

列車突入によるトンネル補強構造体に作用する圧力に関する模型実験

Model Test on Pressure Variation Acting on Tunnel Reinforcement Structure Caused by Trains Entering a Tunnel

本 郷 剛 眞 田 早 敏
土 谷 学 林 田 宏 二

要 約

鉄道トンネルの覆工コンクリートの崩落防止や変形防止対策工として、薄肉の内面補強工がある。しかしながら、そのために列車の運行を止めることは困難であり、補強工施工時にはトンネル補強構造体に、列車の進入、通過に伴う変動圧力が作用することになる。この列車の進入および通過に伴い生じる圧縮波および膨張波が、トンネル補強構造体を与える影響を実験により推定した。

圧力実験は新幹線用トンネルを 1/17、在来線用トンネルを 1/14.5 に縮尺した模型を用いて行った。新幹線列車は 100 系、在来線特急はクハ 681 系、在来線電車はクモハ 221 をそれぞれトンネルと同じ縮尺で作成した。トンネル補強構造体に作用する変動圧力を、列車のすれ違いの有無、トンネル補強構造体の位置、トンネル補強構造体とトンネル壁面の隙間の充填の有無を変化させた 16 ケースについて調査した。その結果を新幹線トンネル内での圧力変化の実測結果と比較することにより、トンネル補強構造体に作用する圧力を推定できることを示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 入口圧縮波の強さと相似条件
- III. 実験概要
- IV. 実験結果および考察
- V. おわりに

I. はじめに

鉄道トンネルの覆工コンクリートの崩落防止や変形防止対策工として、薄肉の内面補強工があるが、列車の運行を止めることなく補強工を施工する限り、補強構造体には、列車の進入、通過に伴う変動圧力が作用する。すなわち、列車がトンネル内に進入すると、圧縮波が発生する。トンネル内通過時には、列車側方をトンネル内から入口方向に向かう流れが生じ、さらに列車後尾部のトンネル突入により、膨張波が生じることが知られている。

これらの圧力により、トンネル壁面には、Fig. 1 に示すような圧力変動が生じることが新幹線トンネル内で測定されている¹⁾。すなわち、列車進入前は、トンネル内は大気圧と同じであるが(A 点)、列車がトンネル内に進入すると、圧縮波のために正圧が急激に上昇する(B 点)。その後、列車の進行に伴い、圧力は徐々に増加し、列車の先頭部が通過するまで、その増加は続く(C 点)。この圧力上昇は、トンネル内に侵入した後続の車両によってもたらされるものである。先頭部が通過すると同時に、列車によって引き起こされるトンネル内からトンネル入口に向かう逆の流れにより、圧力が急激に減少する(D 点)。列車が通過している間はほぼ一定の圧力が続く(E 点)。列車の後尾部がトンネル内に入ると、膨張波が発生し、それが列車側面の空間を伝播してくると、そのために圧力は負圧の低い F

点まで落ちる。この負圧は、後尾部が通り過ぎるまで下がり続け(G 点)、最後尾が行き過ぎると、圧力は急激に上昇し(H 点)、しばらくの間一定の圧力となる。その後は、圧力波がトンネルの出入口や列車に当たって発生する反射波による圧力が発生するが、同じような変動を繰り返し、徐々に小さくなりながら、大気圧に戻る。

トンネル内壁に施工されるトンネル補強構造体にも、当然のことながらこれらの圧力が作用することになるが、施工状況に応じて、加わる圧力が変化する。また、列車走行速度により、それぞれの大きさが大きく異なると推定される。

本実験は、列車の進入・通過により、トンネル補強構造体にどのような圧力変動が作用するかを、実測結果と比較・検討することにより、推定するために行ったものである。

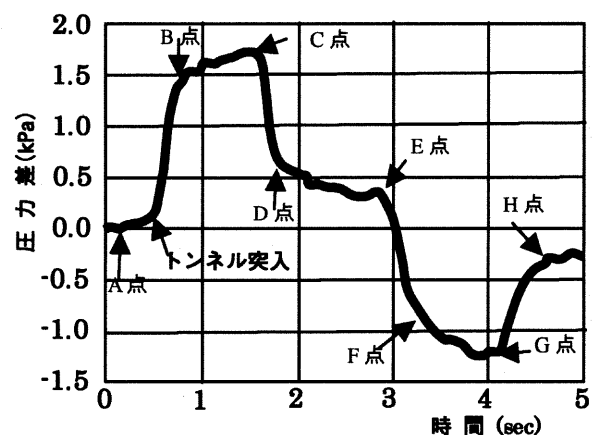


Fig.1 Pressure Variation at Tunnel Wall during Train Passing through a Tunnel

キーワード：トンネル、補強構造体、圧力実験、圧縮波、膨張波、圧力変動

II. 入口圧縮波の強さと相似条件

速度 V で走行している列車が、トンネル内に突入することで発生する圧縮波 ΔP の強さは理論的に次式で与えられる²⁾。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \gamma P_1 M^2 \left[\frac{1 - \phi^2}{\phi^2 + (1 - \phi^2)M - \gamma M^2 (1 - \frac{1}{2}\phi^2)} \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

