

論文 トンネル用吹付け軽量モルタル耐火被覆材の動風圧に対するはく落防止設計法に関する研究

菊地 弘悦^{*1}・谷辺 徹^{*2}・清宮 理^{*3}

要旨: 本研究では、トンネル内で発生する動風圧に対する耐火被覆材のアンカーピンによるはく落防止設計法の構築および、仕様条件の影響を検討している。はく落防止設計法は、材料の疲労限度を実験的に検討し、はく落防止性能を評価する方法を構築した。また、本設計法の妥当性を 200 万回の疲労試験により確認した。仕様条件の影響は、はく落防止用メッシュを固定するアンカーピン 1 本当たりの負担面積および耐火被覆材の被覆厚さによる影響を検討し、負担面積は $0.43\text{m}^2/\text{本}$ 、被覆厚さは 40mm まで増加させてもその影響は疲労限度以下であり、はく落に対して問題がないことを明らかにしている。

キーワード: 動風圧, 耐火被覆材, はく落防止設計法, アンカーピン, 疲労限度, ひずみ

1. はじめに

コンクリート製トンネルが火災を受け、甚大な被害につながる事例がこれまでも多く報告されており¹⁾、トンネル覆工に対して耐火対策を講じる必要性が高まっている。

トンネル構造物の耐火対策として、耐火被覆材を用いて躯体コンクリートの温度上昇を抑制する方法がある。このような耐火被覆材には耐火性能の他に、長期間にわたってはく落しない耐久性も要求されるが、トンネル内を列車や車両が通行した際には動風圧が発生し、耐火被覆材のはく落に影響を及ぼすことが懸念される。このような動風圧の発生回数について、臨港道路トンネルの設計仕様およびその内装材の耐用年数を参考に計算すれば、供用中に約 6000 万回発生すると予測される(参考とした臨港トンネル設計仕様例は、設計交通量が 15,200 台/日、大型車混入率が 35%、内装材の耐用年数は 30 年)。動風圧に対するはく落防止性能を検討する上で、何千万回もの疲労試験を実施して評価を行うのは時間的制約上困難であると考えられる。

上述の背景を鑑み、著者らはこれまでトンネルの耐火対策として適用されている吹付け軽量モルタル耐火被覆材(耐火被覆材)の動風圧に対するはく落防止性能を検討してきた^{2),3),4)}。本研究では、材料の疲労限度という考え方を適用し、耐火被覆材の動風圧に対するはく落防止設計法の構築および、耐火被覆材の仕様条件の影響について検討することを目的としている。そのため、はく落防止設計法の手順を定め、その妥当性検証を目的とした 200 万サイクル動風圧疲労試験を実施している。また、耐火被覆材の仕様条件による影響を検討するため、耐火

被覆材を施工する際に覆工面に設置する、はく落防止用メッシュを固定するアンカーピンの負担面積および、耐火被覆材の被覆厚さを変更し、動風圧による影響を検討している。

2. 吹付け軽量モルタル耐火被覆材工法の概要

2.1 耐火被覆材の施工方法

耐火被覆材は、図-1 のフロー図に示すように、アンカーピンによりはく落防止用メッシュを覆工面に設置した後に湿式吹付け工法により施工される。なお、耐火被覆材の被覆厚さは、覆工の耐火設計により決定される。

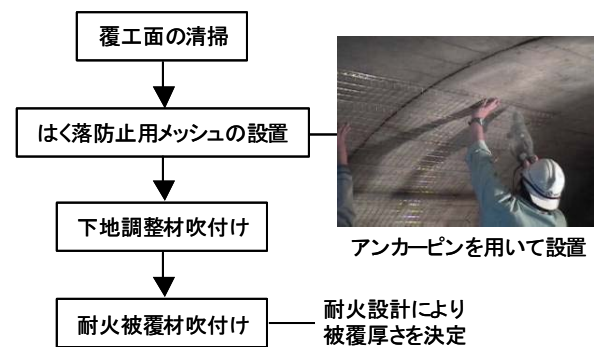


図-1 耐火被覆材の施工工程

2.2 使用材料

(1) 耐火被覆材

耐火被覆材としては、結合材にセメントを、骨材に発泡パーミキュライトを使用したプレミックスタイプの軽量モルタルを使用する。表-1 には、耐火被覆材の性質を示す。

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火被覆材料グループ 修士(工学) (正会員)

