(別紙2)

### 建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 荷重と環境作用を考慮した鋼橋の新しいライフサイクル耐久性評価 システムの開発

### 2. 研究期間 平成 24 年度~平成 26 年度

<sup>3.</sup> 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	伊藤義人	名古屋大学・教授
研究代表者	伊藤義人	名古屋大学・教授
共同研究者	北根安雄	名古屋大学・准教授
共同研究者	廣畑幹人	名古屋大学・助教

4. 補助金交付総額 22,700,000 円

鋼橋は常に死活荷重を受けると共に各種環境作用によって劣化していくため、その長期耐 久性を評価するには、荷重と環境作用の両方を考慮したシステムが不可欠である。しかし、 これまでの評価手法では荷重と環境作用は個別に取り扱われてきたため、両者の連成による 影響については未解明である。本研究では、荷重作用下で環境劣化因子の効果を与える新し い環境促進実験手法を構築し、鋼橋の耐久性を左右する各種防食システムの長期劣化特性を 解明する。また、東北地方太平洋沖地震でも報告された免震ゴム支承の原因不明のクラック についても、ひずみと各種環境劣化因子(オゾン、温度)を促進負荷させる実験によりその 発生原因を究明する。得られた結果から、荷重と環境作用を考慮した鋼橋の革新的なライフ サイクル耐久性評価システムを提案する。これにより、鋼橋のライフサイクルアナリシスを より合理的に行えるようにし、維持管理戦略に活用することを目指す。

6. 研究・技術開発の内容と成果

### (1) 荷重作用下での各種防食システムの長期劣化特性の解明

### a. はじめに

鋼橋は常に死活荷重の影響を受けるとともに腐食を促進させる各種環境劣化因子(日射、 酸性雨、風、塩分飛来など)によって劣化していく。したがって、その長期耐久性を評価す るには、部材に作用する荷重と環境劣化因子の双方を考慮したシステムが不可欠であるとい える。しかし、国内外問わず、未だに荷重と環境劣化因子を同時に考慮した耐久性評価手法 は確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、荷重作用下で環境劣化因子の効果を付与する新しい環境促進実験手法 を構築し、荷重作用下における防食塗装の基礎的な劣化特性を明らかにした。材料強度試験 機と環境促進槽を組み合わせた実応力作用環境促進実験装置を用いて、防食塗装を施した鋼 板供試体に、一定ならびに繰り返し荷重を作用させた状態で塩水噴霧複合サイクル環境促進 実験を実施した。応力と腐食因子の作用による防食塗装の劣化挙動を継時的に観察し、その 劣化メカニズムを明らかにした。また、得られたデータから塗装の劣化曲線を作成し、荷重 作用を考慮した場合の塗装系の劣化予測を行った。

<sup>5.</sup> 研究・技術開発の目的

### b. 一定荷重作用下における塗装鋼板の環境促進実験

### b.-1 概要

これまでに供試体に荷重を作用させた状態で環境促進実験が実施された事例はなく、実験 方法についても構築されていない。本研究では、手動で荷重を作用させることができる伸長 治具を製作し、防食を施した鋼板供試体を治具に装着した状態で環境促進実験を行い、防食 の劣化特性の把握を行った。

# b.-2 実験装置および実験供試体

# 【実験装置】

本実験では、写真-1.1、写真-1.2 および図-1.1 に示す大型複合サイクル試験機(スガ試験 機社製 CYP-200)を用いた。この大型複合サイクル試験機は塩水噴霧条件、温湿度条件、 乾燥条件などを任意の順序と組み合わせによって、自動サイクル運転することができる装置 である。実環境に近い腐食状態を再現し、塩水噴霧試験よりも腐食促進性が高いことから、 短時間で耐食性を評価することができる。実験槽内の寸法は、幅 2000mm×奥行 1000mm× 高さ 500mm であり、一般的な供試体(150mm×70mm)を最大で 188 枚設置することが可 能である。



写真-1.1 大型複合サイクル試験機の外観



写真-1.2 大型複合サイクル試験機の内部



図-1.1 大型複合サイクル試験機の寸法



図-1.2 供試体の寸法

### 【供試鋼材】

本実験で用いた供試鋼材は、一般に橋梁や船舶などに使用されることが多い JIS G3106 溶 接構造用圧延鋼材(SM400A)である。図-1.2 に供試体の寸法、表-1.1 に SM400A の機械的 性質および化学成分をそれぞれ示す。引張応力を作用させる載荷供試体と、応力を作用させ ない無載荷供試体を作製した。

### 【防食塗装】

本実験で対象とした塗装系は、主に山間部などの一般環境で適用するA塗装系と、海岸 部などの厳しい腐食環境で適用するC塗装系とした。鋼道路橋防食便覧では、LCCを比較 した結果、防食下地には耐食性に優れたジンクリッチペイント、下塗りには遮断性に優れた エポキシ樹脂塗料を使用し、上塗りには耐候性に優れたふっ素樹脂塗料を用いたC塗装系

(重防食塗装系)を基本としている。そのため、これまで採用していた A、B 塗装系は、新設の道路橋には推奨しないこととされている。ただし、一般環境にある橋梁で既にA 塗装系が塗布されていて十分な防食性能を有している場合、または 20 年以内に架け替えが予定されている場合などには、A 塗装系を適用することも可能とされている。今後は C 塗装系の採用が基本とされるが、現時点ではA 塗装系が施された鋼橋が最も多い。図-1.3 に防食加工後の供試体、表-1.2 にA 塗装系および C 塗装系の比較をそれぞれ示す。塗膜には、傷が入った場合を想定して、供試体の中央部に下地鋼板に達する深さでエンドミル機械加工を行い、線幅 1mm、線長 40mm のクロスカットを設けた。

	載荷供試体	無載荷供試体
A 塗装系		$\times$
C 塗装系		$\times$

図-1.3 防食供試体の外観

塗装系	A 塗装系(一般塗装系)	C 塗装系(重防食塗装系)
理培	一些の理培	海岸など(潮風が強く飛来塩分の影響
埰呪	加又マノ・ネ・宛	を強く受ける)の厳しい環境
	長ばく形エッチングプライマー	無機ジンクリッチペイント
<b>沦</b> 蚁 捷武	鉛・クロムフリーさび止めペイント	エポキシ樹脂塗料下塗
坚作作用风	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗
	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	ふっ素樹脂塗料上塗
	1) 素地調整や塗付作業が容易	1) 下地にジンクリッチペイントを使
	2) 現時点では、鋼道路橋塗装に最も	用
	多く供用されている	2) 塗装系の中では最も防錆性能は優
	3) 今後は、一般環境で LCC を考慮す	れている
特徴	る必要がない場合、20年以内に架	3) 今後、原則として用いられる塗料
13 184	け替えが予定されている場合にの	系
	み使用される予定	

表-1.2 A 塗装系および C 塗装系の比較

表-1.3 防食供試体の内訳

	載荷供試体		無載荷供試体	
	A 塗装系	C 塗装系	A 塗装系	C 塗装系
100 日	3	3	2	2
200 日	3	3	2	2
300 日	3	3	2	2

# 【供試体数】

表-1.3 に本実験で使用した防食供試体の内訳を示す。実験槽内の寸法および治具の数を考慮し、載荷供試体はA塗装系、C塗装系それぞれ9体ずつ、無載荷供試体はA塗装系、C 塗装系それぞれ6体ずつ設置した。100日(400サイクル)ごとに載荷供試体のA塗装系およびC塗装系をそれぞれ3体ずつ、無載荷供試体のA塗装系およびC塗装系をそれぞれ2 体ずつ取り出し、劣化の状態を評価した。

# b.-3 実験条件

図-1.4 に本実験で用いる複合サイクル環境条件(S6 サイクル)を示す。この複合サイクル環境条件は、【1】実験槽内温度 30±2℃、5%濃度の塩水噴霧を0.5 時間、【2】実験槽内温度 30±2℃、湿度 95%の湿潤を1.5 時間、【3】実験槽内温度 50±2℃、湿度 20%の熱風乾燥 を 2.0 時間、【4】実験槽内温度 30±2℃、湿度 20%の温風乾燥 2.0 時間の合計 6 時間を1 サイクルとするものである。本研究における実験期間は 100 日、200 日、300 日とし、これらはそれぞれ環境促進実験の 400 サイクル、800 サイクル、1200 サイクルにあたる。この S6 サイクルは、藤原らの行った塗装鋼板の腐食劣化特性に関する既往の研究 いにおいて、暴露試験との相関性が最も高いと結論付けられたものである。また、本研究室の既往の実験でも S6 サイクルを採用しており、それらのデータを蓄積し暴露試験との結果と比較することで、相関性をさらに高めることに努めている。



図-1.4 環境促進実験条件(S6 サイクル)



写真-1.3 伸長治具



写真-1.4 供試体設置後の実験槽内の様子

供試体には、写真-1.3 に示す伸長治具を用いて、応力を作用させた。伸長治具は、供試体 と同じく長期間実験槽に投入するため、さびが発生しないように材質にはステンレス鋼を使 用した。中央に配置された一本のボルトに2つのブロックを取り付け、その両端に2体の供 試体を設置させる。一方のブロックを固定し、もう片方のブロックを手動で可動させナット で固定することにより、供試体に応力を作用させることができる。実験槽内における供試体 の配置場所により実験条件が変化しないように25日(100サイクル)おきにローテーショ ンさせた。写真-1.4 に供試体設置後の実験槽内の外観を示す。 供試体には、100(MPa)の引張応力を作用させた。後述する繰り返し荷重作用下における環境促進実験と応力の大きさを整合させるため、この値に設定した。本実験は、荷重が塗装に与える影響を明示するための第一段階の研究として、基礎的データの取得のため、最も基礎的な条件の下で実験を行った。

# b.-4 治具の精度検証

供試体には防食塗装が施してあり、塗装を除去しなければ鋼板にひずみゲージを貼付する ことは不可能である。そこで、無防食の供試体を用いて予備実験を複数回行い、供試体中央 部のひずみとボルト中央部ひずみの関係性を明らかにし、治具のボルトのひずみにより供試 体に作用する応力を管理することとした。なお、供試体の両面の中央部分と、ボルトの長さ 方向の中央の位置をグラインダーで削り平らにした後、両面にそれぞれひずみゲージを貼付 し、ひずみの計測を行った。図-1.5 に予備実験から得られた供試体のひずみとボルトのひず みの関係を示す。図の青点は供試体をボルトで治具に固定する際の曲げによって生じたひず みであることを考慮し、引張応力を作用させた際に生じた赤点のみで直線近似を行った。得 られた近似式 y=-1.27x+168 の±10%の部分に計測値がおおよそ収まっていることから、本 実験ではこの近似式を用いて、供試体に作用する応力を管理する。

供試体に作用させる引張応力は100 (MPa) であることを考慮し、この近似式からボルト のひずみを計算すると-488 µ であり、この値を目安に治具のボルトを固定することで供試体 に応力を作用させた。表-1.4 にボルトのひずみから推測される供試体に作用する応力を示す。

### b.-5 実験結果

### 【外観変化および表面性状】

外観変化を観察するために、100日(400サイクル)ごとに1体ずつ写真撮影を行った。 図-1.6に100日(400サイクル)おきに撮影した付着物を落とした各塗装系の供試体クロス カット部の外観を示す。荷重が与える影響について、A塗装系、C塗装系それぞれの塗装系 で検討した。





治具番号	ボルトひずみ (μ)	供試体に作用している応力(MPa)		
$\bigcirc$	-497	102		
2	-490	100		
3	-484	99		
4	-477	98		
5	-469	96		
6	-464	95		
$\overline{O}$	-485	99		
8	-497	102		
9	-501	103		
	平均	99		
	標準偏差	2.4		

