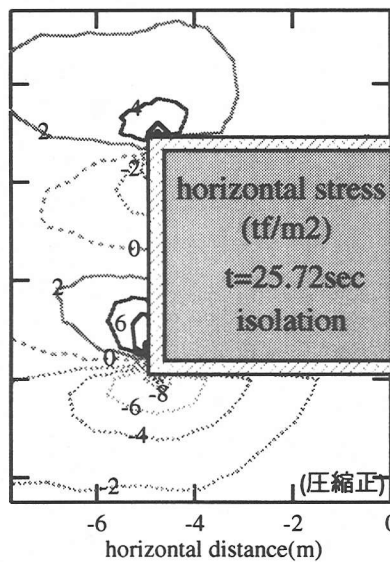
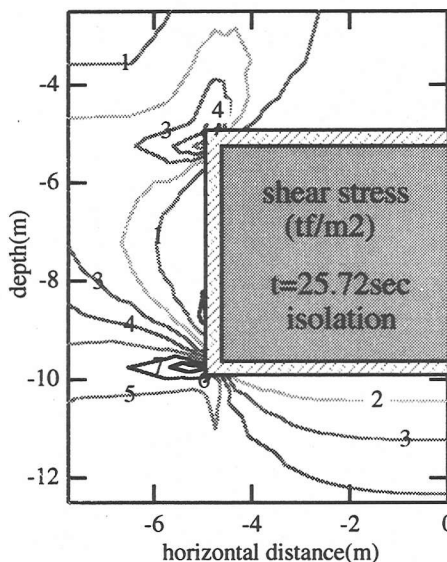


図-14(a) 曲げモーメント分布

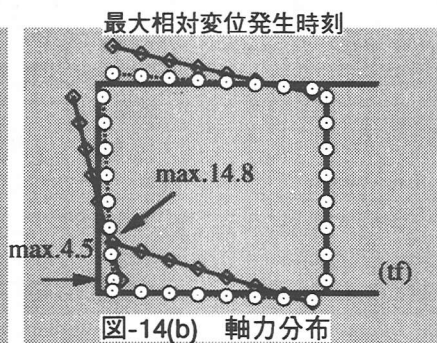


図-14(b) 軸力分布

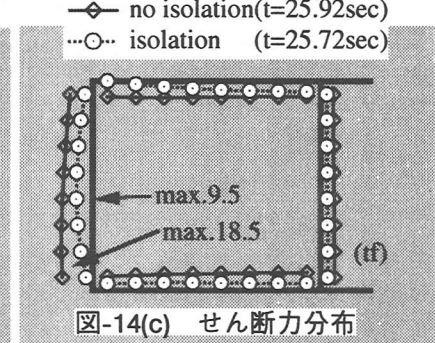


図-14(c) せん断力分布