*2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火被覆材料グループ グループリーダー

*3 早稲田大学創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博(正会員)

(2) 下地調整材

下地調整材としては、SBR系プライマー、耐火被覆材および水を所定の配合で練混ぜたものを使用する。

(3) はく落防止用メッシュ

はく落防止用メッシュとしては、形状が格子状（格子間隔：50mm、線径：1.6mm）で、その材質をステンレス製としたものを使用する。写真-1には、はく落防止用メッシュの外観を示す。

(4) アンカーピン

はく落防止用メッシュを覆工面に固定するアンカーピンとしては、心棒打込み式のステンレス製アンカーピン（φ4mm）を使用する。表-2には、アンカーピンの引抜きおよび引張荷重を示す。

表-1 耐火被覆材の性質

単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強さ (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
700~800	2.3	1.2	2200

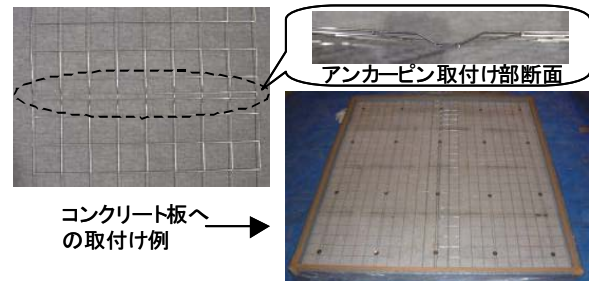


写真-1 はく落防止用メッシュの外観

3. はく落防止設計法の構築

3.1 動風圧による想定被災現象の整理

耐火被覆材と覆工面の付着が得られない場合には動風圧によって、ボード系耐火被覆材と同様に表裏に圧力差が発生し、図-2に示すような挙動が生じると考えられる。そのため、本研究では、図-3のフロー図に示すように、動風圧により、耐火被覆材に対する曲げ応力および、耐火被覆材に内在させたはく落防止用メッシュを介して生じるアンカーピンへの引抜き荷重が作用するものと想定した。これらが繰り返し作用した場合、耐火被覆材の曲げ応力によるひび割れやアンカーピンの引抜きなどが発生し、その結果、耐火被覆材の部分的なはく落または、欠け落ちなどが発生することを想定被災現象とした。なお、耐火被覆材と覆工面との界面において、付着がまったく得られなかった場合に動風圧の影響が最も大きくなると考えられる。従って、本研究において、動風圧負荷の影響を確認する際には、耐火被覆材と下地間の付着が完全に無い状態で検討を行う。

表-2 アンカーピンの引抜きおよび引張荷重

引抜き荷重 (N)	引張荷重 (N)
2880	6000

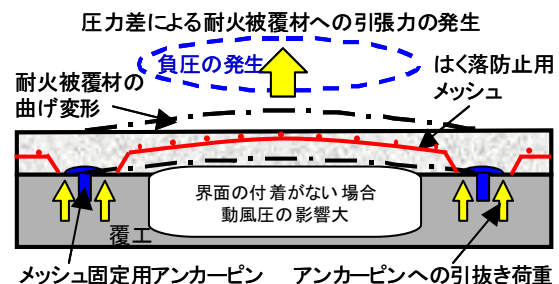


図-2 動風圧による耐火被覆材の変形模式図

3.2 はく落防止設計の考え方

動風圧は大型車両や列車が通行する度に発生する疲労負荷と捉えることができる。そこで、本研究では耐火被覆材およびアンカーピンに生じる負荷が疲労破壊しない領域（疲労限度以下）を要求性能として評価を行う。