γ : 空気の比熱比 $\equiv c_p / c_v$

c_p : 空気の定圧比熱

c_v : 空気の定積比熱

P_1 : 大気圧

M : 列車速度 (V) のマッハ数 $\equiv V/a$

a : 音速

ϕ : 断面積比 $\equiv (A_1 - A_2) / A_1$

A_1 : トンネルの断面積

A_2 : 列車の断面積

これより、圧縮波の強さは列車速度のマッハ数 M とトンネルと列車の断面積比 ϕ により決定され、トンネルの長さには無関係であることが分かる。このことは実物と模型の相似条件がマッハ数の一致

$$[M]_M = [M]_F \quad ie \quad \left[\frac{V}{a} \right]_M = \left[\frac{V}{a} \right]_F \quad \dots \dots \dots (2)$$

断面積比の一致

$$[\phi]_M = [\phi]_F \quad ie \quad \left[\frac{(A_1 - A_2)}{A_1} \right]_M = \left[\frac{(A_1 - A_2)}{A_1} \right]_F \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで添え字 M, F はそれぞれ模型、実物を表す。

であることを示す。マッハ数の一致は同じ条件での空気を対象とする場合、 $[V]_M = [V]_F$ となり、同じ速度で実験しなければいけないことになる。

III. 実験概要

1. 実験模型

(1) トンネル模型

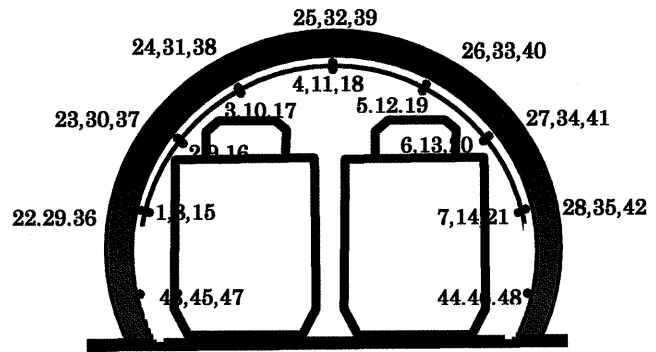
トンネルには新幹線用トンネルと在来線用トンネルの2種類を用いることにし、新幹線用トンネルは2車線、在来線用トンネルは1車線とした。前述の相似条件よりトンネルの長さは実験の目的を達成すればよいと考え、測定用トンネルの長さを120cm、2個のダミー用トンネルの長さをそれぞれ50cmとした。材料は市販の亚克力製円筒を使用した関係上、新幹線用トンネルの縮尺率は1/17、在来線用トンネルの縮尺率は1/14.5となった。

(2) 列車模型

列車は新幹線および在来線を対象とし、新幹線としては100系を、在来線は特急(クハ681系)と電車(クモハ211)を模型化した。いずれもバルサを用い、パンタ部は再現しなかった。長さはトンネルの全長(測定用トンネル長+2個のダミー用トンネル長)220cmを考慮し、160cmとした。電車模型の駆動部には、ラジコンカーを改造して用いた。そのため、電車の速度はラジコンカーの持っている速度とならざるを得なかった。縮尺率はトンネルの縮尺率と同様である。

2. 圧力測定位置

トンネル壁面およびトンネル補強構造体には、列車進入による圧



トンネル内部番号はトンネル壁面および補強構造体の表側(列車側)の測定位置
トンネル上部番号は補強構造体の裏側(トンネル壁面側)の測定位置
長さ方向に3ヶ所(Fig.3参照)に測定位置を設定。番号は手前から奥へ

Fig.2 Pressure Measuring Positions

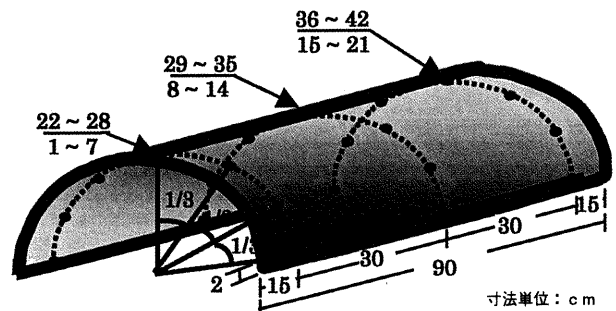


Fig.3 Pressure Measuring Positions on Reinforcement Structure

力変化を測定するための測定孔を設けた。測定孔には内径1mm、外径1.4mmの銅パイプを埋め込んだ。新幹線用トンネル、在来線用トンネルでの測定位置は同じである。測定位置をFig.2に、トンネル補強構造体での測定位置をFig.3に示す。