<u> </u> 表 1 /	供試体に作用する広力の推定値
衣-1.4	

# A塗装系

載荷供試体、無載荷供試体ともに、初期状態に比べ100日経過後ではクロスカット部に赤 さびが発生していることが確認されたが、塗膜のふくれは見られなかった。200日経過後で は、赤さびの進展とわずかながらさび汁の発生が確認できたが、塗膜のふくれは見られなか った。300日経過後では、載荷供試体、無載荷供試体ともに、赤さびの進展および塗膜のふ くれが見られた。途膜のふくれについては無載荷供試体でより顕著に確認できた。

100 日経過後の無載荷供試体では、載荷供試体に比べ、クロスカット部の素地面により多 くのさびが生成された。さらに 200 日経過後の載荷供試体でも同様にさびの生成が見られた。 300 日経過後では載荷供試体で部分的に、無載荷供試体でクロスカット部に沿ってふくれて いることが確認できた。すなわち、クロスカット部から、塗膜下の素地面に水分や酸素が侵 入することでさびが進展し、そのさびの膨張で塗膜のふくれが生じた。 C 塗装系

100 日経過後では、載荷供試体ではさびの発生は見られなかったが、無載荷供試体では白 さびの発生が見られた。 200 日経過後では、載荷供試体でクロスカット部の一部に、無載 荷供試体でクロスカット部の全体に赤さびの発生が見られた。300 日経過後では、両供試体 でクロスカット部の全体に赤さびが広がっていることが確認できた。一方、塗膜のふくれは、 無載荷供試体のみ部分的にふくれていることが確認された。

レーザ深度計(KEYENCE 社製 LE-4010、測定範囲±5mm、レーザスポット系 $\phi$ 30 $\mu$ m、 分解能力 0.1 $\mu$ m)を用いて、供試体の防食面の表面形状計測を行った。供試体をデジタル 式ステージの上に載せ、ステージを設定間隔で移動させながら、固定設置されたレーザ深度 計の測定基準値からの距離を測定した。測定範囲は、供試体のクロスカット部分を中心とし た 60×60mmの供試体表面であり、0.3×0.3mm間隔で測定した。図-1.7 にレーザ深度計によ る供試体クロスカット部の表面形状計測結果を示す。

載荷供試体では、300日経過後まで目立った表面性状の変化は見られなかった。一方、無 載荷供試体では経過日数が進むにつれて徐々にクロスカット部でさびの進展が見られ、300 日経過後では、数カ所で大きな塗膜のふくれが確認できた。

### 【ふくれ面積算出結果】

環境促進実験の時間経過に従って、クロスカット部から進展したさびにより、塗膜にふく れが生じた。本研究では、レーザ深度計を用いて計測した供試体の表面形状データから、ふ くれ面積の算定による誤差が含まれなくなり、計測・補正誤差が許容範囲を下回る最低値で ある塗膜の健全部から 50µm 以上のふくれが計測された領域の面積を塗膜のふくれと判定 し、塗膜劣化の定量的評価の指標とする。図-1.8 と図-1.9 にふくれ面積の算出領域、塗膜の ふくれ状況をそれぞれ示す。表-1.5 と図-1.10 にふくれ面積算出結果を示す。200 日経過後ま でいずれの供試体でもふくれ面積はほぼゼロであった。わずかに算出された値については、 塩分などの付着物の影響であると考えられる。300 日が経過するといずれの供試体でもふく れが算出され始めるが、A 塗装系、C 塗装系ともに無載荷供試体で顕著に現れた。

100 日 200 日		200 日	300 日	
装系	載荷供試体		X	
¥٨	無載荷供試体			X
<sub>英</sub> 采	載荷供試体		X	
C 塗线	無載荷供試体			

図-1.6供試体クロスカット部の外観





図-1.8 ふくれ面積の算出領域(網掛け部) 図-1.9 塗膜のふくれ状況(塗膜の健全部 0µm)

表-1.5 ふくれ面積 (mm<sup>2</sup>)

	載荷供試体		無載荷供試体	
	A 塗装系	C 塗装系	A 塗装系	C 塗装系
100 日	0.03	0.03	0	0.18
200 日	0.09	0.48	0.18	0.59
300 日	3.36	0.33	85.94	13.10



図-1.10 ふくれ面積の推移

# b.-6 考察

載荷供試体と無載荷供試体を、S6 サイクルを条件とした環境促進実験に 300 日間供した 結果をまとめ、一定荷重が塗装に与える影響について考察する。まず、外観変化およびレー ザ深度計による表面形状計測結果では、載荷供試体と無載荷供試体の間で 200 日経過後まで は大きな違いは見られなかった。しかし、300 日経過後では無載荷供試体のみ、A 塗装系で クロスカット部全体に、C 塗装系でクロスカット部の一部にふくれが確認できた。したがっ て、外観変化および表面形状計測結果からは、無載荷供試体の方がより劣化が進行している ものと判断できる。

さらに、ふくれ面積算出結果からも、200日経過後までは特に違いは見られなかったが、 300日経過後でA塗装系、C塗装系ともに載荷供試体において塗装のふくれが確認された。 このことからも、無載荷供試体の方が、劣化度が大きいことがわかる。

本実験において劣化度が載荷供試体より無載荷供試体が大きくなった原因として、次の2 点について両供試体で厳密に同じ実験条件を再現できていなかったことが挙げられる。

# 【供試体の配置場所】

まず一つ目の原因として挙げられることは、供試体の配置場所である。図-1.11 に本実験 での供試体の配置図を示す。治具の寸法および実験槽内に取り付けられたガラス棒や仕切り の配置などの都合上、載荷供試体を実験槽内の中央にまとめて、無載荷供試体を噴霧口付近 に配置したが、これにより、無載荷供試体が載荷供試体に比べ、より塩水噴霧の影響を受け た可能性が考えられる。また、無載荷供試体は、常にクロスカット部を含む供試体の評価面 が噴霧口側に向けられていたのに対し、載荷供試体では、治具の両面に供試体を装着してい るため、向きのローテーションはしていたものの、実験期間の半分は、供試体の評価面が噴 霧口とは逆側に向けられていたことになる。以上より、載荷供試体は、無載荷供試体に比べ、 噴霧口からの塩水などの影響を受けにくかった可能性が考えられる。



2000

この問題に対し、供試体の配置場所を 図-1.12のように改善した。供試体によ って、配置場所による腐食環境の違いが 生じないように両側の噴霧口を結んだ 中央線に対称に載荷供試体と無載荷供 試体を配置し、ローテーションをするこ ととした。また、載荷供試体の数を減ら し、治具の片面にのみ供試体を装着する ことで、両供試体で噴霧口への評価面の 向きを統一した。

# 【供試体を固定するためのボルト】

本実験では、供試体を治具にボルトで 固定して実験槽に投入するため、ボルト





が腐食することでさび汁が発生し評価面に流れ落ちることで劣化度に影響を与えないよう に、ボルトに防錆テープを貼付して防錆処理を施した。そのため、載荷供試体では評価面の 上部にボルトが張り出し、無載荷供試体に比べ、塩水などの腐食促進因子による評価面への 作用を妨げた可能性が考えられる。

この問題に対し、図-1.13のように鉛直方向から保持角度15度で載荷供試体を配置した。 このように配置することで、ボルト部分が供試体評価面への腐食因子の作用を妨げにくいこ と、また、無載荷供試体も同様に角度をつけ配置したことで、両供試体でクロスカット部に 塩分や水分などの腐食促進物質が溜まりやすくなり、腐食が促進されやすくなることが期待 できる。

本実験では、荷重よりも供試体の設置環境の方が、防食の劣化度に大きな影響を与える結果となった。すなわち、一定荷重が防食に与える影響は供試体の設置環境による影響に比べ小さいものであったともいえる。そこで、一定荷重が防食の耐久性に与える影響をより厳密 に明らかにするため、上記2点を改善し、追加実験を行っている。

### c. 繰り返し荷重作用下における塗装鋼板の環境促進実験

#### c.-1 概要

通常、橋梁には、自重などの一定荷重のみならず、自動車交通などの繰り返し荷重が作用 している。荷重の繰り返し作用は塗装と鋼板の付着性に大きく影響を与える可能性がある。 本実験では、可能な限り一定荷重実験と同じ実験環境を再現することで、無荷重、一定荷重、 繰り返し荷重の3つの荷重条件が防食の劣化に与える影響について検討する。

また、一定荷重作用下における環境促進実験と同様に、繰り返し荷重を作用させた状態で 環境促進実験が実施された前例はなく、実験方法についても構築されていない。そのため、 本実験では、材料強度試験機と環境促進槽を組み合わせた特別な実験装置を用いて、防食の 劣化度の評価を行った。

### c.-2 実験装置および実験供試体

### 【実験装置】

本実験では、写真-1.5、写真-1.6 および図-1.14 に示す実応力作用環境促進実験装置を用いた。これは、材料強度試験機(MTS 社製)と環境促進槽(スガ試験機社製)とを組み合わせた装置である。環境促進槽は、大型複合サイクル試験機と同様に、塩水噴霧試験、酸性雨噴霧試験、乾燥試験、温湿度試験、低温試験の各種試験条件を組み合わせて複合腐食促進実験を行うことが出来る装置であり、これに材料強度試験機の試料部分を組み込むことが出来るようにしている。実験槽内の寸法は、幅 450×奥行 835×高さ 300mm である。



写真-1.5 実験装置外観



写真-1.6 実験槽



図-1.14 実験装置概要

# 【供試鋼材】

使用した供試鋼材は一定荷重実験と同様のJIS G3106 溶接構造用圧延鋼材(SM400)である。ただし、治具との摩擦力を大きくし荷重を作用させた際に滑りにくくするために、繰り返し荷重実験で使用した供試体は、治具との接触面を一定荷重の供試体に比べやや大きくした。図-1.15 に供試体の寸法を示す。また、一定荷重実験と同様に、引張応力を作用させる 載荷供試体と、応力を作用させない無載荷供試体を作製した。載荷供試体は後述する治具を 用いて、無載荷供試体は実験槽内の側面に配置されたブロックに立てかけて設置した。

# 【防食塗装】

一定荷重実験と同様に、供試体全面に A 塗装および C 塗装を施し、評価面にクロスカット加工をした。

# 【供試体数】

表-1.6 に本実験で使用した防食供試体の内訳を示す。実験槽の寸法が一定荷重実験で使用 した大型複合サイクル試験機に比べ小さく、一度に多くの供試体を設置することはできない。



表-1.6 供試体内訳

載荷住	供試体	無載荷供試体	
A 塗装系         C 塗装系		A 塗装系	C 塗装系
4 4		2	2

載荷供試体はA塗装系、C塗装系それぞれ4体ずつ、無載荷供試体はA塗装系、C塗装系 それぞれ2体ずつ設置した。50日(200サイクル)おきに全供試体を取り出し、データ計測 を行った後、再度実験槽に投入し、同じ供試体で継続して実験を行った。

### c.-3 実験条件

環境促進条件は、基本的に一定荷重下での実験条件と同様のものとし、複合サイクル条件 (S6 サイクル)を採用した。

荷重条件については、材料強度試験機で荷重を制御し、繰り返し一軸引張応力を作用させた。想定した応力の上限は一定荷重と同様の100(MPa)であり、下限は0(MPa)となるような荷重条件で引張による一定振幅の繰り返し荷重(正弦波)を与えた。上限値については後述の予備実験の際、供試体が治具のボルト部分で滑らずに荷重をかけられる限界値が100(MPa)であったため、この値に設定した。また、周波数は、1/1800(Hz)すなわち1回/30分のサイクルで荷重が作用するように設定した。これは、環境促進装置と材料強度試験機を同時に開始した場合、複合サイクル条件S6サイクルの一つの環境条件中に最低一回は荷重が作用するように考慮した周波数である。

