

超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する 覆工構造の設計

山崎 幹男¹・加藤 寛²・若原 敏裕³・岡崎 真人⁴・上野 眞⁵・藤野 陽三⁶

¹正会員 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 リニア開発本部 (〒103-8288 東京都中央区八重洲 1-6-6 八重洲センタービル 8F)

²正会員 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 リニア開発本部 (〒103-8288 東京都中央区八重洲 1-6-6 八重洲センタービル 8F)

³正会員 博士(工学) (株) 大崎総合研究所 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F)

⁴正会員 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 リニア開発本部 (〒103-8288 東京都中央区八重洲 1-6-6 八重洲センタービル 8F)

⁵正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部 (〒103-8288 東京都中央区八重洲 1-6-6 八重洲センタービル 8F)

⁶フェロー Ph.D. 東京大学大学院 教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

本研究は、時速500kmを越える超高速鉄道トンネルの覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、トンネル内での列車高速走行に伴う覆工構造の挙動について論じるものである。まず、山梨リニア実験線において、トンネル内の圧力変動と覆工ひずみの計測を実施し、トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の実挙動を把握した。また、応力解析モデルによる覆工ひずみの解析と測定結果との比較からその妥当性の検証を行った。さらに、営業線を想定した約400mの長大編成車両で、2列車相対速度1000km/hの速度条件でのトンネル内の圧力変動に対する覆工応力解析を実施し、覆工構造の強度特性ならびに疲労特性について検討し、現状の設計に基づく覆工構造は強度特性および疲労特性に関して十分な耐力を有していることを確認した。

Key Words : maglev linear motor vehicle high-speed train tunnel, pressure fluctuation, strain measurements, tunnel lining, concrete stress, fatigue

1. はじめに

21世紀の超高速・大量輸送機関として期待されている超電導磁気浮上式鉄道の実用化を目指し、山梨リニア実験線において本格的な走行試験を平成9年4月から開始した。平成12年3月までの3年間で最高速度552km/hを達成し、相対速度1,003km/hまでの高速すれ違い試験を実施し、平成12年4月からは、連続高速走行試験を行うなど、システムの完成度向上に向けた技術開発および各種試験を継続して実施している。

超電導磁気浮上式鉄道のように500km/hを越える超高速鉄道システムを考える場合、列車の高速走行に伴う様々な空気力学的現象が顕著となる^{1)~3)}。

高速列車の走行に伴うトンネル内の圧力変動の評価は、近年の計算機能力の著しい発達により、3次元圧縮性流体を対象に、数値流体解析(Computational Fluid Dynamics)を用いたトンネル内の流れ場や圧力変動などの数値シミュレーションが可能となり^{4)~6)}、複雑な列車先頭形状やトンネル断面形状なども3次元解析格子を用いることでCFDの解析モデルに忠実に再現できるようになってきた^{7), 8)}。

著者らも、既往の研究成果⁹⁾において、山梨リニア実験線でのトンネルにおける圧力変動測定と3次元圧縮

性流体を対象としたトンネル内圧力変動解析を行い、列車が、1)非常に細長く、2)地表直上を高速で走行し、3)対向列車とすれ違い、4)トンネル内を走行する、などの特徴を有する列車の走行形態(トンネル突入・トンネル退出・トンネル内のすれ違い)毎のトンネル内の最大圧力変動を把握している。さらに、将来の営業線を想定した新幹線と同程度の列車長約400mに対し、設計速度条件として、1列車単独列車550km/h、2列車相対速度1000km/hの場合のトンネル内の圧力変動の算定を行い、トンネル内に生じる最大・最小圧力変動をトンネル覆工構造に作用する設計用圧力変動(最大正圧および最大負圧)の評価を行った。

鉄道トンネルでは、標準工法としてNATMが採用され、山梨リニア実験線のトンネル建設においても、支保工により地山が安定した後、大半の覆工構造は無筋コンクリートで構築されている。

超高速鉄道トンネルの覆工構造を考えた場合、トンネル内での列車の高速走行によって生じる圧力現象を解明し、その工学的評価を行うことは、超高速鉄道トンネルを安全かつ低コストで実現する上で極めて重要な検討課題である。さらに、将来の営業線では、日本の立地条件や環境条件を勘案するとトンネル区間の割合が多くなることが想定され、空気特性を考慮したト

ネルの合理的設計法の確立が不可欠となる^{10)~13)}。

平成 11 年 6 月の山陽新幹線福岡トンネルでの事故に鑑み、それ以降、散見されるコンクリート剥落などに対し、覆工コンクリートの強度を確保する観点から、また、疲労によるひび割れや亀裂の進展などに対し耐久性を確保する観点から、列車走行により覆工コンクリート表面に繰り返し作用する圧力変動を考慮した覆工コンクリートの挙動をより正確に評価することが増々重要となってきている。

しかし、これまで、高速列車の走行に伴うトンネルの覆工内面の圧力変動に対する覆工コンクリートの挙動評価に関する研究・開発の報告は非常に少ないようである。特に、時速 500km に達する超高速域での列車走行により、繰り返し作用する圧力変動を考慮した覆工コンクリートの強度や疲労特性に関わる研究は皆無であると言ってよい。

トンネル覆工の力学挙動に関する研究は、鉄道や道路を対象として非常に多くあるが¹⁴⁾、ほとんどが地山からの土圧作用に関するものである。僅かではあるが、圧力変動による覆工コンクリートの挙動に着目した研究もある。小島ら¹⁶⁾は、ひび割れを有するコンクリート部材の曲げ疲労試験およびシミュレーション解析を行い、トンネル中の列車走行に伴う圧力変動がトンネルの覆工コンクリートの性状や疲労に及ぼす影響について検討している。

コンクリート構造の疲労に関する研究は比較的古くからなされており、これらの多くは圧縮または曲げ疲労に関するものである。Hubert ら¹⁷⁾は、曲げ応力による疲労に対し、金属疲労で用いられる $S-N$ 線図を用いてマイナー則による破壊を確率的に評価する研究を発表している。Tepfers¹⁸⁾は、無筋コンクリート部材の引張疲労試験を数多く実施し、確率的に回帰モデルによる破壊を検討した。また、徳光ら¹⁹⁾は繰返し応力によるコンクリートの圧縮疲労試験方法を提案している。

コンクリート標準示方書¹⁵⁾では、曲げ引張応力および引張抗力を受けるコンクリートの疲労強度は、圧縮応力を受ける場合に比較してばらつきが大きい、静的強度のばらつきも大きいので、統計値として超過確率で設定される特性値として検討すれば良いとされている。さらに、引張疲労強度は圧縮応力を無視した片振り繰返し応力として疲労強度を算定することになっている。

高速鉄道トンネルの覆工コンクリートには、列車の高速走行に伴うトンネル内の圧力変動に起因した軸力と曲げモーメントが繰返し作用する。これらの応力を受ける無筋コンクリート部材の疲労に関する試験結果や解析的検討は実施されていないのが現状である。Cornelissen & Reinhardt²¹⁾は、軸引張・軸圧縮に関する疲労試験結

果を示しており、交番軸力を受けた疲労強度は、引張疲労強度に比較して低下することが示されている。また、繰返しが引張領域だけに留まった場合に比べ、引張・圧縮領域にまたがる場合には低下の程度も大きくなる。このような交番軸力による疲労強度を回帰式により定量的に示している。

本研究では、超電導磁気浮上式鉄道、すなわち、時速 500km/h の超高速鉄道を対象としたトンネルの覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、まず、山梨リニア実験線のトンネルにおいて、試験車両 MLX01 (3 両編成) のトンネル内走行 (突入・通過・すれ違い) を行った場合のトンネル内の圧力変動と覆工コンクリートひずみ測定を実施し、一連の測定結果から、圧力変動量とコンクリートひずみの関係を求める。次に、覆工コンクリートの応力について検討する目的から、1) 地山は支保工により安定が保持されている、2) 圧力変動による変形は覆工と覆工地山側に配置された導水材にのみ生じる、と仮定し、トンネル軸に垂直な断面での 2 次元平面ひずみ問題として取り扱う有限要素解析モデルを構築する。また、解析モデルの妥当性を検証する目的から、山梨リニア実験線での測定により得られた圧力変動を静的に作用させた解析を実施し、覆工コンクリートひずみの解析結果と測定結果の比較を行うこととした。さらに、著者らの既往の研究⁹⁾で求めているトンネル覆工構造の設計用圧力変動 (最大正圧および最大負圧) を作用させた覆工コンクリートの応力解析を実施し、その強度特性に対する検討を行う。最後に、トンネル内の圧力現象の重量とその重複度に応じた圧力変動および繰返し回数の算定を行い、無筋コンクリートの累積損傷度解析を実施し、超高速鉄道トンネルの覆工コンクリートの構造上の強度ならびに疲労特性の観点から考察を加える。