3. 模型の設置

トンネル模型および線路模型は大型風洞の測定胴内に水平になるように設置した。設置状況をPhoto.1に、列車模型をPhoto.2に示す。

4. 測定方法

(1) 圧力の測定

トンネル模型および補強構造体に設けた各測定孔に作用する圧力の測定は、測定孔に埋め込んだ銅パイプに内径1.4mm、外径2.3mmのビニールチューブ(長さ1,500mm)を接続し、多点風圧測定システムに導き測定した。

(2) 速度の測定

模型列車の速度は測定用トンネルの側に1mの間隔をおいてレーザ変位計を設置し、模型列車がその間を通過する時間より求めた。

(3) データサンプリング

圧力波形を求めることを目的としたため、ここでは1ミリ秒(1000Hz)間隔でデータを採取した。

(4) 変動圧力のひずみ補正

ビニールチューブを介して圧力を測定する場合、ビニールチューブ内の気柱共鳴や摩擦によってその変動成分が歪められる。この歪は、測定した模型壁面圧力の時刻歴データにFFTでフィルターをかけて補正した。

5. 実験ケース

実験は、①列車の種類、②トンネル形状、③列車のすれ違いの有無、④トンネル補強構造体の施工位置および⑤トンネル補強構造体の充填状況をパラメータとして行った。実験ケースを Table 1 に示す。ここで、トンネル補強構造体の施工位置は、ダミー用トンネルを測定用トンネルの前後に1~2個配置することにより変化させた。また、充填後というのは、測定点 29~35 の前後に薄板を嵌め込んでトンネル壁面とトンネル補強構造体の隙間を塞いだ状態を模擬したことを指す。

IV. 実験結果および考察

1. 相似条件の検討

入口圧縮波の強さから導かれる相似条件は、マッハ数の一致と断面積比の一致である。ところで、本実験で対象とする実大列車の速度は、新幹線で $300\text{km/h} \sim 200\text{km/h}$ 、在来線特急で $150\text{km/h} \sim 50\text{km/h}$ 、在来線電車で 50km/h である。

一方、模型列車の速度は、ラジコンカーを使用したため、速度を速くすることができず、レーザー変位計を利用した測定では 36km/h であった。したがって、本実験ではマッハ数の一致の相似条件は満足できないことになる。

また、断面積比の一致の条件は、(2)式より

$$\frac{[A_1]_F}{[A_1]_M} = \frac{[A_2]_F}{[A_2]_M} \quad \dots \dots \dots (4)$$

が導かれ、これはトンネル模型の縮尺率と、列車模型の縮尺率が同じなら、一致することを示しており、本実験では両方とも同じ縮尺率であるから、断面積比の一致の相似条件を満足することを示している。

ところで、時間 T 、速度 V および距離 L の関係から、本実験での時の縮尺率を算定すると、(5)~(7)式ようになる。つまり、本実験における $1/2.04$ 秒、 $1/3.48$ 秒および $1/10.44$ 秒が、実時間の1秒に相当することになる。

$$\left(\frac{T_{\text{model}}}{T_{\text{full}}} \right) = \left(\frac{1}{\frac{36}{300}} \right) = \frac{1}{2.04} \quad : \quad \text{新幹線} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\left(\frac{T_{\text{model}}}{T_{\text{full}}} \right) = \left(\frac{1}{\frac{14.5}{150}} \right) = \frac{1}{3.48} \quad : \quad \text{在来線特急} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\left(\frac{T_{\text{model}}}{T_{\text{full}}} \right) = \left(\frac{1}{\frac{36}{50}} \right) = \frac{1}{10.44} \quad : \quad \text{在来線電車} \quad \dots \dots \dots (7)$$

2. 実験結果

実験結果は大気圧との差圧 ($\Delta \text{ kPa}$) として示した。

(1) 実大トンネル圧力変化波形との比較

新幹線トンネルおよび列車模型を用いた片側走行時の実験結果の例を Fig.4 に示す。列車がトンネルに突入する前後、おおよそ2秒間の圧力波形である。理解しやすくするために高周波の変動成分を無視してトレースしている。図中に Fig.1 同様記号を付記してある。Fig.1 では、圧縮波による影響と膨張波による影響はほぼ同程度の大きさおよび形状を示したが、本実験では膨張波による圧力減少の