# c.-4 治具の精度検証

本実験で使用した材料強度試験機は、通常一回の実験で一体の供試体しか評価することはできない。そこで複数の供試体を同時に供することができる治具(ステンレス製)を作製し、より効率的に実験を行った。図-1.16に治具の寸法、写真-1.7に供試体設置後の治具の外観をそれぞれ示す。一辺に供試体を3体、治具全体で計12体装着が可能である。本実験を実施するにあたり、治具に装着した全ての供試体に想定している応力が作用するかを確認するため、無塗装の供試体を用いて予備実験を行った。



奥行:400 単位:mm

図-1.16 治具の寸法



写真-1.7 供試体設置後治具の外観(左:予備実験,右:本実験)

# 【供試体を12体装着した場合】

装着可能な供試体数 12 体を治具に装着し、全ての供試体にひずみゲージを貼付した後、 供試体に想定した応力 100 (MPa) が作用するように荷重をかけた。表-1.7、図-1.17 に予備 実験から得られた供試体の位置とひずみの関係、図-1.18 に供試体の位置をそれぞれ示す。 その結果、4 辺の中央に位置する②⑤⑧⑪の 4 体の供試体のひずみが各辺の隅に位置する① ③④⑥⑦⑨⑪⑫の 8 体の供試体のひすみに比べ大きくなった。これは、治具のつかみ部分ま での距離が辺の中央に比べ各辺の隅の方が長いため、たわみが大きくなったことが原因に挙 げられる。ひずみの標準偏差も 160 (μ) と全体のばらつきは比較的大きかった。

# 【供試体を8体装着した場合】

4辺の中央に位置する供試体4体を取り除き、各辺の隅の8体のみで再度予備実験を行い、 供試体に均一に応力が作用するか検討した。表-1.8、図-1.19に予備実験から得られた供試体 の位置とひずみの関係、図-1.20に供試体の位置をそれぞれ示す。その結果、正面から見て 前面と後面に位置する①③⑦⑨の供試体が、右面と左面に位置する④⑥⑩⑫の供試体に比べ ひずみが大きくなった。しかし、標準偏差は93(μ)で全体のばらつきは小さくなっており、本実験では、前後面と左右面の応力の差を考慮したうえで、治具の各辺の隅に供試体を 8体設置することとした。

供試体の位置	ひずみ (µ)
(])	254
2	676
3	279
4	373
5	521
6	442
$\bigcirc$	329
8	655
9	247
10	440
(1)	679
12	446
平均	445
標準偏差	160
変動係数	0.36

表-1.7 供試体のひずみ







図-1.17 供試体の位置とひずみの関係

表-1.8 供試体のひずみ

供試体の位置	ひずみ (μ)
1	608
3	594
4	449
6	440
$\bigcirc$	609
9	614
10	435
12	412
平均	520
標準偏差	93
変動係数	0.18



図-1.20 供試体の位置



図-1.19 供試体の位置とひずみの関係

### c.-5 実験結果

### 【外観変化および表面性状計測結果】

環境促進実験 50 日および 100 日実施後における載荷供試体および無載荷供試体のクロス カット部の外観変化および表面形状計測結果を図-1.21 に示す。

A 塗装系

50 日経過後では、載荷供試体、無載荷供試体ともにクロスカット部に赤さびが発生して いた。また、クロスカット部の一部から、さび汁が発生している様子が確認できた。載荷供 試体では、クロスカット部周辺の塗膜が浮き上がっている様子が見られた。

100 日経過後では、載荷供試体で、クロスカット部の赤さびがさらに進展している様子が

見られたとともに、50日経過時に浮き上がっていた塗膜の劣化が進み、わずかに剥がれ落ちていたことを確認した。無載荷供試体では、赤さびはさらに広がり、クロスカット部の一部にふくれが生じていることが確認できた。

50 日経過後では、載荷供試体のクロスカット部周辺で塗膜が大きくふくれていることが 確認できた。特に、クロスカットの線の始点部分で集中的にふくれているように見られた。 無載荷供試体では、クロスカット部の一部がわずかにふくれていることが確認できた。また、 載荷供試体の方が、無載荷供試体に比ベクロスカット部にさびがより多く生成していること がわかった。

100 日経過後では、載荷供試体のクロスカット部周辺、特にクロスカットの線の始点部分 で塗膜のふくれが広がっていることが確認できた。一方、無載荷供試体では、クロスカット 部の全体、特に下部においてふくれがより大きく生じていることが確認できた。 C 塗装系

50 日経過後では、載荷供試体で、クロスカット部全体に赤さび、そして一部に白さびが 発生していることが確認できた。また、クロスカット部の下部からはわずかにさび汁が発生 していた。また、A 塗装系の載荷供試体と同様に、クロスカット部周辺の塗膜が一部浮き上 がっている様子が見られた。無載荷供試体では、クロスカット部全体に白さび、一部に赤さ びが発生していることが確認できた。

50 日経過後では、載荷供試体で、クロスカット部に沿って、塗膜がふくれているのが確認できた。載荷供試体ほどではないが無載荷供試体でも、クロスカット部の一部にふくれのようなものが見られた。実験を開始する前の初期の供試体の表面性状を確認したところ、同様な傾向が見られたことから、C 塗装系は A 塗装系に比べ塗膜が厚いため、クロスカット加工の際に塗装の角部がわずかに浮き上がってしまったことが原因であると考えられる。

100 日経過後では、載荷供試体で、目視で目立った外観変化は確認できなかった。無載荷 供試体では、白さびが赤さびに変化していた。両供試体で、塗膜の目立った劣化は確認でき なかった。100 日経過後では、載荷供試体、無載荷供試体ともに、目立った変化が見られな かった。

### 【ふくれ面積算出結果】

一定荷重実験と同様の方法でふくれ面積を算出し、塗膜劣化の定量的指標とした。表-1.9 および図-1.22 にふくれ面積算出結果を示す。

50 日経過後では、A 塗装系、C 塗装系とも載荷供試体の方が無載荷供試体に比べ、ふく れ面積が大きくなっていることが確認できた。A 塗装系においては、載荷供試体のふくれ面 積は無載荷供試体の約 7.6 倍であった。C 塗装系においては、無載荷供試体でふくれ面積は 算出されなかったのに対し、載荷供試体では A 塗装系の無載荷供試体よりも多くふくれ面 積が算出された。

100 日経過後は、載荷供試体、無載荷供試体ともに A 塗装系でふくれ面積が大幅に増加した。C 塗装系載荷供試体では、50 日経過後から目立った増加は確認できなかった。C 塗装系無載荷供試体は、実験日数が少ないということもあり、ふくれ面積は算出されなかった。



図-1.21 外観変化および表面形状計測結果

	載荷供試体		無載荷供試体	
	A 塗装系	C 塗装系	A 塗装系	C 塗装系
0 日	0	0	0	0
50 日	39.6	15.7	5.2	0
100 日	162.3	16.5	49.7	0

表-1.9 ふくれ面積 (mm<sup>2</sup>)



図-1.22 ふくれ面積 (mm<sup>2</sup>)

c.-6 考察

載荷供試体と無載荷供試体を、S6サイクルを条件とした環境促進実験に100日間供した 結果をまとめ、繰り返し荷重が塗装の劣化に与える影響について考察する。

外観変化およびレーザ深度計による表面形状計測結果では、50日経過後で、載荷供試体 と無載荷供試体の間で大きな違いが見られた。その違いは、A 塗装系の表面形状計測結果に よって顕著に見ることができ、載荷供試体では無載荷供試体に比べ、クロスカット部でのさ びの生成と塗膜のふくれがより多く確認できた。さらに載荷供試体では、クロスカット部で 沿って塗膜が浮き上がっていることが見受けられた。環境劣化因子のみを考慮した既往の環 境促進実験では、クロスカット部の素地面にある程度さびが生成した後にふくれが生じてい たのに対し、本実験での載荷供試体では、クロスカット部にさびが生成される前もしくは生 成されると同時に、塗膜が浮き上がるような傾向が見られた。それに伴い、ふくれ面積も環 境促進実験の初期段階で、A 塗装系、C 塗装系ともに無載荷供試体に比べ載荷供試体の方が より顕著に算出された。この傾向は、一定荷重下の実験では見られなかったものであり、繰 り返し荷重下の実験でのみ確認できた。

100 日経過後の載荷供試体では、A 塗装系ではさらにふくれ面積の増大が見られたが、C 塗装系ではふくれ面積の増加が緩やかになった。一方、無載荷供試体では、A 塗装系でふく れ面積が大幅に増加していることが確認できたが、C 塗装系ではクロスカット部の素地面に さびは確認できたものの、塗膜の変化は見られなかった。このことから、荷重作用は実験開 始初期段階において最も塗膜に影響を与えることが推定できる。A 塗装系では荷重作用の影 響による塗膜の劣化に伴い、塗膜下から、水分、酸素、塩分などが侵入し、環境劣化因子との複合作用によりさらに速度を上げ劣化していったが、C塗装系ではA塗装系に比べ塗膜が厚いため剥離するほど劣化が進んでおらず、100日経過時では環境作用による影響がまだ現れ始めていないと考えられる。

### d. 荷重作用下での防食塗装の劣化特性

### d.-1 応力作用の影響

本実験では、荷重作下における防食塗装の基礎的な劣化特性を明らかにするため、防食供 試体に一定ならびに繰り返し荷重を作用させた状態で塩水噴霧複合サイクル環境促進実験 を実施した。

一定荷重作用下における環境促進実験では、載荷供試体と無載荷供試体の間で厳密に同じ 実験条件を再現できなかったため、議論しづらい部分はあるが、現在行っている再実験から は載荷供試体と無載荷供試体の間で目立った差異は生じていない。

一方、繰り返し荷重作用下における環境促進実験では、わずか50日で載荷供試体に塗膜の浮き上がりやふくれが確認されるなど、載荷供試体と無載荷供試体の間で大きな違いが見られた。このことから、塗装への影響は、一定荷重より繰り返し荷重の方が大きいといえる。

このような結果となった一つの原因として、繰り返し荷重下での実験では、塗装と供試鋼 材の間で付着の低下が生じた可能性が考えられる。RC部材では、繰り返し荷重により鉄筋 に接するコンクリートのひずみが累積することによって付着の低下が生じることが確認で きており<sup>2)</sup>、これと類似した現象が塗装でも生じたと推定できる。塗装と鋼材の間には付着 力が作用しているため、引張応力に対して、鋼材とともに塗装も抵抗する。しかし、繰り返 し荷重が載荷されることで塗装と鋼材の付着性能が低下し引張応力に抵抗できず、クロスカ ット部で剥離が生じたと考えられる。さらに、塗膜と素地の間から、空気、水分、塩分など の環境劣化因子が侵入し、劣化が促進されたと推定される(図-1.23 参照)。また、繰り返し 荷重実験のC塗装系供試体では実験開始時の50日間に比べ、100日実施時までの50日間で 劣化速度が遅くなったことから、塗膜への影響は、荷重振幅に変化がない場合は初期のサイ クルで最も大きくなると考えられる。また、荷重振幅が増大する場合には振幅が変化する最 初のサイクルで大きくなることが予想される。