2. 山梨実験線のトンネル覆工構造の概要

(1) トンネル断面の概要

トンネル内空断面は、所要の建築限界外に施工上あるいは保守上必要な余裕を考慮し、地形、地質に応じた形状とするのが一般的である。

超電導磁気浮上式鉄道では設計最高速度は 550km/h としており、空気抵抗は列車の所要推力を大きく左右するため、できる限り大きなトンネル内空断面が望ましいが、施工性や経済性 (建設コストやランニングコスト) などを総合的に勘案して、車両・トンネル断面積比 $R = 0.12$ ($= a/A$: 車両断面積 a とトンネル内空有効断面積 A の比) を適切と判断した。また、トンネル幅 B は、ガイドウェイ中心間隔、ガイドウェイ内空幅および道路幅を考慮し、 $B = 12.7\text{m}$ 程度と計画した。高

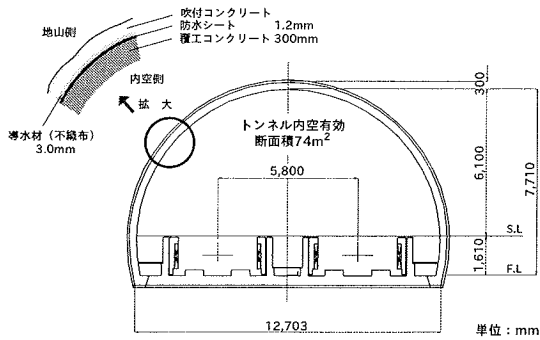


図-1 山梨実験線のトンネル覆工構造の概要図（標準区間）

さ H については内空有効断面積を満足させる高さとして、路盤よりトンネル天端まで、 $H = 7.7\text{m}$ とした¹⁰⁾。この結果、山梨リニア実験線のトンネル断面（標準区間）は、図-1に示すような内空有効断面となり、その偏平率は0.64程度と新幹線トンネルの偏平率0.83と比較して偏平な断面形状となっている¹⁰⁾。

(2) トンネル覆工の概要

山梨リニア実験線のトンネルは、当該地区の大部分が一般的な地山（軟岩および中硬岩）であることから、通常、山岳トンネルとして標準的な NATM（吹付コンクリート+ロックボルト等を用いる標準工法）により施工されている。トンネル覆工の施工は、その内空変位が収束し安定が保たれた後、漏水対策とコンクリートのひび割れ防止対策のための防水シートと導水材を配置し、コンクリートを打設する手順で実施する²²⁾。

トンネルの漏水は、覆工コンクリートの耐久性の低下に止まらず、トンネル内の諸施設の機能低下や環境の悪化をもたらす維持管理上の大きな問題となる。防水シートは、漏水処理の不要な覆工構造とする観点から、以下の理由により設計および詳細を決定している。

- 時速 500km の高速走行による圧力変動により、従来のトンネル壁面での防水工による漏水対策では不十分である。
- 覆工コンクリートの背面拘束や乾燥収縮などによるひび割れ発生を防止するため、覆工背面（地山側）に配置する防水シートが不可欠である。

防水シートは、覆工背面（地山側）の吹付コンクリートへの追従性、強度、接合性、止水性、耐久性、施工性などについて試験施工を実施し総合的に検討した上で、1.2mm 厚のエチレン酢酸ビニールシートを用いることとした。また、地山側からの湧水を排水パイプに導流する目的から、防水シート背面に厚さ 3.0mm の導水材（不織布）を設けている。覆工コンクリートは、安全性

と耐久性の観点から新幹線と同程度の厚さ 300mm を標準とし、従来の無筋コンクリートを採用している。覆工コンクリートの打設は一打設長 12m で、コンクリートポンプ車（50m³/h）を用いて行った。なお、覆工コンクリートの仕様は、設計基準強度 18N/mm²（普通ポルトランドセメント、最大骨材寸法 40mm、スランプ 15±2.5cm、空気量の範囲 4.5±1%、最大水セメント比 58%）である。

以上、述べたように、図-1の拡大部のごとく、山梨リニア実験線のトンネルの覆工構造は、地山側から、吹付コンクリート、導水材（厚さ 3.0mm）、防水シート（厚さ 1.2mm）、覆工コンクリート（厚さ 300mm）で構成される。

3. トンネル内圧力変動と覆工コンクリートひずみの測定概要

山梨リニア実験線のトンネルにおいて、列車がトンネル内に突入した場合、1列車のみ通過した場合、2列車がすれ違い走行をした場合のトンネル内圧力変動と覆工コンクリートひずみ測定を実施した。なお、1列車単独走行に関しては、北線 500km/h 東行き走行とし、また、2列車すれ違い列車走行時は、列車相対速度 900km/h（北線 500km/h 東行き走行列車と南線 400km/h 西行き走行列車）とした。

図-2は、トンネル内の圧力変動および覆工コンクリートのひずみ測定の概要を示したものである。図-2(a)は測定時の試験車両 MLX01（3両編成：編成長 $l = 28.0 + 24.3 + 28.0 = 80.3\text{m}$ ）を示したものである。列車には、ほぼ等間隔で4つの台車があり、台車部には局所的な車体断面積の変化がある。

トンネル内の圧力測定点は、図-2(b)に示すように、トンネル西口側に A, B, C, さらに、トンネル東口に、D と E である。ただし、本研究では、主として、トンネル西口の測定点 A での測定結果について考察する。トンネル西口の測定点 A は、列車がトンネル西口に突入・退出する際に生じる圧力上昇（突入波・退出波）と列車が測定断面を通過する際の圧力低下を測定するため設けた測定点である。測定点 A では、トンネル断面内の圧力分布を測定する目的から、北線側（＝トンネル壁面左側）、クラウン部、南線側（＝トンネル壁面右側）のトンネル壁面に3つの絶対圧計（ $P = 1013\text{hPa} \pm 2000\text{mmH}_2\text{O}$ ）を設置している。

覆工コンクリートのひずみ測定点は、図-2(b)に示すように、測定点 A で実施した。測定点 A における断面内の動ひずみ計（抵抗値 120Ω）の配置は、北側（＝トンネル壁面左側）より動ひずみ計 1（0度）から時計回りに 15度ピッチで南側の動ひずみ計 13（180度）ま

