

令和 3 年度「重点研究課題」調査研究報告書

研究課題名：300 年の超長期暴露を目指した土木構造物の持続性に関する研究

研究代表者：松本高志（北海道大学）

（推薦委員会：複合構造委員会）

土 木 学 会

はじめに

本報告書は、土木学会の令和3年度重点研究課題として採択された「300年の超長期暴露を目指した土木構造物の持続性に関する研究」について、複合構造委員会の土木構造物の300年暴露プロジェクト小委員会が2021年度に活動して得られた成果をまとめたものである。

本研究に先立つ取り組みとして、平成24年度重点研究課題「土木構造物の持続性を考慮した300年プロジェクトに関する研究」が複合構造委員会の300年プロジェクト小委員会により2012年度に実施されている。ここでは、超長期暴露試験をターゲットとした300年プロジェクトの実現に向けての課題とその解決方法を調査研究しており、実際の暴露試験の方法や、プロジェクト推進上の具体的な問題点と対応方法および実施体制について成果を取りまとめている。

本研究は、この先行研究の成果に基づいて、構造の観点から検討を加えつつ暴露試験実施へと進めたものである。第1章では鋼材、コンクリート、FRPの3種類の材料ごとに先行研究の成果を踏まえた材料レベルの暴露試験の内容の検討と本研究の下での意義の検討を行っている。第1章の検討結果に基づき、第2章では、複合構造物における長期耐久性を実現させるための構造や対策を検討した上で試験体の形状や仕様を決定し、超長期暴露試験計画の立案を行っている。ここでは、鋼とコンクリート接合部、FRP、積層ゴム支承、押抜き試験を対象としている。第3章では実施関係の検討を進めており、第2章の試験計画の内容を受けて、実施に向けた場所の選定と積層ゴム支承の暴露試験実施要領についてまとめている。第4章は、コンクリート系、金属系、鋼・コンクリート複合構造、FRP、ゴムについて、既往の暴露試験の現状と課題抽出を行っている。最後に、第5章では、産官学の役割と300年超長期暴露への期待について述べている。

近年、我が国では社会インフラの老朽化が問題となり、高度経済成長期に建設された鋼構造物およびコンクリート構造物の更新が本格化している。こうした状況の経験を経て、新設橋梁には、適切な維持管理が行われることを前提に、性能を発揮することを期待する期間として設計供用期間を定めることとし、100年を標準とするようになった。

300年はこの3倍の期間であり、このような設計供用期間を有する構造物の実現には、着実な改善とともに発想の転換も求められるであろう。先行研究と本研究をあわせても、この挑戦はやっと端緒にいたばかりである。今後、300年の超長期暴露試験を踏まえた超長期設計耐用期間を有する構造物の実現に向けて、他の調査研究委員会も含めた、土木学会全体での議論と取り組みに発展することを期待する。

最後になるが、本小委員会では、鋼、コンクリート、FRP、ゴムの材料・構造分野において知見と経験を有する委員に参加を頂いた。本報告書を取りまとめるにあたって、多大なるご尽力を頂いた委員各位、特に、大久保幹事長、大山幹事、北根幹事、皆田幹事には、この場を借りて謝意を表する。

2022年3月

土木学会 複合構造委員会
土木構造物の300年暴露プロジェクト小委員会
委員長 松本 高志

土木学会 複合構造委員会
土木構造物の 300 年暴露プロジェクト小委員会

委員構成

委員長	松本 高志	北海道大学
幹事長	大久保宣人	高田機工
幹 事	大山 理	大阪工業大学
	北根 安雄	京都大学
	皆田 龍一	三井住友建設鉄構エンジニアリング
委 員	石田 学	太平洋マテリアル
	今井 隆	ゴム支承協会（ビー・ビー・エム）
	川端雄一郎	港湾空港技術研究所
	久保 圭吾	宮地エンジニアリング
	斉藤 成彦	山梨大学
	齋藤 隆	大林組
	櫻庭 浩樹	土木研究所
	塩畑 英俊	東日本高速道路
	平 陽兵	鹿島建設
	武野 正和	日本製鉄
	内藤 英樹	東北大学
	中村 一史	東京都立大学
	仁平 達也	鉄道総合技術研究所
	橋本国太郎	神戸大学
	姫野 岳彦	日本支承協会（川金コアテック）
	牧 剛史	埼玉大学
	松井 孝洋	東レ
	山本 将士	日本ファブテック