### d.-2 防食塗装の劣化評価

塗装の劣化評価の際、鋼道路橋防食便覧では、定期点検を行い、塗膜の外観状態を標準写 真などと対比させ4段階(1:健全、2:ほぼ健全、3:劣化している、4:劣化が著しい)に 評価するのがよいとしている。塗装の劣化には、さびや剥がれの他に光沢度の低下、ふくれ、 われ、変退色、汚れ、付着力の低下などがあり、実際の鋼橋ではこれらが複合した形で劣化 が進行する。したがって、塗替えの際はこれらの項目全てを点検調査し判定する。



図-1.23 繰り返し荷重下での塗装劣化イメージ

評価点		発生状態					
(RN)	発錆面積(%)	外観状態					
3	X<0.03	異常なし。 だれが見ても外観的にはさびが認められないか、さびらしきもの があっても無視しうる程度のもの。					
2	$0.03 \le X < 0.3$	僅かにさびがみられる。 さびが観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されて いると思われる状態。					
1	0.3≦X<5.0	明らかにさびが見られる。 だれがみても発生の部分が多く、何らかの処置をほどこさなけれ ばならない状態。					
0	5.0≦X	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。早急に塗料を塗り 直さなければならない状態。					

表-1.10 鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV 03-1993 でのさび評価基準

ことが望ましい。しかし、実際は点検作業が複雑で、寿命の判定基準が一様でないなどの理由から、塗膜寿命の一律的な判定は非常に困難であるとされる。

これらを考慮して多くの事業主体では、塗替えの判定基準はさびの発生程度を主体に考え、 塗替えの目的に応じて、その他の劣化程度を加味することが合理的であるとしている。表 -1.10に示した鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV 03-1993 でのさび評価基準では、標準図を基 にした見かけさび面積による調査方法を用いて評価している。また、林田らは、平成 14 年 度に行った調査橋梁の調査データおよび防錆台帳のデータを基に適切な塗替えサイクルの 検討を行った際、素地調整 3 種 B で点さびが発生する限界値であった発生面積率 5%を塗替 え基準として用いた<sup>3)</sup>。さらに、日本道路公団ではさび面積率が 5%以上になると部分的な 孔食の発生が懸念され、部分的にブラストによるさび除去が困難になると考え、さび面積 5%を塗替え最適時期としている。

そこで本研究でも、防食システムの劣化試験で最も重要な劣化指標と考えられるさびに起 因するふくれに着目し、発生面積率が5%に達した時点を塗替え時期として検討を行う。本 研究で使用したクロスカットを有した供試体の場合、基準面積を 5000mm<sup>2</sup> と仮定すると、 基準面積に対する初期クロスカットの面積率が西村・島田らが想定した初期劣化面積率 <sup>4)</sup> とほぼ一致する。したがって、基準面積 5000mm<sup>2</sup>の 5%に相当する 250mm<sup>2</sup>の時点を塗装の 塗替えが必要となる劣化基準とし、劣化基準に達するまでの期間について評価を行った。

# d.-3 劣化曲線による塗装寿命の評価

著者らは、環境促進実験で得られたA、C塗装供試体のクロスカット部からのふくれ面積 を基本として、近似的な劣化挙動を示してきた。本研究では、繰り返し荷重作用下における 環境促進実験から得られた載荷供試体および無載荷供試体でのクロスカット部からのふく れ面積を発生面積率に相当する劣化指標として用いて、それぞれの劣化曲線を作成した。

塗膜の劣化曲線を検討する際、藤原らは、塗替え時期を判断する 10~20 年程度の実用的 な範囲であれば、二次曲線によって劣化傾向は把握できると考え、曲線の中で最も取り扱い やすい二次曲線を用いて塗膜の劣化曲線を求めている<sup>1)</sup>。また、著者らは、初期段階の塗膜 劣化面積率から長期間の劣化を推定することが可能とされている Gompertz 曲線を用いて、 塗替え時期の推定方法の検討を行った<sup>5)</sup>。Gompertz 曲線は、西村・島田らにより鋼構造物 塗膜の長期間経年劣化挙動の評価への適用性について理論的に検証され、初期段階の塗膜劣 化面積率から長期間の劣化を推定することが可能であるとされている<sup>4)</sup>。

本研究では、A 塗装系、C 塗装系ともに腐食劣化が初期段階であることから、今後の劣化の進展を考慮し、Gompertz 曲線を適用した。Gompertz 曲線は次式のように表される。

$$a_t = K \cdot a^{b^t}$$

(1)

ここで、 $y_t$ は劣化面積、t は経年年数、K は全面劣化時の面積であり、a、b は 0 より大きく 1 より小さい定数とする。この曲線は、 $y_t = 0$ から徐々に増加して、極限値 $y_t$ =K (K=5000) に漸近する曲線となる。本研究では 100 日目までのふくれ面積のデータを用いて、最小二乗 法により式(1) に示す Gompertz 式の定数 a、b を決定し、劣化曲線を作成した。図-1.24 に 得られた劣化曲線を示す。

上述したように、発錆面積率が5%となる時点を塗替え時期と設定する。基準面積5000mm<sup>2</sup> と仮定した場合、5%に相当する250mm<sup>2</sup>の時点を劣化基準とし、劣化基準に達する時点(塗 装寿命)を得られた劣化曲線から求めた。表-1.11に劣化基準に達する時点を示す。供試体 に100(MPa)の応力に相当する繰り返し荷重を載荷させた場合、無載荷時に比べて劣化速 度がA塗装系では1.36倍、C塗装系では1.47倍と、ともに1.4倍程度になることを示唆し ていた。

これまでは、塗膜が劣化する速さは、塗膜の防錆性能と架橋環境における腐食劣化因子の 影響の大きさで決まると考えられていたが、得られた結果からは、荷重作用も塗膜の劣化に 大きく影響を及ぼす可能性を示唆しているといえる。

	A 塗	装系	C 塗装系		
	載荷	無載荷	載荷	無載荷	
環境促進実験 実験日数(日)	119	162	406	598	
劣化速度比 (載荷/無載荷)	1.	36	1.	47	

表-1.11 劣化基準に達するまでの期間



図-1.24 劣化曲線

# d.-4 LCC の試算

# 【実環境への適用】

著者らは、裸鋼材の腐食による板厚減少量に基づき、S6 サイクルを条件とした環境促進 実験と国内 31 箇所で行われた屋外暴露試験との相関性に関して、すなわち環境促進試験と 実環境との相関性に関して、式(2)の促進倍率A<sub>c</sub>で表すことを提案している<sup>6</sup>。実験日数 に促進倍率A<sub>c</sub>を掛けることで実環境における日数が算出される。

$$A_c = 9.14 W_s^{-0.62} \tag{2}$$

ここで、Waは暴露試験地の飛来塩分量(mmd)である。各地域の飛来塩分量から促進倍率 を求めることにより、環境促進実験日数に相当する実環境における日数に換算することが可 能となる。

# 【試算条件】

荷重作用の有無を考慮した場合の防食塗装のライフサイクルコストを比較・検討すること を目的として、それぞれ以下の仮定のもと LCC の算定を行う。

本研究で適用した劣化曲線は、鋼部材に 100 (MPa) 程度の引張応力が繰り返し作用する という極めて限定された条件下で得られたものである。実橋梁の全ての部位に同様の応力が 作用している状況は考えづらいが、溶接止端部などの応力集中しやすい部分では、100 (MPa) 程度の活荷重が作用することが実橋梁を対象とした鋼床版の実発生応力の調査によってわ かっている<sup>7)</sup>。そこで本研究では、溶接部などの周辺での部分塗替え塗装を行うことを想定 し、LCC の試算を行った。

ここでは、プレートガーダー橋の事例として、名古屋市西部の庄内川に架かる新大正橋(橋 長:300m、離岸距離 6km)の1径間スパン(スパン長:46m)を算定対象橋梁とする。対 象スパンの総塗装面積は3668mm<sup>2</sup>である。新規塗装にはA-5塗装系、C-5塗装系を用いて、 塗替え塗装にはA塗装系を用いた場合はRa-III、C塗装系を用いた場合はRc-I塗装系を用 いることとする。

算定に用いた鋼材や塗装の単価を表-1.12 に示す。既往の文献に記載されている LCC 試算の例を参考に、新規塗装系および塗替え塗装系の積算単価(塗装鋼、足場・防護工、産業廃 棄物処分費などの統計)を決定した<sup>8</sup>。

既設橋を機械工具などによる3種ケレンにより塗り替える場合、さびやさびの内部に付着 した塩化物イオンを完全に除去することは困難であることから、塗装の寿命は新設時と比べ ると大きく劣るとされている。塗替え塗装の寿命は、塗替え時の素地調整の程度によって異 なるとされており、著者らはブラスト処理による素地調整(1種ケレン)に対し、動力工具 による素地調整(3種ケレン)では、寿命が約36%になることを示している<sup>9</sup>。このことを 考慮し、塗替え塗装時には3種ケレン(Ra-III)を行うA塗装系については新規塗装の36% の塗装寿命を仮定した。C塗装系の塗替え塗装時についても塗装寿命が短くなることを想定 し、1種ケレン(Rc-I)を行うC塗装系については新規塗装の80%の塗装寿命を仮定し算定 を行った。

# 【試算結果】

LCC の算定結果を図-1.25 に示す。横軸に期間、縦軸にコストをとり、期間については SM400A に A 塗装を用いた場合の新規塗装寿命を1とし、コストについては SM400A に A 塗装を用いた場合の初期費用を1として、それぞれを無次元化して示した。

A 塗装系、C 塗装系ともに初期コストは、荷重の有無で差はないものの、期間が経つにつ れコストの差は広がっていくことが確認で

きる。また、荷重を考慮した場合、A 塗装系 と C 塗装系の LCC の差はさらに広がること から、LCC 低減の観点からも、既存橋梁の塗 替えは一般塗装系である A 塗装系から重防 食塗装系である C 塗装系に切り替え、より長 寿命化を目指す必要があるといえる。

文献 10)に示されるように、塗替え方式に は全面塗替え塗装の他に、局部補修塗装、部 分塗替え塗装がある。鋼橋に作用する応力の 種類、大きさ、頻度は、部位によって大きく 異なる。それに伴い、受ける荷重の影響も異 なり、部位によって塗膜の劣化速度にも違い が生じてくることが考えられる。そのため、

#### 表-1.12 各塗装系および鋼材の単価

塗	装系	単価(円/m <sup>2</sup> )		
<b>补</b> 旧	A-5	3169		
利祝	C-5	7389		
浴井ら	Ra-III	5524		
坚省ん	Rc- I	12380		

鋼材	単価(円/m <sup>2</sup> )
SM400A	82000



図-1.25 LCC の算定結果

塗膜劣化した部位に部分塗替えを行い、全面塗替えまでの期間を延長するなど、効率的に塗 替え塗装を行うことでLCCの低減に努め、鋼橋全体の健全性を合理的に保持することが重 要といえる。

# e. まとめ

本研究では、材料強度試験機と環境促進槽を組み合わせた実応力作用環境促進実験装置を 用いて、防食塗装を施した鋼板供試体に一定ならびに繰り返し荷重を作用させた状態で塩水 噴霧複合サイクル環境促進実験を実施し、荷重作用下における防食塗装の劣化特性の評価を 行った。また、得られたデータから塗装の劣化曲線を作成し、荷重作用を考慮した塗装系の 塗替え時期の推定方法の検討を行った。