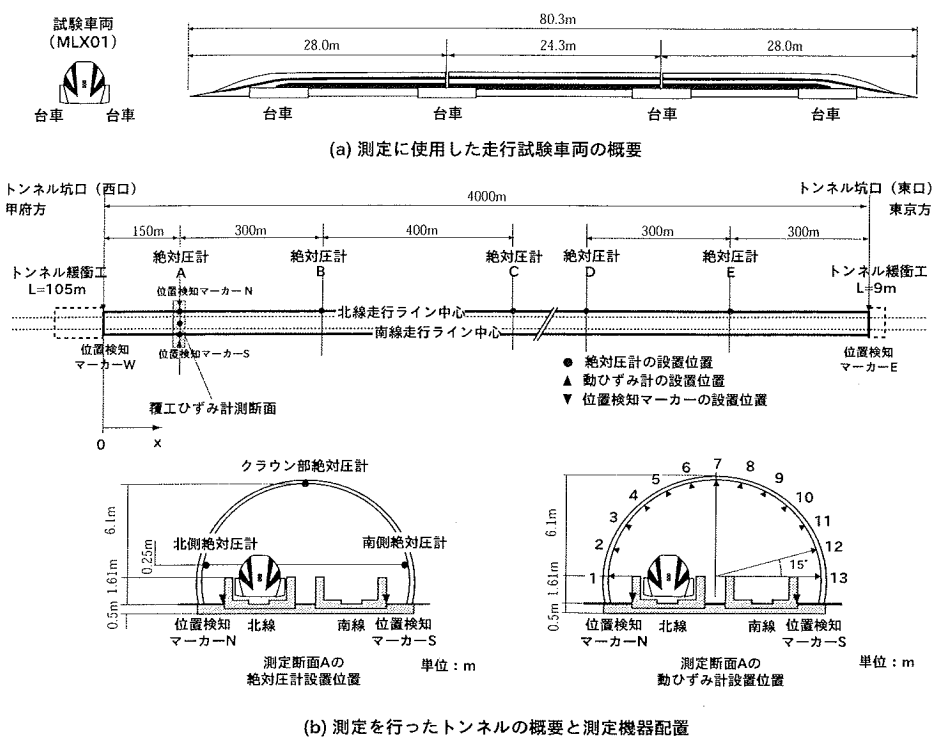


図-2 トンネル内の圧力変動および覆工コンクリートひずみの測定概要

での総計 13 点である。この場合、測定される覆工コンクリートの動ひずみは、トンネル内での列車高速走行に伴う圧力変動に対する動ひずみであり、覆工コンクリートの自重 (= 死荷重) による静ひずみは加味されない。さらに、トンネルの東西の坑口には、列車がトンネルに突入・退出する時刻と速度を測定する目的から、列車の通過に反応する列車位置検知マーカーを設置している。また、測定点 A には、列車すれ違い位置の確認を行うための位置検知マーカーを設置している。

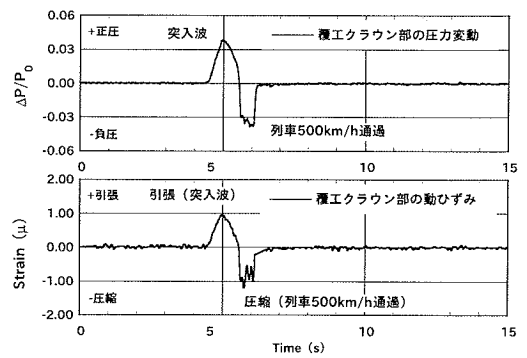


図-3 トンネル内の圧力変動と覆工コンクリートのひずみ (覆工クラウン部: 東行き 500km/h 走行)

4. トンネル内圧力変動と覆工コンクリートひずみの測定結果

トンネル内の圧力変動の測定結果 (突入波・退出波の伝播特性, 1 列車単独通過時および 2 列車すれ違い時の圧力変動特性) の詳細は、参考文献 9) に譲り、ここでは、トンネル内の圧力変動とトンネル覆工コンクリートに生じるひずみの関係について、測定結果に基づき考察を行う。また、列車の走行形態毎に覆工コンクリートに生じる動ひずみについての考察も行う。

(1) 圧力変動と覆工ひずみの関係

図-3は、東行き 500km/h 走行時のトンネル内の圧力変動と覆工コンクリートに生じる動ひずみ (覆工クラ

ウン部) の関係を調べたものである。図-3に示すように、突入波がトンネル内を伝播する際の圧力変動は大

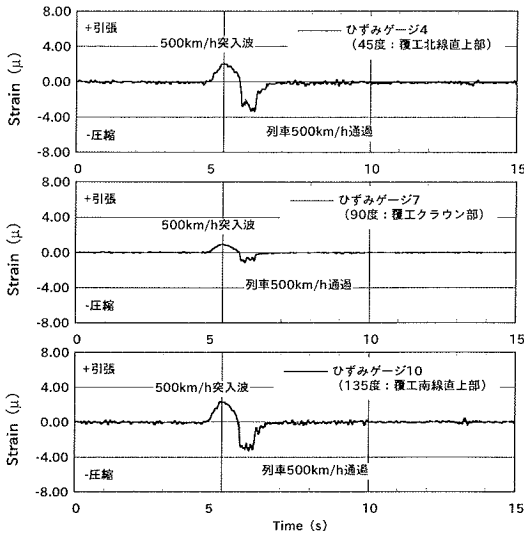


図-4 1列車単独走行(500km/h)時の覆工ひずみ

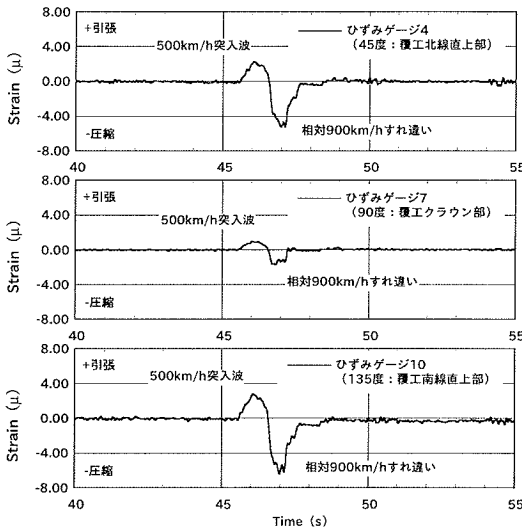


図-5 すれ違い走行時(900=500+400km/h)の覆工ひずみ

気圧 P_0 に対し正圧 $\Delta P/P_0 > 0$ (圧縮) となり、その際、トンネルの覆工コンクリートに引張りひずみ(引張応力の状態)を生じさせる。また、列車通過時の圧力変動は大気圧 P_0 に対し負圧 $\Delta P/P_0 < 0$ (膨張) となり、覆工コンクリートに圧縮ひずみ(圧縮応力の状態)を生じさせることになる。

(2) 覆工コンクリート断面内のひずみ分布

図-4は、1列車 500km/h 単独走行時の覆工コンクリートの動ひずみを示したものであり、また、図-5は、2列車相対 900km/h (=500km/h+400km/h) すれ違い走行時の覆工コンクリートの動ひずみを示したもので

ある。それぞれ、覆工コンクリート断面において、北線直上部、クラウン部、南線直上部の動ひずみ時系列波形を示している。図示した結果から、覆工クラウン部(90度)より列車走行車線直上部(北線45度と南線135度)に相当する覆工ひずみが、引張・圧縮、いずれの場合も大きいことがわかる。

図-6~図-8は、列車の走行形態ごとに、覆工コンクリート断面に生じた最大ひずみの分布を示したものである。図-6は突入波(500km/h)作用時の最大ひずみ分布(全断面で引張)を示しており、図-7は1列車単独通過時(500km/h)の最大ひずみ分布(全断面で圧縮)を示している。また、図-8は2列車すれ違い時(900=500+400km/h)の最大ひずみ分布(全断面で圧縮)を示している。図示した結果から、最大ひずみの発生箇所はいずれも列車走行車線上に近い位置であり、それぞれ、突入波(500km/h)作用時には最大引張りひずみ+2.5 μ 程度、1列車単独通過時(500km/h)には、最大圧縮ひずみ-3.3 μ 程度、また、2列車すれ違い時(900=500+400km/h)では、最大圧縮ひずみ-5.5 μ 程度であることがわかる。

別途実施した覆工コンクリートのコアボーリング試験より求められた微小ひずみレベルの弾性係数 $E_c = 32.8\text{kN/mm}^2$ と測定から求められた最大ひずみを用いて、覆工コンクリートの動的な応力を算定すると、突入波(500km/h)作用時の最大引張応力は、無筋コンクリートの許容引張応力度 $\sigma_{ca} = 0.29\text{N/mm}^2$ に対し、応力度比で $\sigma/\sigma_{ca} = 0.283$ となる。また、1列車単独通過時(500km/h)の最大圧縮応力は、無筋コンクリートの許容圧縮応力度 $\sigma'_{ca} = 5.4\text{N/mm}^2$ に対し、応力度比で $\sigma/\sigma'_{ca} = 0.020$ となり、2列車すれ違い時(900=500+400km/h)の最大圧縮応力は、同じく許容圧縮応力との比で表すと、 $\sigma/\sigma'_{ca} = 0.033$ となる。