WG 構成

WG1（暴露計画）：皆田龍一（主査），石田学，今井隆，久保圭吾，斉藤成彦，齋藤隆，塩畑英俊，武野正和，橋本国太郎，姫野岳彦，松井孝洋

WG2（暴露実施）：大山理（主査），今井隆，川端雄一郎，久保圭吾，櫻庭浩樹，平陽兵，中村一史，姫野岳彦，山本将士

WG3（文献調査）：北根安雄（主査），櫻庭浩樹，武野正和，内藤英樹，仁平達也，牧剛史

目 次

第1章 材料ごとの暴露試験の検討	1
1.1 鋼材	1
1.1.1 方針	1
1.1.2 試験体の選定	1
1.1.3 試験方法と評価項目	3
1.1.4 暴露試験実施にあたっての再検討	3
1.2 コンクリート	4
1.2.1 方針	4
1.2.2 試験体の選定	4
1.2.3 試験方法と評価項目	5
1.2.4 暴露試験実施にあたっての再検討	5
1.3 FRP	5
1.3.1 暴露試験の方針	5
1.3.2 材料レベル	6
1.3.3 部材レベル	6
1.3.4 想定される課題	6
第2章 300年超長期暴露試験の計画	8
2.1 超長期暴露試験の概要	8
2.2 複合構造物における長期耐久性を実現させるための構造	8
2.2.1 鋼とコンクリート	8
2.2.2 FRP	10
2.2.3 積層ゴム支承	11
2.3 超長期暴露の試験計画	12
2.3.1 鋼とコンクリートの接合部	12
2.3.2 FRP	15
2.3.3 積層ゴム支承	16
2.3.4 ずれ止め	19
第3章 300年超長期暴露試験の実施	27
3.1 はじめに	27
3.2 暴露試験場の選定	27
3.2.1 朝霧屋外暴露場	27

3.2.2	港湾空港技術研究所	29
3.2.3	大阪工業大学 八幡工学実験場	30
3.3	積層ゴム支承の暴露試験実施要領	31
3.3.1	試験体の製作	31
3.2.2	力学試験の初期値	33
3.4	まとめ	34

第4章 既往の暴露試験の実績調査と課題抽出 36

4.1	調査の方針	36
4.2	実績調査	36
4.2.1	コンクリートと鉄筋コンクリート	36
4.2.2	金属系材料	36
4.2.3	鋼・コンクリートの複合構造	37
4.2.4	FRP	37
4.2.5	ゴム	38
4.3	課題	39

第5章 300年超長期暴露への期待 42

5.1	土木構造物の耐久性の必要性	42
5.2	産官学のそれぞれの役割	42
5.3	300年超長期暴露への期待	43

第1章 材料ごとの暴露試験の検討

1.1 鋼材

1.1.1 方針

2012年6月複合構造委員会に設置された「300年プロジェクト小委員会」では、300年プロジェクトの設立趣旨に沿って「300年という超長期耐久性に対する挑戦」と「現在の技術への説明責任」の2つの視点に基づいて、超長期暴露試験方法の検討が行われている。1つ目の視点をグレード1「最も自信のある品」、2つ目の視点をグレード2「上級の普及品」として、試験方法のグレード分けが行われた。

本小委員会では、鋼材単体の超長期暴露試験を実施するにあたって「普及鋼材を大気環境中で300年間暴露した場合の腐食状況の経過確認」を目的として、グレード1「腐食因子による影響が小さい大気環境中で、不導体被膜の形成により300年間ほとんど腐食が生じない構造用鋼材」、グレード2「腐食因子による影響が小さい大気環境中で、適切な維持管理により300年間腐食を抑制できる構造用鋼材」と設定して材料の選定を行い、暴露試験方法について検討した。