# 荷重作用下における塗装鋼板の環境促進実験

塗装鋼板に 100 (MPa) の応力を一定並びに繰り返し作用させた状態で環境促進実験を実施し、A 塗装系および C 塗装系の防食塗装の劣化特性の評価を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- 塗装鋼板に一体荷重を作用させた状態で環境促進実験を 300 日間(1200 サイクル)実施した結果供結果、無載荷時に比べ、ふくれや剥離などの目立った塗膜の劣化は確認できなかった。
- 2) 塗装鋼板に繰り返し荷重を作用させた状態で環境促進実験を100日間(400サイクル) 実施した結果、無載荷時に比べ、塗膜の劣化が顕著に見られた。クロスカット部に沿っ て塗膜が浮き上がっている様子が見られ、その傾向は実験の初期段階でより顕著に確認 できた。

### 劣化曲線による塗装寿命の評価

環境促進実験により得られた防食欠陥部からのふくれに着目し、ふくれ面積を指標として、 劣化面積を作成した。劣化曲線をもとに荷重を考慮した場合としない場合でそれぞれ塗替え までの期間を算出し、塗装寿命の評価を行った。その結果、以下のような結論が得られた。 3) 塗装鋼板に応力が100(MPa)作用していた場合、無載荷時に比べて、塗装の劣化速度 がA塗装系で約1.36倍、C塗装系で約1.47倍であった。このことは、活荷重が塗装の 劣化速度に大きく影響を及ぼすことを示唆している。

荷重の影響を考慮した LCC の試算

溶接部や継手部などの応力集中部での部分塗替え塗装を行うことを想定し、荷重作用を考慮した場合としない場合のコストの違いを比較検討することを目的として、LCCの試算を 行った。

- 荷重を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ、塗替えまでの期間を短縮することがわかった。
- 5) 荷重を考慮した場合では、考慮しない場合に比べ、A 塗装系で塗替えを行った場合とC 塗装系で塗替えを行った場合の LCC の差は広がることから、LCC 低減の観点からも、 既存橋梁の塗替えは一般塗装系であるA 塗装系から重防食塗装系であるC 塗装系に切り替え、より長寿命化を目指す必要があるといえる。

### 参考文献

- 藤原博、田原重雄:鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究、土木学会論文集、 No.570、I-40、pp.129-140、1997。
- 2) 国土技術政策総合研究所:国総研資料第620号、2011。
- 3) 林田宏、田口史雄、島田久俊:鋼橋塗装の耐用年数及びライフサイクルコストに関する 研究、寒地土木研究所月報、No.629、pp.18-26、2005。
- 西村昭、島田喜十郎:鋼構造物塗膜の長期劣化挙動の理論解析、橋梁と基礎、No.5、 pp.17-21、1985。
- 5) 伊藤義人、坪内佐織、金仁泰:環境促進実験による塗替え塗装鋼板の腐食劣化特性に関する研究、土木学会論文集 A、Vol.64、No.3、pp.556-570、2008。
- 伊藤義人、金仁泰、貝沼重信:鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進 倍率に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.48A、pp.1021-1029、2002。
- 7) 国土技術政策総合研究所:国総研資料第684号、2002。
- 8) 社団法人日本鋼構造協会:重防食塗装、2012。
- 9) 伊藤義人、金仁泰、貝沼重信、門田佳久:素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する研究、土木学会論文集、No.766、I-68、pp.291-307、2004。
- 10) 社団法人日本道路協会:鋼道路橋防食便覧、2014。

### (2) ひずみと環境劣化因子を考慮した免震ゴム支承の耐久性評価実験装置の開発

#### a. はじめに

橋梁用免震支承として数多く使用されている鉛入り天然ゴム支承(LBR)においては、そ の性能を発揮する上で水平剛性が重要な意味を持つ。しかし、ゴム材料は熱、光、オゾン等 の環境因子によって物性が変化するため、橋梁用ゴム支承は供用期間と共にその性能が劣化 する<sup>1)</sup>。天然ゴム支承においては、水平剛性が時間の経過に伴って増加することが知られて いる<sup>2)</sup>。橋梁用天然ゴム支承の長期性能が重要視される一方で、2001年頃には積雪寒冷地 である北海道で、実橋に設置された天然ゴム支承において1年程度で支承側面被覆ゴムの表 層にき裂が発生した事例が多数報告された<sup>3)</sup>。各種検討の結果、低温下においてゴム表面の 耐候性保護膜が氷結等の作用で欠落したことと、低温下での耐候性保護剤のゴム表面への再 滲出が遅れたことにより、オゾンの影響によってき裂が発生したものと結論付けられた。そ の後、低温下でも素早くゴム表面に再滲出する耐候性保護剤が開発されると共に、ゴム材料 の低温耐候性試験方法が提案された<sup>3)</sup>。

それ以降、低温耐候性試験により性能を確認した適切な耐候性保護剤を配合することで、低温環境下における天然ゴム支承の表面き裂の発生は抑止できるものと考えられてきた。しかしながら近年では、積雪寒冷地以外の地域においても供用開始から数年~10数年経過したゴム支承の表面き裂の発生が報告されている。そのき裂の特徴としては、温度変化に起因する桁の伸縮に伴うせん断変形により、支承表面の引張ひずみが作用する領域に発生するものである<sup>4~6</sup>。支承表面の被覆ゴム(通常10mm厚)にき裂が発生したとしても即座にゴム支承の力学性能が低下する訳ではないが、時間経過に伴い表面のき裂が支承内部の積層ゴムに到達すれば、ゴム支承の力学性能は低下するものと考えられる。また、表面にき裂が存在する状態で地震による過大な荷重や揚力が作用した場合、表面のき裂が起点となってゴム支承の破断が生じる可能性もある<sup>7.8</sup>。

上述のゴム支承表面におけるき裂発生の主要因はオゾン劣化であると考えられている<sup>4~</sup> <sup>6</sup>が、オゾンに限らず温度およびせん断変形によるひずみもき裂の発生に影響を及ぼしてい ると考えられる。環境劣化因子(オゾン、温度)および引張ひずみがどのような条件で作用 した場合にゴム支承表面のき裂が発生するかについては不明な点が多い。

本研究では、環境劣化因子(オゾン、温度)およびひずみが天然ゴム支承の表面き裂発生 に及ぼす影響を検討することを目的に、比較的大型のゴム支承供試体にせん断変形を与えた 状態で固定する鋼製のジグを取り付け、そのまま環境試験槽内に設置できる大型のオゾン発 生器付恒温試験装置を新たに開発した。開発した装置を用いて環境劣化因子(オゾン濃度、 温度)およびひずみの条件を種々変化させた一連の劣化促進実験を実施し、き裂を発生させ る条件を明らかにするための基礎的検討を実施した。

### b. 実験供試体

# b.-1 ダンベル試験片

環境劣化因子(オゾン、温度)とひずみの影響により橋梁用ゴム支承に使用する天然ゴム にき裂が生じる実験条件を特定するため、図-2.1 に示すダンベル試験片(JIS K6251、ダン ベル状 3 号形)<sup>9</sup>を使用した。試験片は写真-2.1 に示す伸長ジグに取り付け、ひずみを与え た状態でオゾン劣化促進実験に供した。

試験片に用いた材料は表-2.1 に示す配合で構成した天然ゴム(株式会社川金コアテック提供)であり、老化防止剤を含むものと含まないもの、2 種類を作製した。

# b.-2 支承供試体

本実験で使用する支承供試体の形状 および寸法を図-2.2 に示す。供試体の幅 および奥行は 220mm、高さは 108mm で ある。厚さ 8mm の天然ゴム 6 枚と厚さ 3.2mm の鋼板 (SS400) 5 枚を交互に積 層し、支承の上下には厚さ 22mm の鋼板 (SM490A)を使用している。支承の側 面は厚さ 10mm の天然ゴムで被覆して いる。ダンベル試験片と同様、老化防止 剤を含むものと含まないものの 2 種類 で内部積層ゴムおよび被覆ゴムを構成 し支承供試体を作製した。

# 表-2.1 天然ゴム材料の配合(重量比)

	老化防止剤	老化防止剤
	あり	なし
天然ゴム	100.0	100.0
N330 カーボン	40.0	40.0
ナフテンオイル	10.0	10.0
老化防止剤(TMDQ)	1.5	
老化防止剤(IPPD)	1.5	
ワックス	1.5	
酸化亜鉛	5.0	5.0
ステアリン酸	1.0	
促進剤 CBS	1.5	1.5
促進剤 TMTD	1.0	1.0
硫黄	0.5	0.5
合計	163.5	158.0

単位:phr (per hundred rubber)





図-2.1 ダンベル試験片 (JIS K6521 ダンベル状 3 号)



写真-2.1 伸長ジグ



図-2.2 支承供試体



(a) 変形前



(b) 変形後

写真-2.2 鋼製ジグによるせん断変形の付与

本研究では、支承供試体にせん断変形を与えた状態で固定し、劣化促進実験を行った。支 承供試体のせん断変形を保持するための鋼製ジグの概要を写真-2.2 に示す。ボルト孔を設け た鋼製のフレームに支承供試体を取り付け、載荷試験機を用いて支承供試体上側の鋼製ジグ に所定の水平変位を与えた。その後、鉛直方向に所定の面圧に相当する圧縮荷重を負荷した 状態でボルト締めし、供試体の形状を固定した。付与した水平変位(せん断変形)は 72mm であり、積層ゴムの総厚さ(8mm×6枚 = 48mm)の 150%に相当する。これは、道路橋支承 便覧によるレベル1 地震動に対する許容せん断ひずみに対応する<sup>10)</sup>。圧縮荷重については 設計死荷重である 6MPa の面圧を負荷した<sup>11)</sup>。

支承供試体に水平変位を付与すると、供試体上面端部のゴムと鋼製フレームの接触面において、ゴムがめくれるような変形が生じた。めくれ変形の大きさは約 21mm であり、被覆 ゴム厚よりも大きかった。これは、支承供試体は上部鋼板の端部で鋼製フレームと固定され ているのではなく、端部から 25mm 内側に入ったボルト位置で固定されているためである。

### b.-3 有限要素解析による支承供試体のひずみ分布予測

上述した方法でせん断変形を付与した支承供試体に対し、表面の被覆ゴムに生じるひずみ 分布を予測するため有限要素解析によるシミュレーションを実施した。解析モデルを図-2.3 に示す。解析には汎用プログラム ABAQUS Ver.6.13 を使用した。対称性を考慮し、ハーフ モデルを用いた。モデルは表層被覆ゴム、積層ゴム、内部鋼板および鋼製ジグを想定した載 荷ブロックで構成し、全ての部位で8節点ソリッド要素を用いている。実際の支承供試体と 同様に、上下部の鋼板と載荷ブロックは図-3に示すボルト位置で接続した。

表層ゴム部分における要素寸法は厚さ10mm を3分割し、縦横は5mm 以下とした。ゴムの材料特性は既往の研究<sup>12,13)</sup>で提示された構成則を用い、鋼は線形弾性体(ヤング率205GPa、 ポアソン比0.3)とし、載荷ブロックは剛体とした<sup>14)</sup>。

実際の支承供試体と同様、載荷ブロックに水平変位 72mm を付与した後、鉛直方向に面 圧 6MPa を与えた状態での変形性状を図-2.4(a)に、ひずみ分布を図-2.4(b)に示す。ひずみに ついては、最大主ひずみと、水平方向のき裂を発生させる要因となることが推測される縦方 向の公称ひずみの分布を示している。支承中心の外表面(x=220mm、y=110mm)では、最 大主ひずみの方向は支承の縦方向となっていることを確認した。また、水平変位を与えた方 向に直交する面において、上部から約 20mm の位置(z=90mm)で最大の引張ひずみが生じ た。水平変位により上部鋼板下端の角が表層ゴムを大きく変形させるため、この近傍の表層 ゴムに大きな引張ひずみが生じるものと考えられる。表層ゴムの公称引張ひずみの最大値は 約 40%であった。内側の積層ゴム端の公称引張ひずみは約 20%であった。