ただし、これらの応力は圧力変動によって生じた応力であり、覆工コンクリートの自重(死荷重)による応力を加えた上でその強度特性を検証する必要がある。したがって、以降、測定結果を再現できるFEM解析モデルを構築し、それにより、覆工コンクリートの構造強度の検証を実施する。

5. 覆工コンクリートの応力解析

(1) 解析モデルの構築

覆工コンクリートの応力解析は、図-1に示したトンネルの覆工構造を、トンネル軸直交断面での平面ひずみ問題として取り扱う。図-1に示したように、トンネル覆工の地山側には、止水目的の防水シート(エチレン酢酸ビニールシート)と導水性向上のための導水材(不織布)が配置されている。防水シートの弾性係数は

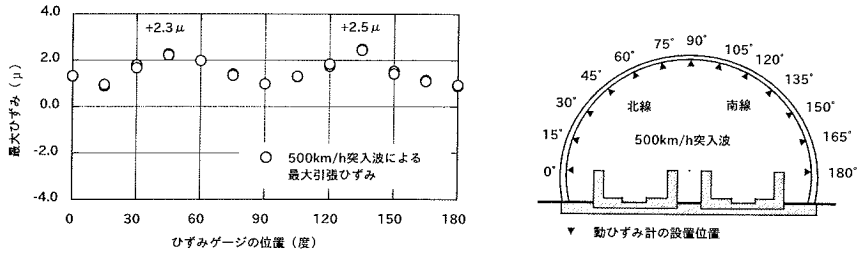


図-6 500km/h トンネル突入波作用時の覆工コンクリート断面の最大引張ひずみ分布

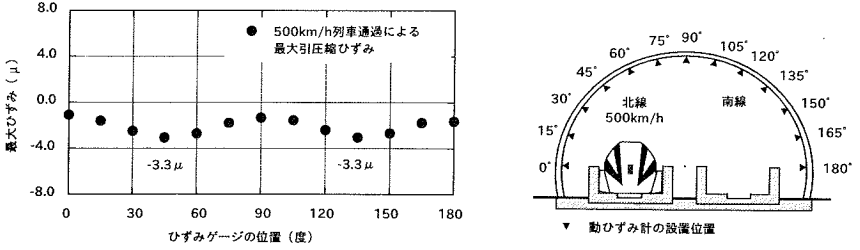


図-7 1列車単独通過時（500km/h）の覆工コンクリート断面の最大圧縮ひずみ分布

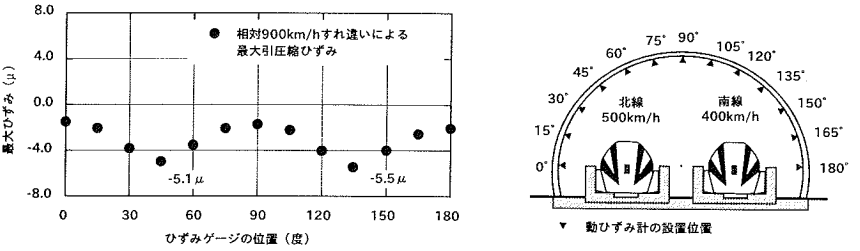


図-8 2列車すれ違い時（900=500+400km/h）の覆工コンクリート断面の最大圧縮ひずみ分布

導水材に比べ十分に大きいため、地山を支持するばねとして導水材（不織布）と覆工コンクリートの弾性だけに着目したモデル化を行う。解析モデルの構築にあたり、次の2点を仮定した。

- 地山は吹付コンクリート、ロックボルト等の支保工により安定が保たれ、覆工には地圧が作用しない。
- 圧力変動による変形は、覆工コンクリートと覆工地山側に配置された導水材（不織布）のみに生じる。

解析対象のモデル化は4節点ソリッド要素を用い、覆工と導水材は周方向に32分割し、また、厚さ方向に関しては、導水材は1分割、覆工コンクリートは3分割とした。境界条件は、覆工の端部と導水材の地山側の節点変位を拘束した。要素分割を図-9に示す。覆工コンクリートの材料定数は、計測地点で採取した覆工コンクリートのボーリングコアの圧縮試験結果等に基づいて、表-1に示す値を用いた。

導水材の物性に関しては、図-10(a)に示すように、室内試験により厚さ方向に受ける荷重と厚さの保持率

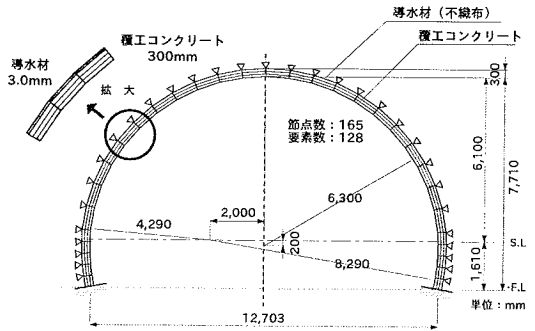


図-9 覆工コンクリートの応力解析に用いた有限要素分割

表-1 覆工コンクリートの材料定数

ヤング係数	E_c	32.8kN/mm ²
ポアソン比	ν	0.2
単位容積質量	γ	2.35t/m ³

の関係が得られている。この関係から、荷重を受けて

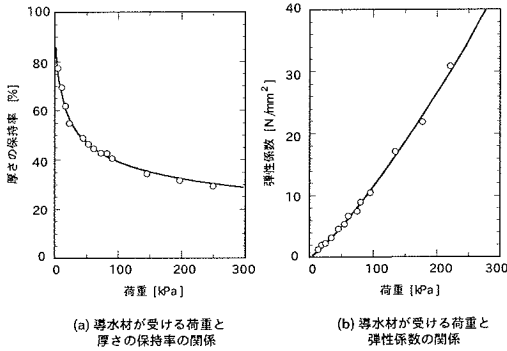


図-10 覆工背面の導水材の厚さの保持率と弾性係数

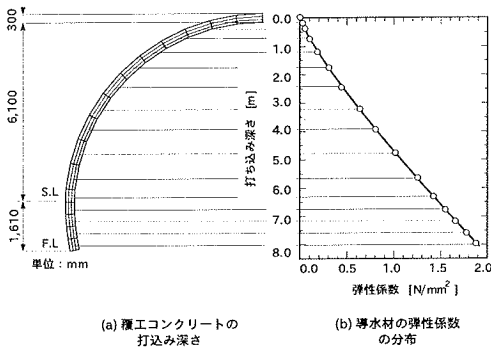


図-11 コンクリート打込み深さと導水材の弾性係数

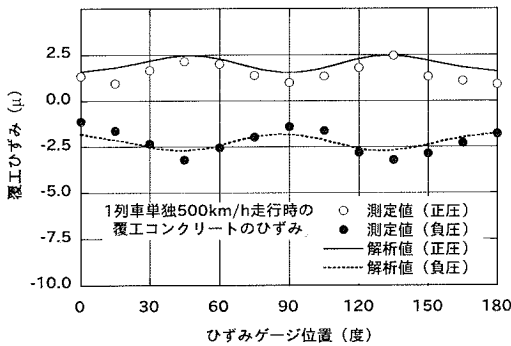


図-12 最大ひずみ分布の解析値と測定値の比較

いる状態での接線弾性係数を導き出すと、図-10(b)に示すようになる。すなわち、導水材は、厚さ方向に受ける荷重が増加すると剛性が高くなる非線形特性を示す。さらに、覆工地山側に配置された導水材は、施工の際覆工コンクリート打設時の圧力を受けて圧縮されると考えられる。この圧力を静水圧分布と仮定し図-10の関係を用いて、導水材の弾性係数の分布をコンクリート打込み深さの関数として図-11に示すような分布に定めた。この結果を用い、解析モデルの要素毎に各々の要素の中心位置で、導水材の弾性係数を設定した。

(2) 解析結果と測定結果の比較

前節の解析モデルを用い、覆工コンクリートの応力解析を行い、解析結果から求められるひずみと実測ひずみの比較を行い、解析モデルの妥当性を検証する。なお、解析において外力とする圧力変動は、測定から求められた圧力変動の最大値を用いている。