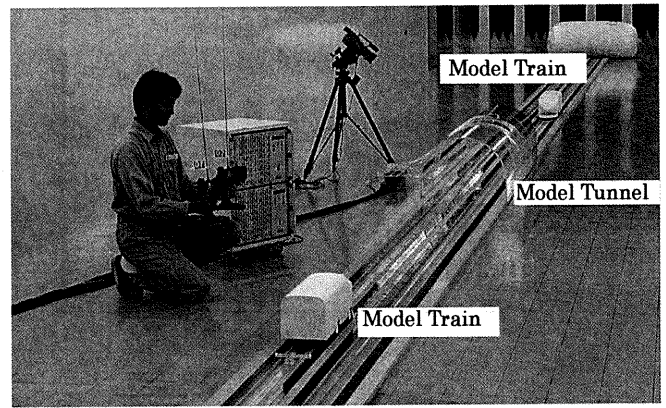


Photo 1 Configuration of Model Tunnel and Model Train

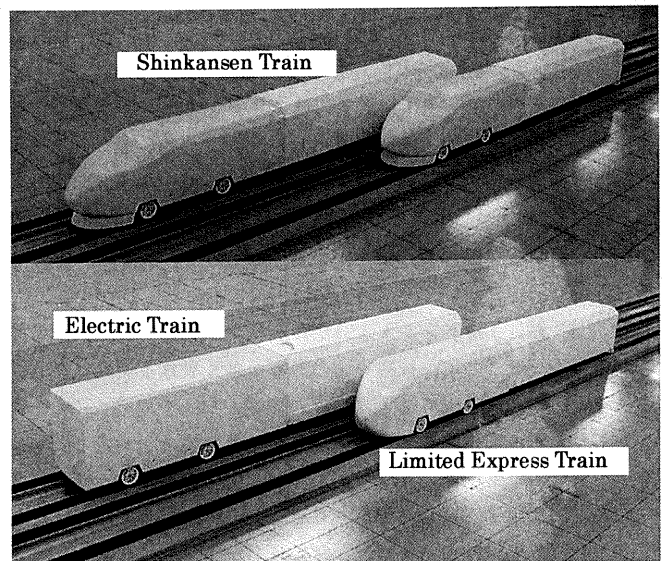


Photo 2 Models of Shinkansen Train, Limited Express Train and Electric Train

Table 1 Test Cases

列車の種類		新幹線	在来線特急	在来線電車
トンネル形状	単線トンネル		○	○
	複線トンネル	○		
列車のすれ違い	無し	○	○	○
	有り	○		
補強構造体の施工位置 (入口部・中央部・出口部)		○	○	○
補強構造体の充填状況	充填前	○	○	○
	充填後	○	○	○

方が小さく、大気圧に回復する前に、反射波による圧力(H 点以降)が発生していることが窺える。このような変化は、他の実験ケース全てに見られたが、実験ケースによっては明確でないものもあり、解釈が困難なものもある。このことは、入口圧縮波の強さは、トンネルの長さに関係であるというものの、膨張波の影響を含め、列車通過に伴う壁面圧力の変化性状を的確に表すためには、十分に長いトンネルと十分に長い列車模型が必要であることを示している。しかしながら、壁面圧力の変化性状の的確な再現も重要であるが、本実験の場合、トンネル補強構造体の裏・表に作用する圧力性状の把握が第1義の目的であることから、実大トンネルとの違いは重要

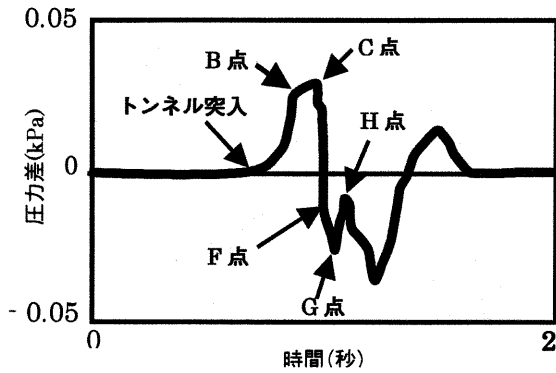


Fig. 4 Example of Pressure Variation of Shinkansen Tunnel Model : One Way Passage