3.3 はく落防止設計法の概要

本研究で提案するはく落防止設計の手順を述べる。

(1) 設計条件の設定

設計条件としては、①動風圧負荷、②耐火被覆材およびアンカーピンの疲労限度について設定する。なお、これらの設計条件は安全率を考慮して設定する。

(2) 動風圧負荷による影響の把握（動風圧試験）

実施工条件を模擬した試験体を作製し、動風圧負荷を与え、耐火被覆材および、はく落防止用メッシュを固定するアンカーピンに発生する影響を把握する。

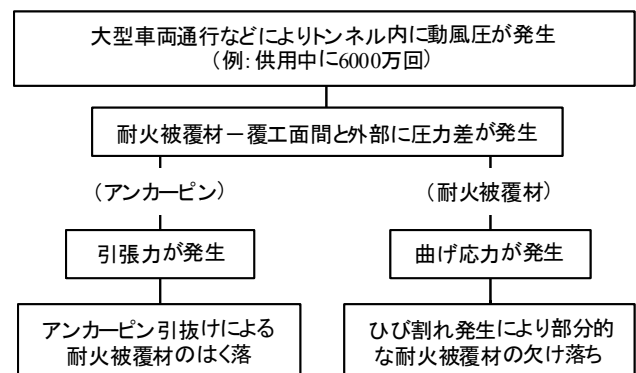


図-3 動風圧による想定被災現象

(3) はく落防止性能評価

動風圧負荷によって発生する影響が、設定した耐火被覆材およびアンカーピンの疲労限度以下であれば、耐火被覆材は動風圧によってはく落せず、優れたはく落防止性能を有すると判断する。

3.4 動風圧負荷の設定

本研究では、動風圧負荷は -10kPa と設定した。これは、ドイツの規格であるZTV-TUNNEL 1において、トンネル内の圧力変動の基準とされている $\pm 0.8\text{kPa}$ に対して10倍以上である。さらに、緒方らの報告⁵⁾によれば、トンネル内を新幹線が通過する際、トンネル出口付近で計測された最大圧力は 1.8kPa である。本研究での動風圧負荷は、このような圧力変動に対しても5倍以上である。

3.5 疲労限度ひずみの設定

動風圧負荷を試験体に与えた場合、耐火被覆材およびアンカーピンに加わる荷重を直接測定することは困難と考えられる。そこで、耐火被覆材およびアンカーピンに発生するひずみを測定することで、動風圧負荷による試験体への影響を検討する。そのため、疲労限度応力または荷重を設定し、さらにそれらが発生した際のひずみを、疲労限度相当ひずみとして評価に用いた。一般的にコンクリートの疲労破壊強度は、静的破壊強度の約 $1/2$ とされているが、これは、200万回程度の繰返しによる検証結果である⁶⁾。しかしながら、動風圧発生回数は1000万回を超えることが予測されるため、安全性の高いはく落防止設計とするには、さらに安全率を考慮することが推奨される。1000万回を超える繰返し数の範囲では、コンクリートの疲労限度は明らかにされていないが、本研究では許容応力度設計法においても一般的に用いられる3倍の安全率をさらに考慮し、疲労限度係数は $1/2 \times 1/3 = 1/6$ とした。疲労限度係数 $1/6$ は、例えば、鋼・コンクリート合成桁に使用されるスタッドジベルの疲労係数と同様である。

(1) 耐火被覆材の疲労限度応力相当ひずみの設定

耐火被覆材の疲労限度応力相当ひずみ (ϵ_{brd}) は、表-1に示した耐火被覆材の曲げ強さの $1/6$ を曲げ疲労限度応力 ($0.2\text{N}/\text{mm}^2$) とし、フックの法則より、曲げ疲労限度応力を弾性係数で除した値である 90μ とした。

(2) アンカーピンの疲労限度荷重相当ひずみの設定

アンカーピンの疲労限度荷重相当ひずみ (ϵ_{prd}) は、表-2に示したアンカーピンの引抜き荷重の $1/6$ を引抜き疲労限度荷重 (480N) とし、さらに、図-4に示す荷重-ひずみ関係 ($n=5$) から 300μ と設定した。