図-12に覆工コンクリートの最大ひずみ分布の解析値と測定値（1列車単独500km/h走行）の比較結果を示す。図示した結果から、突入波作用時の正圧による最大引張ひずみとその断面内の分布に関し、解析結果と測定結果はよく対応していることが分かる。また、列車通過時の負圧による断面内のひずみ分布に関しても、解析結果と測定結果の両者は、ほぼ対応しているものの、45度あるいは135度付近の最大圧縮ひずみを与えるポイントで、解析値は測定値に対し僅かながら過小評価する傾向にある。この差違は、覆工コンクリート背面の導水材の弾性係数が、正圧作用時（導水材が薄くなる方向に作用）と負圧作用時（導水材が厚くなる方向に作用）では異なる影響などが考えられる。ただし、無筋コンクリートの許容圧縮応力度 $\sigma'_{ca}=5.4\text{N/mm}^2$ と許容引張応力度 $\sigma_{ca}=0.29\text{N/mm}^2$ の間には、1オーダーの差があり、図-12に示した覆工コンクリートに圧縮応力を生じさせる負圧作用時の解析結果と測定結果の差は許容できる範囲にあるものと考えられる。

6. 最大圧力作用時の覆工構造の挙動

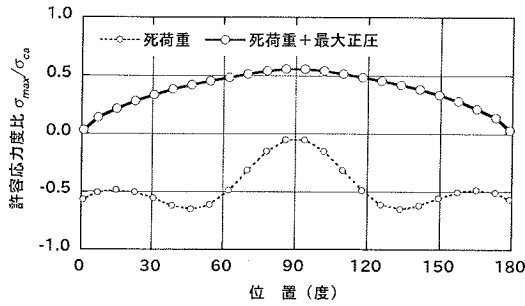
図-12に示すように、本研究における応力解析モデルは山梨実験線での覆工ひずみの測定結果と良く対応することから、この解析モデルに対し、覆工コンクリートの自重（＝死荷重）を考慮し、さらに、著者らの既往の研究結果⁹⁾で求めているトンネル覆工構造に作用する設計用最大圧力変動（最大正圧・最大負圧）が作用した場合の覆工コンクリート応力について検討する。なお、ここでは、設計時のトンネル覆工構造の安全性の照査を行う目的から、覆工コンクリートのヤング係数 E_c は設計基準強度 18N/mm^2 のコンクリートの基準値 22kN/mm^2 を用いている¹⁵⁾。

トンネル覆工構造の設計用最大圧力変動（＝設計荷重）は、新幹線と同程度の長大編成車両（列車長約400m）で、2列車最大相対速度 $1000(=500+500)\text{km/h}$ の場合には、著者らの既往の研究結果⁹⁾から、最大正圧および最大負圧は、大気圧 P_0 に対する比で表すと、

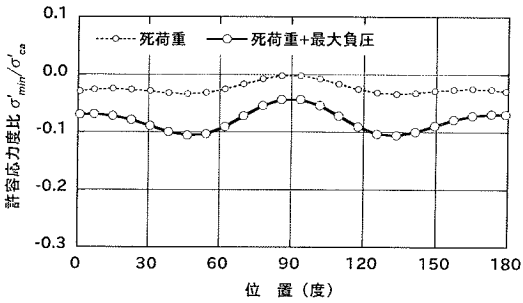
- 最大正圧 $\Delta P_+/P_0 = +0.146$
- 最大負圧 $\Delta P_-/P_0 = -0.188$

となる。

死荷重+最大圧力変動を作用させた場合の応力解析の結果を図-13に示す。図-13(a)は死荷重+最大正圧



(a) 最大正圧作用時の引張応力



(a) 最大負圧作用時の圧縮応力

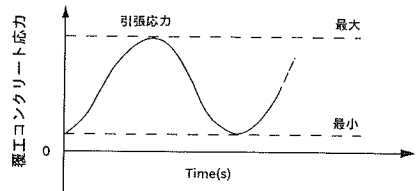
図-13 最大正圧および最大負圧を作用させた場合の覆工コンクリート応力度の解析結果

を作用させた場合の解析結果（図中実線）であり、図-13(b)は死荷重+最大負圧を作用させた場合の解析結果（図中実線）を示している。図中の破線は死荷重による応力を示しており、この破線と実線との差が、最大圧力変動による応力を表す。なお、図-13(a)(b)は、コンクリート標準示方書¹⁵⁾にある無筋コンクリートの許容引張応力度 $\sigma_{ca}=0.29\text{N/mm}^2$ （最大正圧作用時）および許容圧縮応力度 $\sigma'_{ca}=5.4\text{N/mm}^2$ （最大負圧作用時）の比、すなわち、それぞれ許容応力度比で示している。そのため、死荷重による許容応力度比は、最大正圧作用時と最大負圧作用時では異なる。

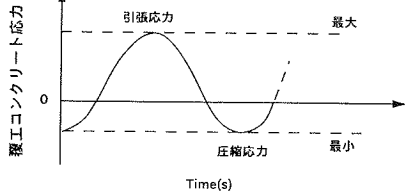
図-13に示した結果から、引張・圧縮、いずれの場合も、絶対値で許容応力度比 1.0 を越える応力（引張=0.6 および圧縮=0.1）は発生していない。この結果から、列車が 500km/h で走行する場合の最大正圧・最大負圧が作用した場合にも、覆工コンクリートは十分な強度を有していることが分かる。

7. 覆工構造の疲労特性に関する検討

覆工コンクリートの耐久性の観点から、高速車両のトンネル走行に伴う圧力変動によって生じる繰返し応力度を算定し、覆工コンクリートの疲労特性について考察する。検討の基本的な考え方は、コンクリート標準示方書の疲労に対する検討方法に準ずるものとす



(a) 繰返し応力が引張領域



(b) 繰返し応力が引張・圧縮領域

図-14 覆工コンクリートの応力繰返しの概念図

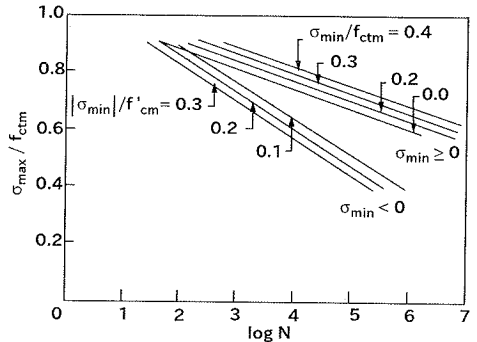


図-15 乾燥供試体の平均的な引張疲労強度²¹⁾

る。なお、今回対象とするような軸力と曲げモーメントが同時に作用するような無筋コンクリートの疲労特性を扱った既往の研究はないことから、ここでは、軸力変動による疲労破壊を試験結果から検討した既往の論文²¹⁾に提案されている疲労強度と繰返し回数の回帰式を用いて検討を行う。一般的に、引張や圧縮などの軸変動のみの疲労に対し、曲げモーメントが作用する疲労特性の方が、同じ繰返し応力でも強度が大きいと言われている。このことから、上述の検討は、安全側の検討結果を与える。

(1) 疲労に対する検討の考え方

正圧作用時 トンネル内の圧力変動が正圧の場合には、図-13(a)に示したように、覆工コンクリートの応力状態は、死荷重による圧縮状態から正圧変動により引張状態にある。したがって、繰返し応力の変動は圧縮状態から引張領域にあることになる。繰返し応力が、引張領域のみと、引張・圧縮領域になる場合は $S-N$ 線図での破壊繰返し回数 N は異なることが報告されて

いる²¹⁾。すなわち、図-14(a)(b)に示すような応力繰返しでは、それぞれ次式で破壊回数が表現できる。

$$\log N = 14.81 - 14.52 \frac{\sigma_{\max}}{f_{\text{ctm}}} + 2.79 \frac{\sigma_{\min}}{f'_{\text{ctm}}} \quad (\sigma_{\min} \geq 0) \quad (1)$$

$$\log N = 9.36 - 7.93 \frac{\sigma_{\max}}{f_{\text{ctm}}} - 2.59 \frac{|\sigma_{\min}|}{f'_{\text{ctm}}} \quad (\sigma_{\min} < 0) \quad (2)$$