一方、実構造物においては、支承には桁および床版等の死荷重が鉛直方向に作用した状態 で、地震による水平変位が作用するのが一般的である。本研究での実験では支承供試体にせ ん断変形を付与した状態で固定するため、実構造物とは逆に水平変位を負荷してから鉛直荷 重を負荷している。このような載荷順序の違いがひずみ分布に与える影響を検討するため、 解析で鉛直荷重を負荷してから水平変位を与えた場合も実施した結果、水平変位を与えてか ら鉛直荷重を負荷した場合とのひずみの差は 0.1%以下であることを確認している。すなわ ち、載荷順序の違いが支承表面のひずみ分布に及ぼす影響は小さい。





# c. 低温環境下におけるオゾン劣化促進実験

## c.-1 実験装置

ゴム支承供試体のオゾン劣化促進実験を実施するために開発したオゾン発生器付恒温試 験装置の概要を写真-2.3 および図-2.5 に示す。環境試験槽の内寸は幅 1500mm、高さ 1000mm、 奥行 1000mm であり、上述の鋼製ジグを取り付けた支承供試体を 2 体同時に環境試験槽内 に設置できる。また、環境試験槽内の天井には伸長ジグを取り付けたダンベル試験片が 150 体以上吊り下げられる構造とした。



(a) 外観(閉扉時)

(b) 外観(開扉時)



図-2.5 オゾン発生器付恒温試験装置の概要

環境試験槽内には加熱冷却のための循環送風機が設置されており、使用温度範囲は-30℃ ~+50℃、精度は±2.0℃である。併設されているオゾン発生器の濃度可変範囲は 0pphm~ 150pphm である。

### c.-2 実験条件

既往の研究では、低温環境下においてゴム表面の耐候性保護膜が氷結等の作用で欠落す ることと、低温下での耐候性保護剤のゴム表面への再滲出が遅れることにより、オゾン劣 化による天然ゴム支承表面のき裂が発生しやすくなることが報告されている<sup>3)</sup>。そこで、 低温環境においてどの程度の時間で支承供試体の表面にき裂が発生するかを確認するため、 最初に温度-30℃、オゾン濃度 150pphm の最も厳しいと考えられる環境条件を与えて劣化促 進実験を実施した。

実験に使用したダンベル試験片の数量の内訳を表-2.2 に示す。老化防止剤を含まないものと含むものをそれぞれ 75 体ずつ使用した。75 体の試験片のうち、25 体ずつにそれぞれ異なる大きさの引張予ひずみを与えた状態でオゾン劣化促進実験に供した。予ひずみの大きさは、予ひずみなし(0%)に加え、上記で実施した解析で得られた公称引張ひずみの最大値に相当する 40%と、オゾン劣化をより促進させるために 75%とした。

支承供試体については、老化防止剤を含まないものと含むものそれぞれ1体ずつを、せん断変形量150%、面圧 6MPaの状態で実験に供した。

実験期間は96時間を1サイクルとして5サイクル(480時間)実施した。1サイクルごと に環境試験槽を開扉し、ダンベル試験片を5体ずつ取り出して、き裂の発生状況を確認した。 また、支承供試体についても1サイクルごとに表面のき裂発生状況を確認し、き裂が発生し たサイクルで環境試験槽から支承供試体を取り出し実験を終了した。

#### c.-3 実験結果

### 【ダンベル試験片のき裂発生状況】

低温条件でのオゾン劣化促進実験の結果を表 -2.3 に示す。ダンベル試験片を1サイクルごとに 環境試験槽から取り出し表面性状を観察した結 果、老化防止剤を含むものと含まないもの共に、 5 サイクル終了までの各サイクルにおいて目視 ではき裂は確認できなかった。マイクロスコー プ(倍率 100 倍)を用いて観察した結果、老化 防止剤を含まないダンベル試験片については、 予ひずみ量に関係なく1サイクル目から微細な き裂が発生していた。予ひずみを与えていない ダンベル試験片では部分的に数本のき裂が発生 していたのに対し、予ひずみ量が大きい試験片 では、ダンベル試験片全体に多数のき裂が発生

表-2.2	オゾン劣化促進実験時の

ダンベル試験片の数								
老化防止剤	予ひずみ (%)	数量						
	0	25						
なし	40	25						
	75	25						
	0	25						
あり	40	25						
	75	25						

していた。しかし、実験サイクルの進行と共にき裂が進展する傾向は確認できず、1~5 サ イクルのダンベル試験片においてき裂の発生状況はほぼ同じであった。一方、老化防止剤 を含むダンベル試験片では、予ひずみ量、実験サイクルに関係なく全てのダンベル試験片 でき裂の発生は確認できなかった。

### 【物性試験】

5 サイクル(480 時間)の低温オゾン劣化促進実験に供したダンベル試験片に対し、引張 試験を実施した結果を図-2.6 に示す。図には、引張試験より得られた老化防止剤なしおよ びありの各5体のダンベル試験片の伸び、引張強度および M100(ひずみ100%時の応力) の平均値(M)およびS(標準偏差)を示している。

老化防止剤なしのダンベル試験片については、オゾン劣化促進実験により生じたき裂に起

老化陆市刘	初期中能	予ひずみ (%)					
老伯奶亚剂	初期扒磨	0	40	75			
なし		部分的にき裂発生	全体的にき裂発生	全体的に き裂発生			
あり		e Water e 裂なし	き裂なし	き裂なし			

表-2.3 低温オゾン劣化促進実験におけるダンベル試験片の観察結果

因する物性値の変化が生じた。予ひずみ 0%の場合の伸び、引張強度および M100 の変化は わずかであるが、予ひずみ 40%、75%の場合の伸びおよび引張強度は初期状態に比べ約 13 ~20%低下した。M100 については、初期状態に比べほとんど変化がなかった。一方、老化 防止剤ありのダンベル試験片はオゾン劣化促進実験でき裂が発生しなかったため、物性値の 低下はほとんど生じていなかった。









図-2.6 低温オゾン劣化促進実験後の物性試験結果

# 【支承供試体のオゾン劣化促進実験結果】

5 サイクル(480 時間)の低温オゾン劣 化促進実験に供した支承供試体の外観を 図-2.7 に示す。支承供試体に対しせん断変 形を付与した方向に直交する面の観察結 果を示している。老化防止剤なしの支承供 試体は、オゾン劣化促進実験開始後2時間 程度で表面に多数のき裂が発生した。その 後、実験時間の経過と共にき裂の数が増加 し、観察面およびその裏面だけでなく、側 面も含め全ての面に多数のき裂が発生し た。すなわち、供試体に作用しているひず み分布に無関係に全面に多数のき裂が発 生した。一方、老化防止剤ありの支承供試 体は、1 サイクル(96時間)ごとに表面を 目視で観察したが、5 サイクル(480 時間) 終了後までき裂の発生は確認できなかっ た。

このように、既往の研究<sup>3</sup>の結果に基づ き改良された老化防止剤(耐候性保護剤) を使用している天然ゴム支承については、 低温環境下で高オゾン濃度に晒されても 十分な保護性能を発揮することが確認で きた。すなわち、近年報告されている積雪 寒冷地以外の地域における天然ゴム支承 表面のき裂発生の原因は、低温環境下にお ける老化防止剤の滲出性不足とは異なる と言える。よって次章では、異なる温度条 件においてオゾン劣化促進実験を実施し、 天然ゴム支承表面にき裂を発生させる実 験条件について検討する。





(b) 老化防止剤なしの支承供試体



- (c) 老化防止剤ありの支承供試体
- 図-2.7 低温オゾン劣化促進実験後の支承 供試体の外観

### d. 常温環境下におけるオゾン劣化促進実験

### d.-1 ダンベル試験片を用いたオゾン

### 劣化促進実験

支承供試体の表面き裂発生条件を探索するため、老化防止剤ありのダンベル試験片を用い、 c.と同様のオゾン劣化促進実験を異なる温度およびオゾン濃度条件で行った。オゾン劣化促 進実験の条件を表-2.4 に示す。各実験条件で使用したダンベル試験片の数は 25 体である。 実験温度は、実環境において一般に発生することが想定される常温(JIS 規定では 23℃)の 範囲を基本に、-15℃、0℃、23℃とした。24 時間ごとに環境試験槽の扉の窓から槽内を観 察し、き裂発生の有無を確認した。また、き裂の発生したサイクル(試験時間)で5 体のダ ンベル試験片を環境試験槽内から取り出し、目視およびマイクロスコープを用いてダンベル 試験片の表面観察を行った。

実験結果を表-2.4 および図-2.8 に示す。図-2.8 に示すように、各試験条件、試験時間で取り出した5体のダンベル試験片の全てに明らかなき裂の発生や破断が確認された条件では、表-2.4 のき裂発生あるいは破断の行に「o」を記載している。一方、目視およびマイクロスコープを使用してもダンベル試験片にき裂の発生が確認できなかった場合は「-」を記載している。

c.で実施した条件よりもやや温度が高い条件(1)(温度-15℃、オゾン濃度 150pphm)では、 96時間経過後もき裂の発生は確認できなかった。さらに、やや温度が高い条件(2)(温度 0℃、 オゾン濃度 150pphm)では、予ひずみ 75%の場合に 24時間経過後にき裂および破断が発生 した。すなわち、温度-30℃のような低温条件よりも 0℃程度の方が、高オゾン濃度の引張 ひずみ作用下でき裂が発生しやすいと言える。しかし、条件(3)のように、0℃よりもさらに 温度を上昇させ 23℃としても、オゾン濃度が 50pphm では予ひずみ量に関係なく 192 時間 経過後もき裂および破断は発生しなかった。以上の結果を踏まえ、条件(4)(温度 23℃、オ ゾン濃度 100pphm)で実験を実施したところ、予ひずみ量が大きいほど、早期にき裂およ び破断が発生する結果となった。

# d.-2 常温条件での支承供試体のオゾン 劣化促進実験

d.-1 で実施したダンベル試験片を用い たオゾン劣化促進実験の結果を踏まえ、 温度23℃、オゾン濃度100pphmの条件で 老化防止剤ありの支承供試体のオゾン劣 化促進実験を実施した。しかし、96時間 経過後も供試体表面にき裂の発生は確認 できなかった。厚さが2mmと薄く、表裏 両面からオゾンの作用を受けるダンベル 試験片に比べ、支承供試体の表層ゴムは



図-2.8 ダンベル試験片の劣化状況(温度 23℃, オゾン濃度 100pphm,予ひずみ 80%)

表-24	常温環境における	ダン	ベル試験	片のオン	ゾン劣化	· 促進実験条	牛および結果
<u> </u>		/ •	/ * H' WU//	/ * * * * * /	~ ~ _JIL	コルビベニノヘッハノト	

条件		(1)			(2)			(3)			(4)	
温度(℃)		-15			0			23			23	
オゾン濃度(pphm)		150			150			50			100	
予ひずみ (%)	0	40	75	0	40	75	0	40	80	0	40	80
	実験結果											
時間(hr)		96		9	6	24		192		192	144	24
き裂発生あるいは破断		_	_		_	0			_		0	0

オゾン作用の影響が小さくなる可能性を考え、やや温度を上げ、温度 40℃の条件で実験を 再開したところ、384時間経過後に供試体表面に図-2.9に示すようなき裂の発生を確認した。 き裂の発生位置は、b.-2 で実施した有限要素解析の結果から、最も大きな引張ひずみが発生 していると推定される領域(支承供試体に対しせん断変形を付与した方向に直交する面、上 下鋼板の角部近傍)であった。本実験で確認されたき裂の特徴は、実際に報告されている積 雪寒冷地以外の地域において供用開始から数年~10 数年経過したゴム支承の表面に発生し たき裂 <sup>10~12</sup>と類似していた。