3.6 はく落防止性能評価方法

図-5に、本研究で設定した設計条件をもとにしたはく落防止性能評価の手順を示す。手順としては、実施工方法を模擬した試験体に対して -10kPa の動風圧負荷を加える。その際、耐火被覆材およびアンカーピンのひずみを測定し、そのひずみが耐火被覆材は 90μ 、アンカーピンは 300μ 以下であるか確認する。それぞれのひずみが疲労限度相当ひずみ以下であれば、耐火被覆材は動風圧によってはく落しないと判断する。

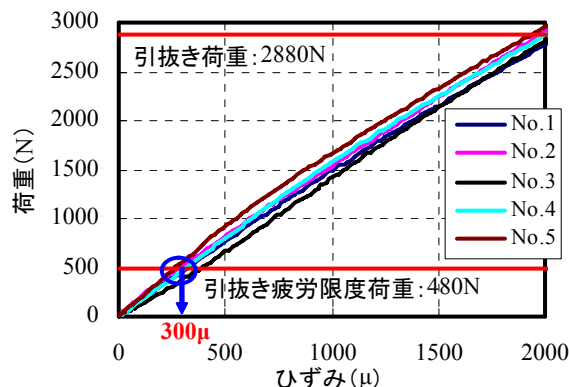


図-4 アンカーピンの荷重-ひずみ関係

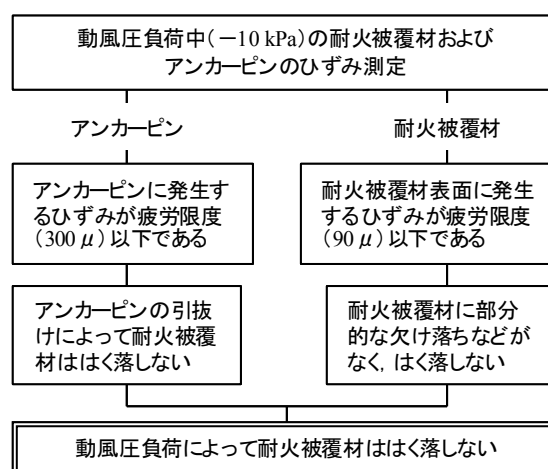


図-5 はく落防止性能評価の手順

4. 動風圧試験によるはく落防止設計法の検証

4.1 試験項目

(1) はく落防止設計法の妥当性検証

本研究で提案した、疲労限度を適用したはく落防止設計法の妥当性を検証するため、動風圧負荷を -10kPa として200万サイクルの動風圧疲労試験を実施した。また、動風圧負荷が増大した場合の影響を把握するため、疲労試験実施前に圧力を $0 \sim 20\text{kPa}$ まで変化させてひずみを測定した。

(2) 仕様条件の影響把握

a) アンカー負担面積の影響

アンカー負担面積の影響を検討するため、はく落防止用メッシュを固定するアンカーピッチを $426 \times 300 \sim 1000\text{mm}$ (アンカー負担面積: $0.13 \sim 0.43\text{m}^2/\text{本}$)まで変化させて動風圧試験を実施した。

b) 被覆厚さ増大の影響

耐火被覆材の被覆厚さの影響を検討するため、被覆厚さを 30 および 40mm としたものの動風圧試験を実施した。

4.2 供試体

基材コンクリートに対して、はく落防止用メッシュをアンカーピンにて取付け、その後、耐火被覆材を吹付けた。なお、耐火被覆材と基材コンクリート間が付着しないようにするため、界面にはビニールシートを設置した。耐火被覆材の養生（気中 28d）終了後、アクリルケースを設置して内部を密閉空間とし、供試体とした。図-6には、供試体の概要を示す。

4.3 動風圧負荷

動風圧負荷は、目標圧力を -10kPa として、真空ポンプを用いてアクリルケース内の空気を吸引することで発生させた。動風圧サイクルとしては、疲労試験時は10s/サイクル、ひずみ測定時は20s/サイクルとした。