視しないことにした。

(2) トンネル補強構造体に加わる圧力変化

Fig. 5 は新幹線トンネル片側走行時の、トンネル補強構造体の表側に加わる圧力の円周方向変化を示したものである。トンネル補強構造体は充填されていない状態である。測定点 1～7 の波形から分るとおり、列車が一番近い測定点 1 で圧縮波の強さが最大であり、列車から離れるにつれて、強さが小さくなっている。また、トンネル入口から出口にかけて、列車通過に伴う圧力波形の変化を見ると、Fig. 6 に示すようにトンネル入口から離れるにつれて、圧縮波の強さが小さくなると共に、後続車両の影響が強く現れるようになり、膨張波の影響と反射波の影響が徐々に大きくなっていく。Fig. 7 はトンネル壁面と補強構造体の隙間が充填された場合の測定点の関係を示したものであるが、充填されていない場合のトンネル構造補強体の表裏に作用する圧力波形を見ると、Fig. 8 に示すように、ある位相差を持って、ほぼ同等の大きさの圧力が正反対に作用し、結果としてトンネル補強構造体には、位相のずれ分の圧力が作用することが分かる。トンネル壁面と補強構造体の隙間が充填された場合、充填された部分のトンネル補強構造体には Fig. 8(a) と同等の圧力だけが作用することになるが、充填されていない部分には Fig. 9 のような圧力が作用する。Fig. 8 と比較すると、位相のずれに違いが現れ、結果として波形が違っているが、圧力の大きさにはそれほど違いが見られない。新幹線トンネルのすれ違い時についてもピーク値の大きさ、波形の性状などが変化するだけで、トンネル補強構造体には位相のずれの分しか作用しないことは同様であり (Fig. 10)、このことは在来線特急 (Fig. 11)、在来線電車 (Fig. 12) の場合にも当てはまる。また、圧縮波、膨張波、反射波の影響の現れ方を見ると、大きさは異なるが、新幹線片側走行、在来線特急、在来線電車ともよく類似している。なお、圧縮波に注目すると、在来線電車 > 在来線特急 > 新幹線の順に大きい、これは後述するようにマッハ数が一致していないことによる。

Table 1 に示した実験ケースについて、トンネル補強構造体に加わる差圧の、瞬間最大正圧の最大値および瞬間最小負圧の最小値を示すと、Table 2 のようになる。これより、トンネル補強体を施工中よりは、隙間が充填された方がより大きな圧力を受けていることが分かる。

3. 圧縮波の強さの検討

次に圧縮波の強さについて検討する。入口圧縮波の強さを (1) 式

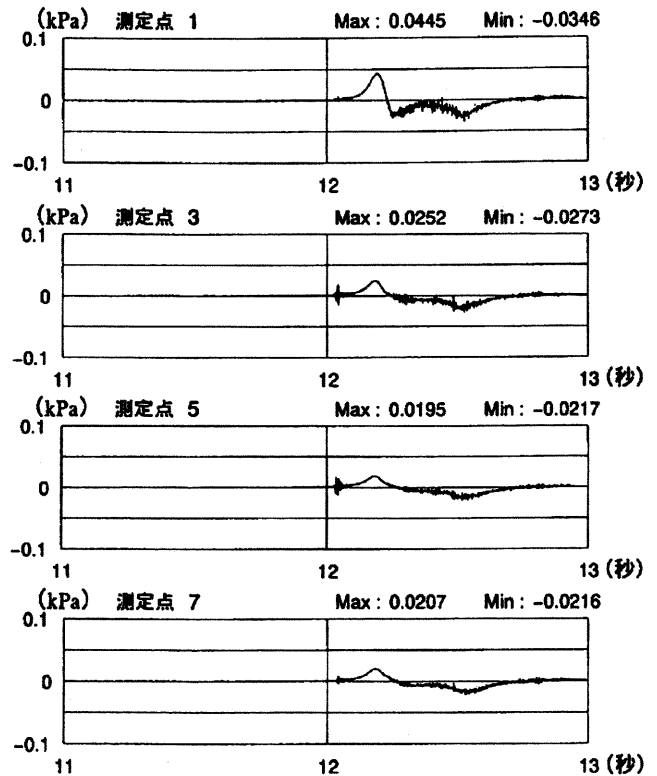


Fig. 5 Pressure Variation along Circumference Acting on Reinforcement Structure of Shinkansen Tunnel Model : One Way Passage