なお、本実験で発生した最大のき裂の長さは約 30mm、深さは約 6mm であり、き裂は供 試体表面のゴム層に留まっており、内部の積層ゴムには到達していなかった。

### d.-3 考察

ゴム材料は、ガラス転移温度(Tg)よりも 50~100℃高い温度域(Tg+50~100℃)では低温になるほどオゾン劣化によるき裂の発生が抑制されることが知られている。一方、Tg+50~100℃よりも高温の領域になるとオゾン劣化の温度依存性の度合いは小さくなるものの温度が高くなるほどき裂が発生しやすい傾向があると言われている<sup>15)</sup>。天然ゴムのガラス転移温度 Tg は約-80℃<sup>100</sup>であり、Tg+50~100℃(-30~+20℃)は、積雪寒冷地に限らず一般地域において橋梁用天然ゴム支承が設置される環境の温度帯に対応している。一方、ゴム支承が日射を受ける場合や夏季においては支承表面の温度が Tg+50~100℃(-30~+20℃)を越えることは実測結果<sup>17</sup>からも明らかにされ、低温状態よりも頻繁に起こりうる常温状態の方が、オゾン劣化が進行しやすいと言える。

このように考えると、オゾン濃度が高いほど、また、作用する引張ひずみが大きいほどオ ゾン劣化によるき裂は発生しやすくなる。既往の研究では、オゾン濃度とき裂の成長速度は ほぼ直線的な関係にあることが報告されている<sup>18,19</sup>。本実験におけるオゾン濃度 100pphm

は、実環境において測定されたオゾン濃度(1~10pphm)<sup>17)</sup>の 10~100 倍である ことから、オゾン劣化促進実験における 高オゾン濃度の影響によるき裂発生時間 の促進倍率も 10~100 倍程度になると考 えられる。今後、高濃度オゾンによる劣 化促進実験と実際の環境におけるオゾン 濃度との関係を検討していく必要がある。

また、天然ゴムのオゾン劣化が進行し やすい伸長率(引張ひずみ)の領域は10 ~20%程度であることが示されている 19)。 実橋に設置されたゴム支承においても同 程度の引張ひずみが生じていることが報 告されており 3)、オゾン劣化促進実験に おいて 20%以上の大きな引張ひずみを付 与することはき裂の発生を促進させる効 果がある。しかし、高オゾン濃度で大き い引張ひずみを付与する促進実験におい ても、オゾン劣化が抑制される低温条件 ではき裂が発生しない場合があることを 一連の実験結果は示唆している。すなわ ち、天然ゴム材料のオゾン劣化に関連す る種々の因子の中で、引張ひずみと温度 の組み合わせが与える影響の度合いが大 きいと考えられる。



(a) 観察面(表側)のき裂発生状況





### e. 支承供試体に生じたき裂の補修法の提案

### e.-1 き裂補修方法

支承供試体に生じたき裂の補修方法の提案を行うため、上述のき裂が生じた支承供試体に 補修を施した。支承供試体に生じた微小なき裂(図-2.9(a)))と大き裂(図-2.9(b))に補修 を施した。本研究で用いた補修方法は被覆ゴムにコーティングする方法である。使用したコ ーティング材料は株式会社川金コアテックで開発された K-Coat-R である。K-Coat-R は耐候 性(耐オゾン性)、変形追随性、施工性を兼ね備えたコーティングである。被覆ゴムに CSM (クロロス施工性スルホン化ポリエチレン)を主成分としたコーティング材を塗布すること で道路橋支承便覧規格値の 10 倍以上の耐オゾン性の確保が可能である。また、ゴム支承の せん断変形に対してせん断ひずみ 300% 以上の追随性を達成している。さらには、既設お よび新設のゴム支承に適用可能であり、コーティング作業が簡単に行えるので補修に最適で ある。これらの橋梁用ゴム支承に必要な耐候性、変形追随性、施工性を K-Coat-R は兼ね備 えているため、この補修方法を選択した。

# 【微小き裂の補修方法】

微小き裂の補修工程は図-2.10 に示すように脱脂, プライマー塗布、CSM コーティングの 順に行った。プライマー塗布、CSM コーティング共に乾燥時間は 30 分程度である。後述の オゾン劣化促進実験で補修の有無による差異を確認するため、図-2.11 に示すようにき裂が 発生した面の半分のみとした。

# 【大き裂の補修方法】

大き裂の補修工程は図-2.12 と図-2.13 に示すようにざぐり、穴埋め、脱脂、プライマー塗 布、CSM コーティングの順に行った。き裂部分のざぐりでは、グラインダーを用いてクラ ックの除去をしている。また、微小き裂と同様、プライマー塗布、CSM コーティングの乾 燥時間は 30 分程度である。コーティング塗布範囲も微小き裂と同様に差異を確認するため、 供試体の半分にのみ塗布している(図-2.14 参照)。



図-2.10 微小き裂の補修工程



図-2.11 微小き裂のコーティング範囲



図-2.12 大き裂の補修工程1



図-2.13 大き裂の補修工程2

# e.-2 き裂補修後の支承供試体に対するオゾン劣化促進実験

き裂を補修した支承供試体に対し、d.-2 と同様の条件(オゾン濃度 100pphm、温度 40℃) でオゾン劣化促進実験を実施した。なお、比較のために新規の支承供試体も同時に実験槽内 に設置し実験を行った。

実験前、2 サイクル目終了時および4 サイクル目終了時の支承供試体の状況を図-2.15、図-2.16 および図-2.17 に示す。1 サイクル目終了時の外観変化の観察結果では、補修後の支承 供試体に大きな変化は見られなかった。2 サイクル目終了時の補修後支承供試体には線状の き裂が発生しており、最大長さは 22.8mm、最大幅は 1.50mm であった。き裂発生箇所は、 前側は未補修部の最大引張ひずみからやや離れた箇所であり、後側では未補修部のゴム表面 のロゴ上側の線上であった。

図-2.14 大き裂のコーティング範囲



(a) 前側 (b) 後側

(a) 前側

(b) 後側

図-2.16 補修後ゴム支承(2サイクル目終了時)



図-2.17 補修後ゴム支承(4サイクル目終了時)

3、4 サイクル目終了時の外観変化の観察の結果ではき裂の本数に大きな変化はなく、最後まで補修部にき裂は発生しなかった。き裂は進展しており、最大長さはそれぞれ 25.5mm、26.0mm、最大幅はそれぞれ 3.25mm、6.00mm であった。

一方、新規の支承供試体の初期状態、1 サイクル目終了時および 4 サイクル目終了時の様子を図-2.18、図-2.19 および図-2.20 に示す。

1 サイクル終了時の外観変化の観察結果で線状のき裂の発生が確認された。引張ひずみが 生じている箇所でき裂が発生しており、最大長さは 31.0mm であった。最大幅は 0.04mm で あった。深さは非常に浅く、計測不能であった。この結果から、荷重作用下における免震ゴ ム支承の表面には、高温(40℃)かつ高オゾン濃度(100pphm)の条件でき裂が発生するこ とが確認された。

2 サイクル目終了時にはき裂の本数が著しく増加しているのが確認された。また、き裂は 進展しており、最大長さは 36.0mm、最大幅は 1.55mm であった。き裂は非常に浅く、1 サ イクル目と同様に深さ方向の計測はできなかった。



(a) 前側

(b) 後側

図-2.18 新規ゴム支承(初期状態)



(a) 前側







(a) 前側

(b) 後側

図-2.20 新規ゴム支承(4サイクル目終了時)

3 サイクル目終了時では、き裂の本数の増加率は2 サイクル目と比較すると減少していたが、き裂の深さ方向に進展が見られた。き裂の最大長さは 39.5mm、最大幅は 2.80mm、最大深さは 1.75mm であった。

4 サイクル目終了時の外観変化の観察結果では、き裂の本数は3 サイクル目と大きな変化 はないが、き裂間での繋がりが見られ、大き裂が多数見られた。最大長さは100.05mm、最 大幅は 7.00mm、最大深さは 4.25mm であった。また、供試体表面のロゴ上側の線上に大き なき裂が見られた。

### e.-3 考察

オゾン劣化促進実験では、補修後供試体と新規支承供試体のき裂発生性状が異なる結果と なった。補修後供試体の補修部にき裂が発生していないのは、補修による効果であると考え られるが、補修していない箇所においても新規供試体と比べてき裂の発生が少なかった理由 については明確ではない。考えられる原因の1つとして、新規支承供試体と補修後支承供試 体では、せん断変形が作用した状態で保持されている期間が異なることが挙げられる。補修 後支承供試体は新規支承供試体に比べて1年ほど長い期間ひずみ(せん断変形)が作用し ており、その間に表面に老化防止剤が多く滲出している可能性が考えられる。これにより、 二つの供試体でき裂の発生性状が異なったものと推察される。

いずれにせよ、補修部からき裂の再発生がなかったことは本研究で採用した補修法の効果を示唆している。

### f. オゾン劣化促進実験後のゴム支承に対する載荷実験

#### f.-1 実験方法

ー連のオゾン劣化促進実験に供した支承供試体を用い、き裂の発生がゴム支承の力学性能 に与える影響を確認するため。また、補修部位におけるき裂の再発生、進展の有無を確認す るため、載荷実験を実施した。

オゾン劣化促進実験時に使用したせん断変形固定用の鋼製ジグを取り外した後、鉛直およ び水平方向載荷が可能な試験機を用いて実験を実施した。まず、圧縮変形量に及ぼすき裂の 影響を確認するため、鉛直方向に 20 秒間に 0~12MPa の範囲で三角波形による繰り返し荷 重を 3 回負荷した。また、初期水平剛性に及ぼすき裂の影響を確認するため、鉛直方向に 6MPa の一定荷重を負荷したまま、±175%のせん断変形に対応する水平変位(±84mm)を 0.5Hz の正弦波形で 3 回繰り返して負荷した。

### f.-2 実験結果

# 【老化防止剤なしの支承供試体の載荷実験結果】

老化防止剤なしの支承供試体に対する載荷実験の結果を図-2.21 に示す。老化防止剤なし の供試体は低温のオゾン劣化促進実験において供試体全面に多数の微小なき裂が発生した。 オゾン劣化促進実験前の健全な状態と比較すると、オゾン劣化促進実験後における圧縮変形 量は約 6%低下し、水平方向の初期剛性は約 8%増加した。しかし、オゾン劣化促進実験前 後の圧縮変形量は設計値±30%、水平方向の初期剛性は設計値±10%を満足していた<sup>18)</sup>。また、 載荷実験によるき裂の進展は確認されなかった。

【老化防止剤ありの支承供試体の載荷実験結果】

老化防止剤ありの支承供試体に対する載荷実験の結果を図-2.22 に示す。温度 40℃、オゾ ン濃度 150pphm でのオゾン劣化促進実験において、老化防止剤ありの供試体は大きい引張 ひずみが作用する領域にのみき裂が発生した。オゾン劣化促進実験後における老化防止剤あ りの供試体の圧縮変形量は健全状態と比べ約 1%増加したが、水平方向の初期剛性はほぼ同 じであった。老化防止剤なし、ありのいずれの供試体もオゾン劣化促進実験前後の圧縮変形 量は設計値±30%、水平方向の初期剛性は設計値±10%を満足していた<sup>11)</sup>。また、載荷実験に よるき裂の進展は確認されなかった。