ここで、 f_{ctm} は引張強度、 f'_{cm} は圧縮強度のそれぞれ平均値である。図-15はこれらの式を表現したもので、 $S-N$ 線図の平均値を示している。前述したように、正圧作用時は、繰返し応力が圧縮・引張り領域にあることから、ここでは、式(2)を用いて正圧作用時の累積損傷度を求めることにする。

負圧作用時 トンネル内の圧力変動が負圧の場合には、図-13(b)に示したように、覆工コンクリートの応力状態は、死荷重による圧縮状態から負圧変動による圧縮状態へ変動し、その変動は圧縮領域内に留まる。この場合は、コンクリート標準示方書¹⁵⁾で示している式(3)を使用して $S-N$ 線図により累積損傷度を求めるものとする。いま、コンクリートの圧縮強度を f'_{ck} で表すと、コンクリート標準示方書¹⁵⁾では次式で破壊回数を求めることができる。

$$\log N = 17 \times \frac{1 - \sigma_{\max}/f'_{\text{ck}}}{1 - \sigma_{\min}/f'_{\text{ck}}} \quad (3)$$

なお、式(2)は、図-15に示すように回数の上限は 10^6 のオーダーであり、コンクリート標準示方書¹⁵⁾でも、回数の上限値を 2.0×10^6 として式(3)で示している。すなわち、実際には応力レベルが小さいと、どこか下限値で疲労破壊しないレベルがあると考えられている。本検討では後述するように、想定する圧力変動の回数は、この上限値を超える繰返し回数になるが、応力レベルの下限値を考慮しないことが安全側と判断し、本研究では、以下の検討において、そのまま、式(2)と式(3)を用いることにする。

(2) トンネル内圧力変動と繰返し回数

高速鉄道車両がトンネル内を走行する際には、列車突入に伴う圧力波(=突入波)、列車通過による急激な圧力低下、あるいは、列車退出に伴う圧力波(=退出波)が生じる。また、トンネル内での列車すれ違いによっても、局所的に急激な圧力低下を引き起こす。これらの圧力変動の内、突入波と退出波は音速でトンネル内を伝播し、トンネル坑口において反射し、正負反転した反射波はトンネル内を逆方向に伝播する。列車の通過に起因する圧力低下は、列車速度で列車と共にトンネル内を移動し、突入波や退出波、あるいは、それらの反射波と複雑に重なり合う。

表-2 疲労の検討に用いるトンネル内の個々の圧力現象⁹⁾

(a)	列車突入時に発生する突入波	ΔP_A
(b)	列車退出時に発生する退出波	ΔP_B
(c)	トンネル坑口での反射波	ΔP_A^{\pm}
(d)	列車通過時の圧力低下	ΔP_R
(e)	すれ違い時の圧力低下	ΔP_{R2}
(f)	空気の粘性効果による圧力変動	ΔP_V

表-3 疲労の検討に用いる個々の圧力現象とその圧力変動⁹⁾
(16両編成 $l=400\text{m}$ 相当)

圧力現象	正 圧	負 圧
(a) 突入波 $\frac{\Delta P_A}{P_0}$	+0.055	-
(b) 退出波 $\frac{\Delta P_B}{P_0}$	+0.055	-
(c) 反射波 $\frac{\Delta P_A^{\pm}}{P_0}$	+0.055	-0.055
(d) 列車通過 $\frac{\Delta P_R}{P_0}$	-	-0.066
(e) すれ違い $\frac{\Delta P_{R2}}{P_0}$	-	-0.098
(f) 粘性効果 $\frac{\Delta P_V}{P_0}$	+0.019	-0.019

著者らの既往の研究⁹⁾から、トンネル内の圧力変動に関与すると考えられる圧力現象には表-2に示す(a)~(f)が挙げられ、各々の圧力変動の値は、表-3の(a)~(f)のように算定している。これらの圧力現象は、列車の走行条件によりトンネル内で重ね合わされ、その結果、トンネル内の圧力変動が決定される。また、その繰返し回数も圧力現象の重畳のパターンや回数(以下、重複度と定義する)により、各々の圧力変動とその繰返し回数を算定する必要がある。そこで、本検討では、表-2、表-3の(a)~(f)を用い、以下に示す条件に基づき、圧力現象の重複度とその圧力変動および繰返し回数を定める。

- 列車の運行本数は1時間あたり上下 $10 \times 2 = 20$ 本
- 運行間隔は上下線それぞれ6分間隔
- 運行時間は6時から22時まで16時間(320本/日)
- 列車長は16両編成400m
- トンネル内の通過は等速500km/h走行
- トンネルの供用期間は100年
- 圧力波の距離減衰は考慮せず反射は2回まで
- 検討の対象とするトンネル長は4.0km

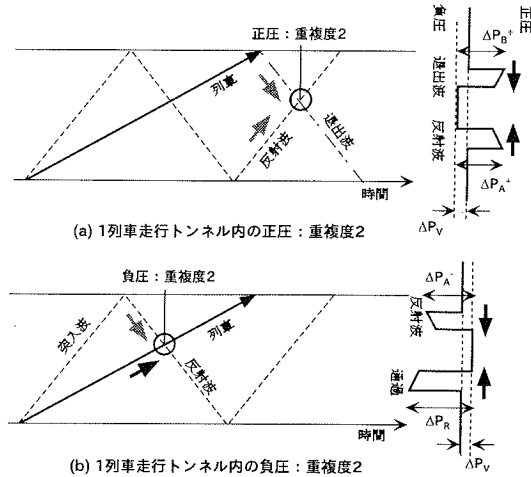


図-16 トンネル内の圧力現象の組み合わせパターン

なお、上述の条件下で、基本とする圧力現象と各々の圧力変動は、表-3の(a)~(f)に示すものである。ただし、(f)の粘性効果による圧力変動は、列車がトンネル内を走行する間、大気圧からシフトしている圧力変動であり、表-3に示した(a)~(e)の圧力変動を算定する際に含まれている量である。そのため、圧力現象を重ね合わせる際には、トンネル内を走行中の列車本数と重複度を考慮した重ね合わせが必要となる。

図-16(a)と図-16(b)は、1列車単独走行時の圧力現象の組み合わせパターンの一例を示したものであり、それぞれ、列車と圧力波のダイヤグラムの形で表している。以下、参考のため、図-16(a)と図-16(d)の組み合わせで、各々の重複度に応じたトンネル内の圧力変動(正圧・負圧)を算定してみると、以下のようになる。

重複度 2：正圧 1列車走行時のトンネル内に重複度2の正圧 ΔP_{+2} を生ずる現象の組み合わせの一例として、図-16(a)に示すパターンが挙げられる。すなわち、突入波の2回反射 ΔP_{A^+} (正圧)と退出波 ΔP_B (正圧)の重ね合わせである。ただし、いずれも列車突入・退出によって生じた大気圧からのシフト $+\Delta P_V$ を含んでいるため、片方から重複分を差し引く。よって、表-3より、次式から重複度2の正圧 ΔP_{+2} が求められる。

$$\frac{\Delta P_{+2}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^+}}{P_0} + \frac{\Delta P_B}{P_0} - \frac{\Delta P_V}{P_0} = 0.055 + 0.055 - 0.019 = +0.091 \quad (4)$$

重複度 2：負圧 1列車走行時のトンネル内に重複度2の負圧 ΔP_{-2} を生ずる現象の組み合わせとして、図-16(b)に示すパターンがあげられる。この場合、突入波の反射波 ΔP_{A^-} (負圧)と列車通過時の圧力低下 ΔP_R (負圧)の重複である。ただし、正圧の場合と同様、大

表-4 正圧の重複度と圧力変動および繰り返し回数

圧力現象	圧力変動 $\frac{\Delta P_+}{P_0}$	回数
重複度 3	+0.146	374,000
重複度 2	+0.110 +0.091	6,588,000
重複度 1	+0.055	32,424,000

表-5 負圧の重複度と圧力変動および繰り返し回数

圧力現象	圧力変動 $\frac{\Delta P_-}{P_0}$	回数
重複度 3	-0.138 -0.134	281,000
重複度 2	-0.102 -0.098 -0.091	5,840,000
重複度 1	-0.066 -0.055	22,520,000