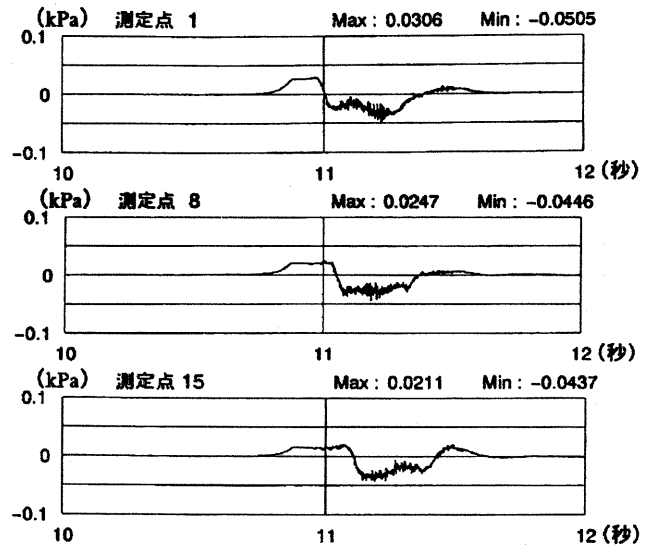


Fig. 6 Pressure Variation along Axis Acting on Reinforcement Structure of Shinkansen Tunnel Model : One Way Passage

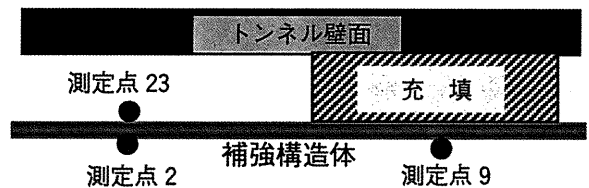


Fig. 7 Pressure Measuring Points With and Without Crevice Filled up

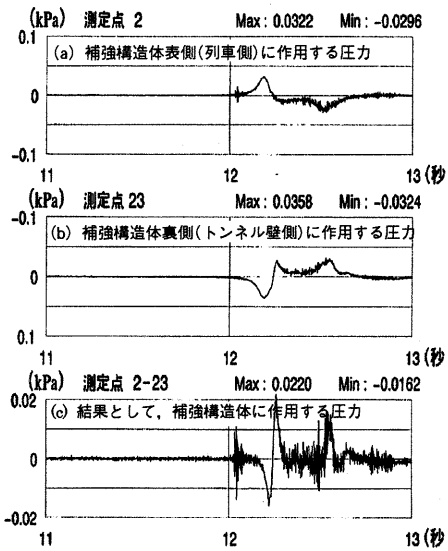


Fig.8 Pressure Variation Acting on Reinforcement Structure of Shinkansen Tunnel Model : One Way Passage

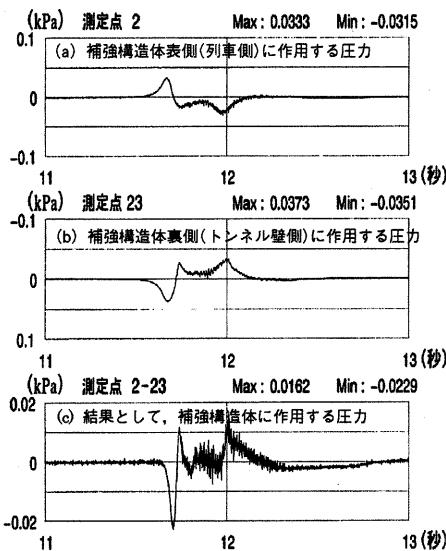


Fig.9 Pressure Variation Acting on Reinforcement Structure of Shinkansen Tunnel Model When Crevice is filled up : One Way Passage

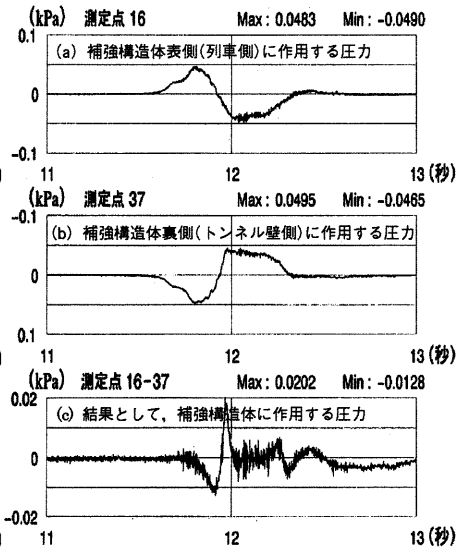


Fig.10 Pressure Variation Acting on Reinforcement Structure of Shinkansen Tunnel Model : Passing Each Other

により算出すると、おおよそ Table 3 のようになる。なお、トンネルの断面積および列車の断面積は参考文献 1), 3) によった。

さらに、模型実験による圧力波形は、サンプリング時間 1/1000 秒のものであるが、トンネル壁面(測定点 44~48)での最大値を計算結果と比較して、Table 3 に併せて示す。これより模型同士の場合、計算値と実験値は値が多少異なるものの、オーダーが同じであることが分かるが、実大列車との比較では、実験値はマッハ数がほぼ等しい在来線電車の場合を除き、値もオーダーも全く異なる結果を示していることが分かる。これは、模型実験ではマッハ数が相似できていないために入圧縮波の強さが再現できないこと、マッハ数が大きく違うほどその違いが大きくなることを示している。なお、すれ違い時の圧縮波の強さが、(1)式により算定できるかどうかは不明であるが、ここでは(1)式にて算出できると仮定した。