### 【き裂を補修した支承供試体の載荷実験結果】

温度 40℃、オゾン濃度 150pphm でのオゾン劣化促進実験においてき裂が発生した支承供 試体に対し、健全状態、き裂発生後およびき裂を補修しさらにオゾン劣化促進実験を実施し た後の載荷実験を実施した結果を図-2.23 に示す。き裂が発生していても、また、そのき裂 を補修した後も支承供試体の圧縮変形量および水平剛性は健全状態とほぼ変わらなかった。 また、載荷実験によるき裂の進展は確認されなかった。



(a) 水平荷重---水平変位関係 図-2.21 老化防止剤なしの支承供試体に対する載荷実験結果



(a) 水平荷重--水平変位関係 図-2.22 老化防止剤ありの**支**承供試体に対する載荷実験結果



(a) 水平荷重--水平変位関係 図-2.23 き裂を補修した支承供試体に対する載荷実験結果

既往の実験<sup>20,21)</sup>や本研究におけるダンベル試験片による実験結果からも分かるように、 オゾンによる天然ゴム材料の劣化はき裂の発生が主であり、物性値の変化はほとんどない。 オゾン劣化促進実験で支承供試体の表層ゴムに発生したき裂が内部の積層ゴムにまで到達 すれば、支承の剛性等の力学性能が低下すると考えられるが、本実験で生じたき裂は表層ゴ ムに留まっており、内部の積層ゴムに到達していなかった。このため、本実験の範囲ではき 裂が支承供試体の力学性能に及ぼす影響は小さかったものと考えられる。

# g. まとめ

橋梁用天然ゴム支承の表層ゴムにおいて、オゾン劣化によるき裂を発生させる実験条件を明らかにするため、一連の検討を実施した。

得られた主な知見を以下に示す。

(1) 老化防止剤を含まないものと含むものの2種類の橋梁支承用の天然ゴムを用い、ダンベ

ル試験片(3号)および幅220mm、奥行き220mm、高さ108mmの支承供試体を作製した。支承供試体についてはせん断変形を保持するジグを用いると共に有限要素解析によるシミュレーションを行い、被覆ゴム表面に発生するひずみ分布を定量的に明らかにした。支承供試体に積層ゴムの総厚の150%のせん断変形を与えた場合、上部鋼板近傍の表層ゴムには最大約40%の引張ひずみが生じることを推定した。

- (2) ダンベル試験片には伸長ジグにより引張予ひずみを与え、支承供試体はジグによりせん 断変形を与えたままオゾン劣化促進実験を行った。オゾン濃度 150pphm、温度-30℃の 条件では、予ひずみの大きさに関係なく老化防止剤なしのダンベル試験片に 96 時間以 内にき裂が発生した。支承供試体の表面には実験開始から約2時間で微細なき裂が発生 し、時間の経過と共にき裂の数が増加した。き裂は支承供試体表面のひずみ分布に関係 なく全面に多数発生した。
- (3) (2)と同様のオゾン濃度 150pphm、温度-30℃の条件では、予ひずみの大きさに関係なく 480 時間経過後も老化防止剤ありのダンベル試験片および支承供試体にはき裂が発生し なかった。また、オゾン劣化促進実験後の物性値の変化も確認できなかった。
- (4) 老化防止剤ありのダンベル試験片に対し種々の条件でオゾン劣化促進実験を実施した結果、オゾン濃度100pphm、温度23℃の条件では、予ひずみ量が大きいほど早期にき裂および破断が発生することを確認した。同じ条件では支承供試体にはき裂が発生しなかったが、温度を40℃にした場合、せん断変形により支承供試体表面において最も大きな引張ひずみが発生していると推定される領域にき裂が発生した。
- (5) 高オゾン濃度で大きい引張ひずみを付与する促進実験においても、オゾン劣化が抑制される低温条件ではき裂が発生しない場合があることを一連の実験結果は示唆していた。 すなわち、天然ゴム材料のオゾン劣化に関連する種々の因子の中で、引張ひずみと温度の組み合わせが与える影響の度合いが大きいと考えられる。
- (6) オゾン劣化促進実験により支承供試体に発生したき裂の補修方法を提案した。補修後の 支承供試体をオゾン濃度100pphm、温度40℃の条件で劣化促進実験に供した結果、き裂 補修部からのき裂の再発生および進展はなかった。
- (7) 一連のオゾン劣化促進実験によりき裂が発生した支承供試体ならびにき裂を補修した 供試体に対し、鉛直方向および水平方向載荷実験を行った。オゾン劣化促進実験による き裂は表層ゴムに留まっており、内部の積層ゴムに到達していなかったため、き裂が支 承供試体の力学性能(圧縮変形量および水平剛性)に及ぼす影響は小さかった。また、 載荷実験後においてもき裂の進展は確認されなかった。

# 参考文献

- 1) 宇佐美民雄、渡邊正夫、橘田敏之、米浜光郎、林 邦明、長野悦子:ゴム支承の経年変化 と静的特性、日本ゴム協会誌、Vol.54、No.3、pp.174-183、1981。
- 2) 深堀美英:免震積層ゴムの長期劣化特性予測、日本ゴム協会誌、Vol.69、No.4、pp.233-246、 1996。
- 3) 杉本博之、溝江 実、山本吉久、池永雅良: 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究、土 木学会論文集 No.693/VI-53、pp.73-86、2001。
- 4) 鵜野禎史、行本直人:ゴム支承の表面亀裂に関する研究、土木学会第64回年次学術講演 会講演概要、VI-385、2009。
- 5) ゴム支承協会: 平成 19 年新潟中越沖地震を受けたゴム支承の調査報告書、ゴム支承協会 技術資料、2009。
- 6) 井口祐樹、杉本義博: 点検時措置による構造物の耐久性向上、平成23年度国土交通省近 畿地方整備局研究発表会論文集、新技術・新工法部門、No.11、2011。

- 7) 山田金喜、曽田信雄、木水隆夫、広瀬 剛、名古屋和史、鈴木基行:東北地方太平洋沖地 震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討、構造工学論文集、Vol.59A、 pp.527-539、2013。
- 8) 枦木正喜、竹之井 勇、積層ゴム支承の性能に影響を及ぼす諸因子に関する実験的検討、 土木学会第68回年次学術講演会講演概要、I-037、2013。
- 9) 日本規格協会:加硫ゴムの引張試験方法 JIS K6251、1993。
- 10)日本道路協会:道路橋支承便覧、2004。
- 11)ゴム支承協会:道路橋支承便覧ゴム支承ガイドブック、2005。
- 12)吉田純司、阿部雅人、藤野陽三:高減衰ゴム材料の構成則、土木学会論文集、No.710/I-60、 pp.209-224、2002。
- 13)吉田純司、阿部雅人、藤野陽三:高減衰積層ゴム支承の3次元有限要素解析法、土木学 会論文集、No.717/I-61、pp.37-52、2002。
- 14)伊藤義人、佐藤和也、顧浩声、山本吉久:橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究、土木学会論文集A、Vol.62、No.2、pp.255-266、2006。
- 15)斉藤孝臣:各種ゴムの劣化機構、日本ゴム協会誌、Vol.68、No.5、pp.284-295、1995。
- 16)山田聿男:特殊ゴムの特性と配合、日本ゴム協会誌、Vol.82、No.1、pp.20-26、2006。
- 17)Paramashanti, Yasuo Kitane, Yoshito Itoh: Long-term Performance of Rubber Bearing Considering Solar Radiation Effect, Journal of Structural Engineering, Vol.56A, pp.687-700, 2010.
- 18) 久留宮弘幸:オゾン劣化試験方法とその評価方法、日本ゴム協会誌、Vol.40、No.4、 pp.270-289、1967。
- 19) 久留宮弘幸:ゴム科学の現状特集号 劣化、日本ゴム協会誌、Vol.45、No.2、pp.184-206、 1972。
- 20)伊藤義人、矢澤晃夫、佐藤和也、顧浩声、忽那幸浩、山本吉久:橋梁支承用ゴムの環 境劣化特性に関する基礎的研究、土木学会論文集 No.794/I-72、pp.253-266、2005。
- 21)伊藤義人、佐藤和也、顧浩声、山本吉久:橋梁支承用天然ゴムの長期劣化予測に関する基礎的研究、土木学会論文集 No.801/I-73、pp.185-196、2005。

-	市内市田の市ににおりませい 影士
1	
••	

刊行書籍又は雑誌名(雑誌のときは	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
雑誌名、巻号数、論文名)			
日本材料学会東海支部第8回学術講演	平成 26 年	日本材料学会	Wang Shen,
会講演概要集、	3月3日		廣畑幹人、
pp.9-10			伊藤義人
The Influence of Environmental			
Degradation Factors on Cracks of			
Base-isolated Rubber Bearings under			
上oading	亚武 26 年	十十世人	伊茲美人
工个子云第 $09$ 回牛沃子州碑俱云碑俱 椰西隹 (CD POM) $nn 111 112$	十成 20 平	工小子云	伊滕我八、 鹿畑松人
(M安乗 (CD-ROM)、pp.111-112 古舌か上が理協田子佐田下にわける	9月10日		便)//// // // // // // // // // // // // /
何里ねよい埰現四丁作用下にわける			注 땪
元辰コム文承切さ表先生に関する本			
日本材料学会東海支部第9回学術講演	平成 27 年	日本材料学会	藤本勝之、
会講演概要集、	3月4日		廣畑幹人、
pp.75-76			伊藤義人
荷重作用下における橋梁用免震ゴム			
支承のオゾンクラック発生およびク			
ラック補修性能評価			
構造工学論文集 Vol. 61A、pp.302-312	平成 27 年	土木学会	廣畑幹人、
環境劣化因子とひずみによる天然ゴ	3月		伊藤義人、
ム支承のき裂発生に関する基礎的研			汪 深
究(第61回構造工学シンポジウム論			
文賞受賞)			

# 8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし				

9. 成果の実用化の見通し

本研究で得られた成果により、鋼橋の防食塗装および免震ゴム支承に対し、荷重および環 境因子の相互作用がそれらの劣化挙動に影響を及ぼすことが実験的に明らかになった。この 一連の過程で提案した種々の実験方法を駆使してさらなるデータの蓄積を継続していくこ とで、防食塗装および免震ゴム支承の長期劣化予測が実施できる可能性が考えられる。

# 10. その他

特になし。

(注)

- 用紙の大きさは、日本工業規格で定めるA列4とし、縦位置左綴とすること。
   各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。記入量に応じて、適宜、欄を引き伸ばして差し支えない。
- 「研究課題名」について 平成26年度建設技術研究開発費補助金交付申請書に記載した研究課題名を記入する こと。
- 「研究期間」について
   当該研究課題について補助金が交付された期間(年度)を記入すること。
- 4. 「代表者及び研究代表者、共同研究者」について
- (1)「代表者は1人又は1法人を記入すること。研究代表者は1人を記入すること。共同 研究者は、研究に参加している者全てを記入すること。
- (2) 研究組織の変更により代表者又は研究代表者を交替している場合は、交替後の研究者 名を記入すること。
- 5. 「6. 研究・技術開発の内容と成果」について
- (1) 当該研究期間に行った研究によって得られた成果を、各年度の交付申請書の「研究・ 技術開発の目的及び目標」「本年度の実施計画」と対比させてわかりやすく記入する こと。
- (2) 主要な研究方法、手段等の経過を詳細に記入すること。
- 6. 「7. 研究成果の刊行に関する一覧表」について
- (1) 記入した書籍又は雑誌については、その刊行物又は別刷り一部を添付すること。
- 7. 「8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況」
- (1) 説明上必要な書類を、適宜、添付すること。
- 8. 「9. 成果の実用化の見通し」について
- (1)研究・技術開発の成果による実用化について、具体的な計画がある場合にはその内容 を記載すること。