気圧からのシフト $-\Delta P_V$ の重複分を差し引く必要がある。いま、表-3の値を用いて、次式から重複度2の負圧 ΔP_{-2} を求めることができる。

$$\frac{\Delta P_{-2}}{P_0} = \frac{\Delta P_{A^-}}{P_0} + \frac{\Delta P_R}{P_0} - \frac{\Delta P_V}{P_0} = -0.055 - 0.066 + 0.019 = -0.102 \quad (5)$$

このように、各々の圧力現象の重畳のパターンにより、トンネル内の圧力変動は異なる。いま、対象とするトンネル長を4.0kmとすると、想定し得る圧力現象の重複は、正圧・負圧、いずれも3つまでとなる。

ただし、トンネル長を3.5km程度と限定し、全く同時に自列車と対向列車がトンネルに突入する場合を想定すると、極めて低い確率で4つの圧力現象が重なり合う場合を生じる。前節で示したように、設計荷重として想定する最大負圧を考えるような場合には、重複度4に相当する極めてまれに生じる負圧($\Delta P_-/P_0=-0.188$)を考慮する必要もあるが、ここでは、その発生確率が極めて低いため、疲労強度の検討には重複度4の負圧は考えないものとする。また、正圧に関しては、列車速度と圧力波の伝播速度(=音速)の関係から、いかなるトンネル長の場合でも、どのような列車トンネル突入のタイミングを想定しても、重複度4に相当する正圧は存在しない⁹⁾。

表-6 圧力変動による覆工コンクリートの累積疲労損傷度

	重複度	$\Delta P/P_0$	n_i	断面内の位置 90 度				断面内の位置 45 度 (=135 度)			
				σ_{max}	σ_{min}	N_i	n_i/N_i	σ_{max}	σ_{min}	N_i	n_i/N_i
正圧	3	+0.146	374,000	0.15	-0.01	3.894E+09	9.6E-04	0.11	-0.19	5.856E+09	6.4E-04
	2	+0.110	6,588,000	0.09	-0.01	8.105E+09	8.1E-03	0.00	-0.19	2.140E+10	3.1E-03
	1	+0.055	32,424,000	0.05	-0.01	1.304E+10	2.5E-02	-0.07	-0.19	4.988E+10	6.5E-03
負圧	3	-0.138	281,000	-0.01	-0.20	6.785E+16	4.1E-12	-0.19	-0.50	5.087E+16	5.5E-12
	2	-0.102	5,840,000	-0.01	-0.13	7.774E+16	7.5E-11	-0.19	-0.39	6.427E+16	9.1E-11
	1	-0.066	22,520,000	-0.01	-0.09	8.488E+16	2.7E-10	-0.19	-0.32	7.506E+16	3.0E-10
累積疲労損傷度 $\Sigma \frac{n_i}{N_i}$				0.034				0.010			

σ_{max} および σ_{min} の単位は N/mm^2

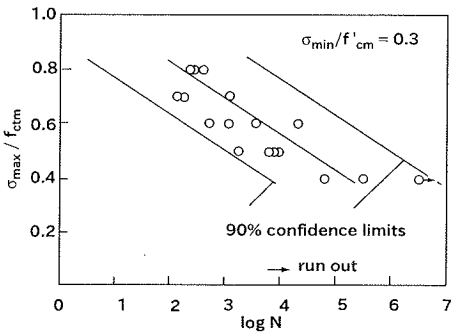


図-17 引張疲労強度の回帰式の90%信頼区間²¹⁾

表-4と表-5は、長さ4.0kmのトンネルを想定し、トンネル内に生じる全ての圧力現象の重畳パターンを想定し、その重複度1~3に応じて正圧および負圧の圧力変動と繰り返し回数を算定したものである。正圧・負圧、いずれの場合も、重畳の組み合わせパターンで、2~3種類の圧力変動を示す場合があるが、ここでは、その中の最大の圧力変動を採用した検討とする。また、詳細な計算方法の説明は省略するが、繰り返し回数は、列車の運行計画（運行ダイヤグラム）に従い、自列車と対向列車のトンネル突入時間をずらしながら、トンネル内で生じる圧力変動の繰り返し回数を、各々の重複度に応じてカウントしたものである。なお、繰り返し回数は、千の位で切り上げとしている。

(3) 圧力変動による累積損傷度の検討

トンネル内の圧力変動による覆工コンクリートの累積損傷度の検討を行う。トンネル内の同一断面でも位置によっては最大発生応力度が異なる。ここでは、累

積損傷度が大きくなると想定される、最大引張応力度を示すトンネル断面位置90度内空側と、死荷重による応力からの変動が最大となる45度あるいは135度内空側を対象とした。また、検討にあたり覆工コンクリートのヤング係数 E_c や圧縮強度 f'_{ck} は、コンクリート標準示方書¹⁵⁾の基準値を用い、引張強度 f_{tk} に対しても、コンクリート標準示方書¹⁵⁾から、 $0.23f'_{ck}{}^{2/3}$ を用いた。

表-6にトンネル内の圧力変動に対する覆工コンクリートの累積損傷度の検討結果を示す。表-6中の n_i は、前節(2)で算定した圧力変動 $\Delta P/P_0$ が作用する繰返し回数であり、このとき覆工コンクリート内空側の応力度は自重による応力度 $-0.01N/mm^2$ から正圧では σ_{max} に変動する。また、負圧では σ_{min} に変動する。このときの破壊回数が前節(1)の式(2)と式(3)で計算される N_i である。マイナー則に従い、これらの比を加算したものが累積損傷度 $\Sigma n_i/N_i$ である。

表-6に示した結果より、累積損傷度はトンネル断面の90度位置で0.034、45度(=135度)位置で0.010となった。90度位置での累積損傷度が一番大きくなったが、1.0に比べてはるかに小さく、耐久性の観点から言えば、設計上問題がないことがわかる。ここでは、設計段階のコンクリート物性値に基づき、疲労による累積損傷度を検討したが、 $S-N$ 線図については繰返しの応力レベルが小さい場合には、疲労破壊を生じない下限値をもつことが考えられるので、ここでの検討結果は、安全側の検討結果となっている。一方、累積損傷度をもとめる $S-N$ 線図は、コンクリートの場合、いくつかの問題点がある。1つはばらつきの幅が大きいことでもある。既往文献²¹⁾から、式(2)の90%信頼区間は、図-17のようになり、実験での破壊回数のばらつき

による影響から、想定する応力レベルで、破壊回数にして約 10 倍あるいは約 1/10 程度まで増減する可能性がある。図-17の 90%信頼区間を前提に、 $S-N$ 線図において最も破壊回数が小さい状況、すなわち、 $S-N$ 線図において、破壊回数として図示した 90%信頼区間の下限値を想定すると、式(2)で与えられる破壊回数は、表-6に示す値 N_i の 1/10 まで下がってくる。したがって、90%信頼区間を前提に考えた場合、最大累積損傷度は 0.034 から 0.34 まで増加するが、現状の設計断面であれば、列車の高速走行に伴う圧力変動に対し、十分な疲労強度を有していると判断できるものと考えられる。なお、覆工コンクリートの疲労強度の検討をより正確に行うためには、今後の研究課題として、実際の覆工コンクリートと同様な載荷条件・応力状態を再現できる無筋コンクリートの疲労試験を行い、破壊回数に関わる適切な評価に基づいた $S-N$ 線図を作成する必要があるものと考えている。

8. 結 論

本研究では、時速 500km/h を越える超高速鉄道トンネルの覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、構造設計に必要な不可欠な覆工応力解析モデルの構築、ならびに、トンネル内での列車高速走行に伴う圧力変動に対する覆工構造の挙動について検討し、覆工コンクリートの強度特性と疲労特性の評価を行った。

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下のようになる。

(1) 山梨リニア実験線のトンネルにおいて、トンネル内の圧力変動測定と覆工コンクリートの動ひずみ測定を実施し、その特性について考察を行った。その結果、トンネル内の圧力変動が大気圧 P_0 に対し正圧 $P_0 + \Delta P$ (圧縮) の場合、覆工コンクリートに引張ひずみ (引張応力の状態) を生じさせ、大気圧 P_0 に対し負圧 $P_0 - \Delta P$ (膨張) の場合、覆工コンクリートに圧縮ひずみ (圧縮応力の状態) を生じさせる。また、突入波 (500km/h) 作用時には最大引張ひずみ+2.5 μ 程度、1 列車単独通過時 (500km/h) には、最大圧縮ひずみ-3.3 μ 程度、2 列車すれ違い時 (900=500+400km/h) では、最大圧縮ひずみ-5.5 μ 程度であった。