4. 時間の縮尺率の検討

マッハ数が一致している場合、時間の縮尺率は(5)~(7)式で表せる。すなわち、実験結果の時間軸を新幹線の場合は 2.04 倍、在来線特急は 3.48 倍、在来線電車は 10.44 倍すれば、実際の場合に相当することになる。しかしながら、実際にはマッハ数が異なっており、そのまま時間軸を伸ばしても意味が無いことになる。例えば、Fig. 1 と同様なケースについて波形を比較してみる。Fig.13 は新幹線トンネル片側走行時におけるトンネル壁面(測定点 43)での圧力変化を示したものである。この波形からはあまり明確ではないが、A 点から H 点までが列車進入から通過に伴う圧力波形であり、その後は反射波

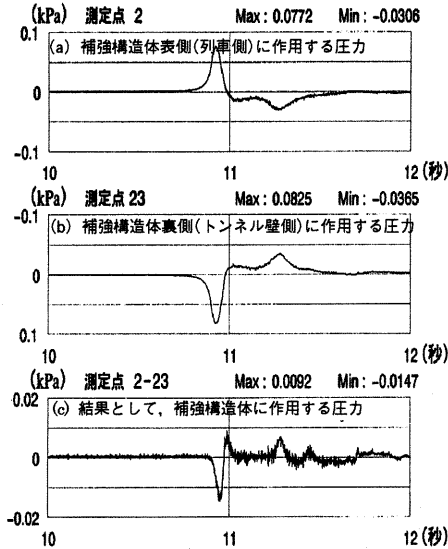


Fig.11 Pressure Variation Acting on Reinforcement Structure of Limited Express Tunnel Model : One Way Passage

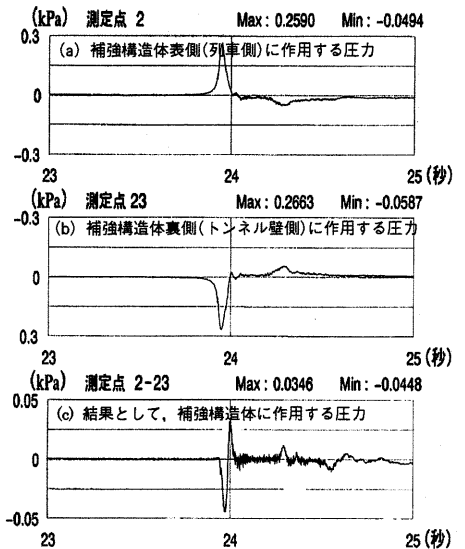


Fig.12 Pressure Variation Acting on Reinforcement Structure of Electric Train Tunnel Model : One Way Passage

Table 2 Maximum and Minimum Values of Differential Pressure on Reinforcement Structure

単位: kPa

項 目		非充填部分		充填部分	
		最大値	最小値	最大値	最小値
新幹線	片側走行時	0.027	-0.023	0.032	-0.037
	すれ違い時	0.037	-0.028	0.065	-0.076
在来線特急		0.016	-0.018	0.071	-0.059
在来線電車		0.044	-0.045	0.233	-0.064

によるものと推定される。したがって、A 点から H 点までを、Fig.1 に重ね合うように時間軸だけを伸ばしてみると(Fig.14)、実験でのおおよそ 0.4 秒が実時間での 5 秒に相当していることが分かる。す

なわち、時間の縮尺率から求めた 2.04 倍ではなく、おおよそ 12.5 倍したものが実時間に相当していることになる。この理由としては、トンネル長さ、列車長さがきちんと縮尺されていなかったことが挙げられる。つまり、時間軸をあわせるためには、トンネル断面比の一致だけでなく、トンネル長さ、列車長さの比も一致していることが必要であることになる。また、この重ね合わせにより、実験での波形の立ち上がりがかなり鈍いことも分かる。これは前述のマッハ数が一致していないことによるものと推定される。

5. 実験結果の適用

本模型実験結果をトンネル補強構造体に作用する圧力算定に適用するに当たり、圧縮波の強さおよび時間スケールの面から、再度検討する。

100 系新幹線片側走行について、Table 3 に示した(1)式による計算値と、Fig. 1 の実測値を比較すると、計算値の方が大きな値を示しており、このことは在来線特急あるいは電車についても当てはまると言える。このことを参考にして、Table 3 に示した圧縮波の強さの実大列車計算値と模型実験値を比較し、求めた換算係数を Table 4 に示す。実験結果を適用する場合、この換算係数で実験結果(Ex. Table 2)を換算し、圧力を算定すればよいと考えられる。