4.4 ひずみ測定箇所

ひずみ測定箇所は、図-6の左図に示すように、4本のアンカーピン（SW、SE、NW、NE）および、耐火被覆材中央の長短辺方向（C-横、C-縦）、南側長辺方向（S-横）、西側短辺方向（W-縦）の4箇所とした。なお、図-2に示した通り、アンカーピンへの引張力の発生については、耐火被覆材の変形に起因することから、アンカーピン負担面積が大きく影響を及ぼすと考えられる。本試験での試験体条件では、アンカー負担面積が、実施工条件の1/4となるため、アンカーピンに発生するひずみは測定値を4倍して評価に用いた。

4.5 試験水準

動風圧試験の水準と対応する試験項目を表-3に示す。

4.6 試験結果および考察

(1) はく落防止設計法の妥当性検証

図-7および8には、200万サイクル動風圧疲労試験における動風圧負荷中のひずみと動風圧サイクル数の関係を示す。動風圧負荷中に測定されるひずみは、耐火被覆材およびアンカーピンともに動風圧サイクル数の増加ならびに測定箇所にかかわらず、ほぼ一定の値となる傾向を示す。また、いずれの動風圧サイクル数においても、動風圧負荷中のひずみは、耐火被覆材およびアンカーピンの疲労限度ひずみ以下である。これは、動風圧負荷によって耐火被覆材およびアンカーピンに発生するひずみが疲労限度に対しても十分に小さいことから、200万回の繰り返し疲労試験を実施しても変形による影響が小さく、疲労劣化しなかったためと考えられる。このことから、想定される動風圧発生回数を試験体に与えな

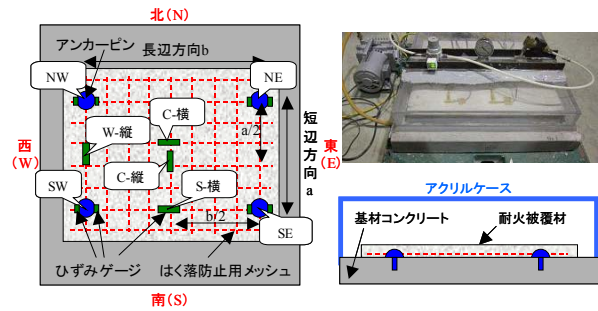


図-6 供試体概要

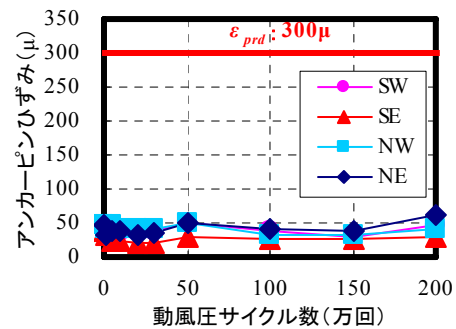


図-7 アンカーピンひずみと動風圧サイクル数の関係

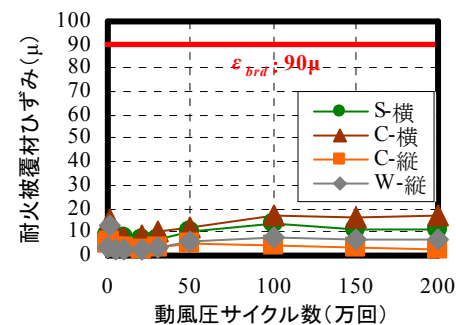


図-8 耐火被覆材ひずみと動風圧サイクル数の関係

くとも、初期の試験体ひずみからはく落防止性能が評価できると考えられる。これは、本研究で提案したはく落防止設計法の妥当性が裏付けられたと捉えることができる。

また、図-9には、耐火被覆材およびアンカーピンの圧力とひずみの関係を示す。なお、グラフには最もひずみが大きく測定されたC-横（耐火被覆材）およびNW（アンカーピン）の結果を示している。耐火被覆材およびアンカーピンひずみは、圧力と高い相関性があり、そ

表-3 動風圧試験の水準

水準No.	アンカーピッチ (mm)	アンカー負担面積 ($\text{m}^2/\text{本}$)	被覆厚さ (mm)	疲労試験	試験項目
1	426×300	0.13	30	200万サイクル	(1) (2)
2	426×600	0.26			(2) a)
3	426×1000	0.43	40	なし	(2) a)
4	426×300	0.13			(2) b)