(2) 覆工構造の設計・照査に用いる応力解析モデルを構築し、測定結果との比較から妥当性の検証を行った。その結果、本研究で検討した応力解析モデルによる覆工コンクリートのひずみの解析結果は、山梨リニア実験線のトンネルにおける覆工コンクリートのひずみ測定結果と良く一致しており、再現性に優れ、実用上、十分な精度を有していることを確認した。

(3) トンネル覆工構造の営業線対応の設計荷重として、新幹線と同程度の長大編成車両 (列車長約 400m) で、2 列車最大相対速度 1000(=500+500)km/h の場合を想定した最大圧力変動 (最大正圧・最大負圧) を覆工コンクリートに作用させた場合の発生応力度について検討した。その結果、引張・圧縮、いずれの場合も、許容応力度を越える応力 (引張: $\sigma/\sigma_{ca} = 0.6$ および圧縮: $\sigma'/\sigma'_{ca} = 0.1$) は発生することはない、覆工コンクリートは十分な強度特性を有していることが判明した。

(4) 高速車両のトンネル走行に伴う圧力変動による覆工コンクリートへの繰返し応力を算定し、覆工コンクリートの耐久性の観点から疲労特性について考察した。その結果、繰返し作用する圧力変動に対する覆工コンクリートの累積損傷度は、最大でも 0.034 であり、1.0 に比べてはるかに小さく、疲労特性の観点から言えば、設計上問題がないことを確認した。

以上、山梨リニア実験線のトンネルを対象に、トンネル内での列車高速走行に伴う圧力変動に対する覆工構造の挙動の把握について検討し、現状の設計断面であれば、構造上、十分な強度特性と疲労特性を有していることを確認した。今後の研究課題として、実際の覆工コンクリートと同様な載荷条件・応力状態を再現できる無筋コンクリート模型を用いた疲労試験を行い、軸力と曲げモーメントが同時に交番載荷する状況での疲労強度の評価や破壊回数に関わる適切な評価規準に基づいた $S-N$ 線図の作成など、超高速鉄道を対象とした合理的なトンネル覆工構造の設計法の確立に努めたいと考えている。また、維持補修の観点から、初期状態として乾燥収縮などの影響で既に覆工コンクリートのひび割れが生じている状態を想定し、列車走行による圧力変動の繰返しにより、ひび割れがどのように進展するかなどの影響も考慮した検討が必要となる。これらの点についても、山梨リニア実験線での実測や初期ひび割れを想定した疲労試験などを通じて、さらなる検討を行いたいと考えている。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、(株)大崎総合研究所 鈴木 誠 研究部長、おなじく、(株)大崎総合研究所 新美勝之 主任研究員、野澤剛二郎 主任研究員、成蹊大学工学部 小川隆申 助教授、ならびに、(財)鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 前田達夫 研究部長には貴重なお意見を賜っている。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原 朝茂：列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題、鉄道技術研究報告、No.153、鉄道技術研究所、1960年。

- 2) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技術研究報告，No.871（共通編第89号），鉄道技術研究所，1973年10月。
- 3) 山本彬也：列車とトンネルの空気力学，鉄道技術研究報告，No.1230（共通編第159号），鉄道技術研究所，1983年3月。
- 4) Ogawa, T. and Fujii, K. : Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, *Computers and Fluids*, Vol.26, No.6, pp.565-585, 1997.
- 5) Ogawa, T. and Fujii, K. : Numerical Simulation of Compressible Flows Induced by a Train Moving in a Tunnel, *Comput. Fluid Dyn. J., AIAA-93-2951*, pp.63-82, 1994.
- 6) 小川隆申，藤井孝蔵：高速で走行する列車のトンネル突入によって生じる圧縮波の数値シミュレーション，日本機械学会流体工学部門講演会論文集 No.930-49，日本機械学会，1993年。
- 7) 小川隆申：数値流体解析における格子作成法（その1），計算工学，Vol.6, No.2，日本計算工学会，pp.23-27，2001年4月。
- 8) 小川隆申：数値流体解析における格子作成法（その2），計算工学，Vol.6, No.3，日本計算工学会，pp.30-34，2001年7月。
- 9) 山崎幹男，若原敏裕，永長隆昭，上野眞，藤野陽三：超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.171-189，土木学会，2003年7月。
- 10) 山崎幹男，佐々木幹夫，植田記久男，佐藤 勉：山梨リニア実験線におけるトンネルの計画・設計について，土木学会第47回年次学術講演会概要集，第3部，土木学会，1992年9月。
- 11) 渡瀬 久，山崎幹男，梶川 徹，前田達夫，梶山博司，上野 眞：高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工の挙動把握-トンネル内圧力変動解析-，土木学会第55回年次学術講演会概要集，第3部(B)，土木学会，2000年9月。
- 12) 梶川 徹，山崎幹男，渡瀬 久，宮本雅章：高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工の挙動把握-覆工の安全性評価-，土木学会第55回年次学術講演会概要集，第3部(B)，土木学会，2000年9月。
- 13) 加藤 寛，山崎幹男，梶川 徹，山本敦仁，若原敏裕，新美勝之，野澤剛二郎：高速鉄道トンネル内に発生する退出波と反射波の三次元CFD解析，土木学会第55回年次学術講演会概要集，第3部(B)，土木学会，2001年10月。
- 14) 朝倉俊弘，小島芳之，安東豊弘，佐藤 豊，松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.439/III-27，pp.79-88，1994。
- 15) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp.24-25，2002。
- 16) 小島芳之，岡野法之，野城一栄，斎藤 貴，村田一郎，近藤政弘：トンネル覆工を想定した無筋コンクリートの疲労試験，鉄道総研報告，Vol.15, No.8，pp.41-46，2001。
- 17) Hubert, K., Hilsdorf, K. and Kesler, C.E. : Fatigue strength of concrete under varying flexural stresses, *Journal of ACI*, Title no. 63-50, pp.1059-1076, 1966.
- 18) Tepfers, R. : Tensile fatigue strength of plain concrete, *Journal of ACI*, Title no. 76-39, pp.919-933, 1979.
- 19) 徳光善治，松下博通，牧角龍憲：繰り返し応力によるコンクリートの圧縮疲労試験方法（案），コンクリート工学，Vol. 23, No. 3，pp.33-39，1985。
- 20) 三橋博三：コンクリートの強度特性が破壊力学パラメータに及ぼす影響，コンクリート工学論文集，第6巻第1号，pp.81-88，1995。
- 21) Cornelissen, H.A.W. and Reinhardt, H.W. : Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No. 129, pp.216-226, 1984.
- 22) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]，pp.91-101，1996。

(2003.1.14 受付)

DESIGN OF A TUNNEL LINING VERSUS PRESSURE FLUCTUATION IN HIGH-SPEED TRAIN TUNNEL

Mikio YAMAZAKI, Satoru KATO, Toshihiro WAKAHARA,
Masato OKAZAKI, Makoto UENO and Yozo FUJINO

The behavior of tunnel lining versus the pressure fluctuations in the tunnel induced by a high speed train at over 500km/h was investigated in this study to realize the rational tunnel lining structure. Full-scaled measurements of the tunnel pressure and the concrete strain were conducted, in the Yamanashi Maglev Test Line, to comprehend the strength on the tunnel lining structure under the pressure fluctuations. Firstly, FEM based numerical model for the stress of tunnel lining were developed considering the drain material around the outer concrete lining and its validity was confirmed in comparison with the data obtained from the full-scaled measurements. Secondly, the stress versus the maximum set of pressure fluctuation, which was estimated as the design load of tunnel lining structure, was examined. Furthermore, the accumulated fatigue damage of the lining concrete over lifetime was evaluated based on the number of the pressure loading cycle derived from the maglev train operation plan.