また、模型実験のトンネル壁面圧力の変化が、実測と異なることについては、以下のような仮定により対応できると考えられる。すなわち、今回対象としているのは、トンネル補強構造体であり、そのトンネル補強構造体の表面、裏面それぞれにどのような圧力が作用するかが重要なのではなく、結果として、トンネル補強構造体全体にどのような圧力が作用するのか(差圧)が重要なのである。したがってトンネル補強構造体に作用する圧力の変化がどうであれ、ある位相差をもってその圧力が作用し、その結果、実験結果と同じ差圧(補正された差圧)が作用すると仮定することにより、対応できると考えられる。

なお、今回の場合、圧力の継続時間はそれほど問題にならないと判断される。すなわち、実測結果あるいは模型実験結果より、圧縮波による影響は、膨張波によるものとはほぼ同程度であり、反射波による影響よりは大きいと考えられる。1 回にある点に作用する力は数 10 秒程度であり、膨張波による圧力に十分に耐えることができれば、それより小さい圧力の繰り返しには十分に耐えうることができると思われる。したがって、時間スケールの換算はそれほど意味をもたないと考えられるので、換算の必要はない。

V. おわりに

列車突入により生じる圧縮波および膨張波による、トンネル補強構造体に作用する圧力を模型実験により調査した。

入口圧縮波の強さおよび膨張波による影響を再現するには不十分な模型実験ではあったが、さまざまな条件下でのトンネル補強構造体に作用する圧力変化を予測できた。

また、新幹線トンネル内での圧力変化の実測結果と照らし合わせることで、トンネル補強構造体に作用する圧力の大きさを推定できた。在来線トンネル内での圧力変化の実測結果が入手できれば、その方面でのトンネル補強構造体に作用する圧力の大きさを推定することも可能と思われる。

Table 3 Comparison of Strength of Entry Compression Wave

単位: kPa

圧縮波の強さ	実大列車計算値	模型列車計算値	模型実験値
100 系片側走行	2.18	0.04	0.054
100 系すれ違い	5.76	0.12	0.072
在来線特急	1.41	0.11	0.10
在来線電車	0.28	0.17	0.29

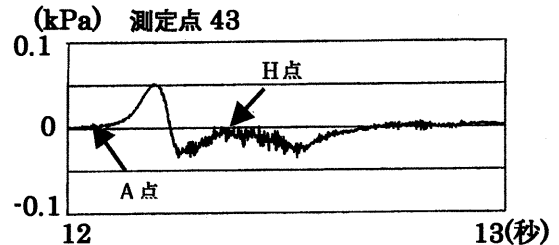


Fig.13 Pressure Variation Acting on Tunnel Wall of Shinkansen Tunnel Model in case of One Way Passage

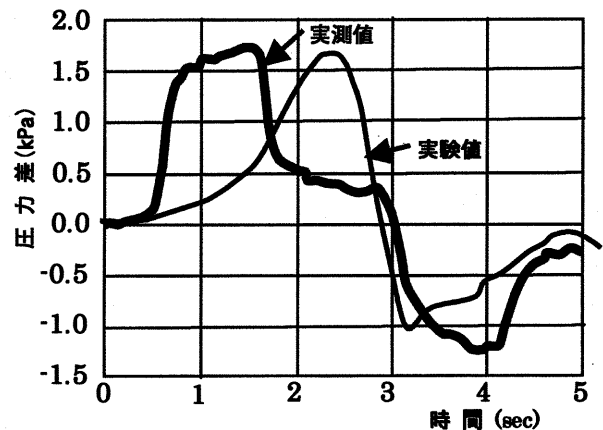


Fig.14 Superimposition of Full-Scale measurement and Model-Scale Test

Table 4 Pressure Conversion Factor

	100 系新幹 線片側走行	100 系新幹 線すれ違い	在来線 特急	在来線 電車
換算係数	40	80*	14	1

* すれ違いについては既述のように妥当性が不明である。この値を採っていれば安全側といえる。

参考文献

- 1) 眞下・他 5 名；列車後尾部の突入に伴って生じるトンネル内の圧力変動，九州大学大学院総合理工学研究科報告，第 16 巻 第 2 号，(1994-9)，pp. 207-215.
- 2) 大石・他 4 名；トンネル微気圧波対策の研究，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第Ⅶ部門，(1996)。
- 3) 大津山・他 2 名；トンネル内列車走行時の流れの数値解析と実測の比較，日本機械学会論文集(B編)，第 65 巻 639 号，(1999-11)，pp. 56-63.