の関係は図中の式によって表される。また、本研究で設定した動風圧負荷 -10kPa の2倍である -20kPa としても、発生するひずみは、それぞれ耐火被覆材 16μ 、アンカーピン 80μ と疲労限度相当ひずみと比較して十分に小さいことが認められる。

(2) 仕様条件の影響

a) アンカー負担面積の影響

本試験については、同一条件で作製した2体の供試体の試験結果を示す。図-10には、耐火被覆材ひずみとアンカー負担面積の関係を示す。耐火被覆材ひずみは、全ての箇所においてアンカー負担面積が $0.26\text{m}^2/\text{本}$ までは増加する傾向にあるが、 $0.43\text{m}^2/\text{本}$ では若干減少する傾向にある。一方、図-11に示すように、一部のものを除いて、アンカー負担面積の増加に伴ってアンカーピンひずみは増大する傾向を示す。これらのひずみ挙動は、供試体に発生する応力を耐火被覆材とアンカーピンが分担して負担していることに起因するものと推察される。本試験の範囲では、動風圧負荷による耐火被覆材のひずみはアンカー負担面積が増加してもある程度で増大しなくなる一方、アンカーピンが負担する応力が増大すると考えられる。しかしながら、本研究で検討したアンカー負担面積の範囲では、全ての測定箇所において耐火被覆材およびアンカーピンひずみともに、疲労限度ひずみ以下であり、はく落に対して問題ないと考えられる。

b) 被覆厚さ増大の影響

図-12には、耐火被覆材ひずみと被覆厚さの関係を示す。被覆厚さにかかわらず、耐火被覆材ひずみはいずれの箇所においてもほぼ同等の値を示す傾向にある。一方、図-13に示すように、被覆厚さ 40mm とした場合、すべての箇所において被覆厚さ 30mm としたものに比べてアンカーピンひずみは小さくなる傾向にある。これは耐火被覆材に内在しているはく落防止用メッシュの位置が影響しているものと考えられる。はく落防止用メッシュは、その被覆厚さにかかわらず、コンクリート基材面より同じ高さに位置するように取付けられている。動風圧試験では、コンクリート基材面側から耐火被覆材が押し上げられるように変形するため、被覆厚さが大きいものの方が、動風圧負荷によって変形した際、はく落防止用メッシュがより圧縮側に位置することになる。そのため、被覆厚さが大きいものの方が、はく落防止用メッシュの変形量が小さくなり、メッシュを介して応力が伝達するアンカーピンへの負荷が減少したものと考えられる。また、耐火被覆材およびアンカーピンのひずみともに、その被覆厚さにかかわらず、疲労限度ひずみに対して十分に小さい値である。従って、本研究で検討した耐火被覆材の被覆厚さ 40mm までは、はく落に対してほとんど影響を与えないと考えられる。

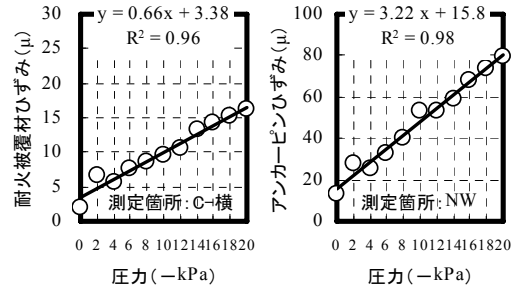


図-9 耐火被覆材およびアンカーピンの圧力とひずみの関係

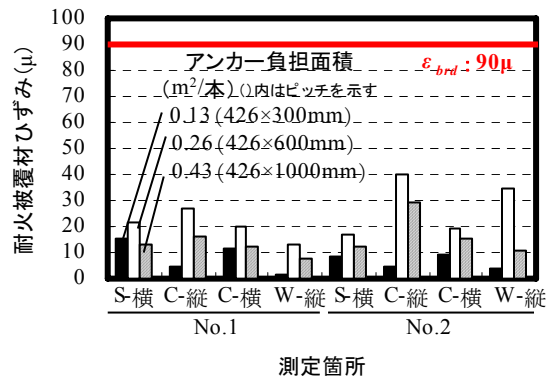


図-10 耐火被覆材ひずみと負担面積の関係

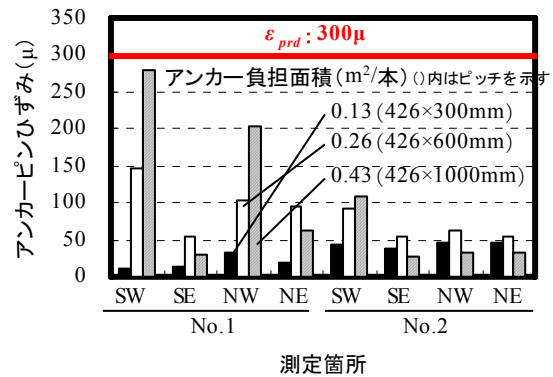


図-11 アンカーピンひずみと負担面積の関係

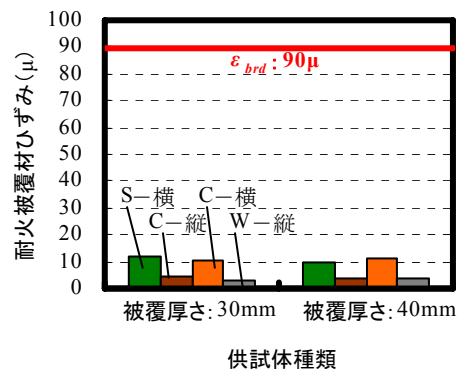


図-12 耐火被覆材ひずみと被覆厚さの関係

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 200万サイクルの動風圧疲労試験において、疲労試験前と200万サイクル後のひずみにほぼ変化がないことから、本研究で提案した耐火被覆材のはく落防止設計法の妥当性が裏付けられ、本設計法を用いれば、動風圧に対して十分安全性のあるはく落防止設計を行うことができると考えられる。
- (2) 耐火被覆材のはく落防止用メッシュを取付けるアンカーピッチを変更し、アンカー負担面積を増加させた場合、耐火被覆材およびアンカーピンのひずみともに増大する傾向にあるが、アンカー負担面積 0.43m^2 /本まではいずれの箇所においても本研究で設定した疲労限度ひずみ以下であり、はく落に対して問題ないと考えられる。
- (3) 耐火被覆材の被覆厚さを40mmとしても、耐火被覆材およびアンカーピンのひずみは設定した疲労限度ひずみに対して十分に小さい値であり、はく落に対してほとんど影響を与えない。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.17-65，2002.6
- 2) 谷辺 徹，竹下永造：吹付けモルタル耐火被覆材のはく落防止性能に関する実験的研究，土木学会第63回年次学術講演会，pp.557-558，2008.9
- 3) 谷辺 徹，菊地弘悦，清宮 理：吹付けモルタル耐火被覆材のはく落防止性能の評価に関する検討，土木学会第64回年次学術講演会，pp.787-788，2009.9
- 4) 菊地弘悦，谷辺 徹，清宮 理：吹付けモルタル耐火被覆材の動風圧試験によるはく落防止性能の評価，土木学会第64回年次学術講演会，pp.789-790，2009.9
- 5) 緒方正剛，高橋亮一，関 四郎，原 忠彦：新幹線トンネル出口騒音低減の研究，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.275-278，2003.10
- 6) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート技術の要点08，日本コンクリート工学協会，p.63，2008.9

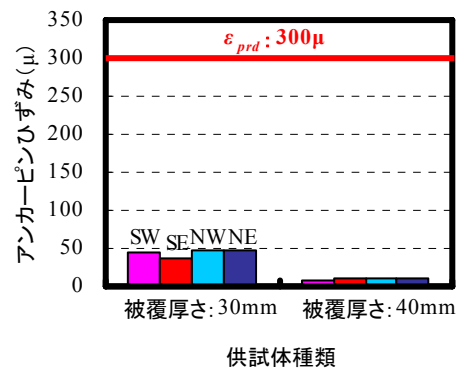


図-13 アンカーピンひずみと被覆厚さの関係