1.1.2 試験体の選定

(1) 材料・材質

材料の選定にあたっては、高耐食性金属材料を対象とした。塗装等の表面被覆による防食方法の耐久性は、施工条件や構造的（かど部等）な要因で塗料等の付着状況による影響が大きいため、材料単体（試験片）では構造物としての耐久性を確保するための知見や試験データ等を得ることは困難との判断により、本検討では対象外とした。試験体の候補として選定した材料は下記のとおりである。

グレード1：ステンレス（JIS G 4304）、チタン（JIS H 4600）

グレード2：耐候性鋼材（JIS G 3114）

ステンレス鋼は、フェライト系、二相系、オーステナイト系等、数多くの鋼種があるが、主要なステンレス鋼である SUS304 を試験体の候補とした。ステンレス鋼の大気暴露試験は様々な場所で実施されており、（一社）日本鋼構造協会では過去の暴露試験結果を整理し、耐さび性に及ぼす鋼種グレードと地域の腐食性の影響について取り纏めている^{1,1)}。

高い耐食性能を有するチタンは、意匠材として飛来塩分の多い厳しい腐食環境にある恒久的建築物に適用されはじめ、土木分野ではクラッド鋼として海洋構造物、発錆した鋼構造物の部分補修でチタン被覆が適用されている。検討段階では、チタンの暴露試験は数多く実施されていないことから、300年にわたる超長期の耐食性を示すデータを得ることは有意義であると判断してグレード1の試験体候補とした。

耐候性鋼材は保護性さび形成を補助するため、特殊プライマーやトップコートによる表面処理を施す場合がある。耐候性鋼用表面処理剤（以下、処理剤）の仕様の違いによる経年変化の違いを明らかにする目的で実施された暴露試験では、環境と仕様の違いにより経年変化にばらつきがあることが報告されている^{1,2)}。また、処理剤は暴露初期の保護性さび生成に影響するが、300年にわたる超長期暴露での影響は軽微であると考えられるため、処理剤は使用せず裸仕様とする。

(2) 形状

試験体の概要を図 1.1.1 に示す。

a) 寸法

試験体の寸法は、JIS Z 2383「大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法」に倣って 100mm×150mm とする。ただし、使用・設置できる暴露架台の仕様によっては変更する。

b) 板厚

試験体の板厚は、腐食減耗量を考慮して設定する。耐候性鋼材の耐腐食性能レベルⅡでは、腐食減耗量が片面 1.0mm/100 年以下であることを目標としている。300 年後の腐食減耗量を考慮して、耐候性鋼材の板厚は 19, 22, 25mm を候補とする。試験体の重量測定で、試験体が重くなると微小な重量変化を正確に計測できない可能性がある（25mm で約 3kg）ため、回収年数（腐食減耗量）によって試験体の板厚を変えるなどの対応をする。

c) その他

- ・試験体取付け孔：暴露架台に設置できる位置・孔径
- ・かど面処理：糸面取り
- ・表面处理：耐候性鋼材は黒皮をブラストで除去（除錆度 Sa 2 1/2）
- ・標識：長期間、試験体の種類を示すために刻印とする。

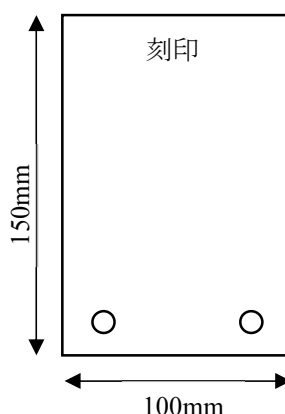


図 1.1.1 試験体の概念図

(3) 試験体数

a) 試験体回収回数

- ・耐候性鋼材は、初期の腐食減耗量予測が重要であるため、1 年、3 年、5 年、10 年、30 年（以降、30 年間隔）として 14 回分とする。
- ・ステンレスの初期腐食確認のための回収年数は、耐候性鋼材と同じ回収回数とする。
- ・チタンは 300 年後 1 回とする。

b) n 数

外観観察と腐食減耗量の計測を同じ試験体で実施することとして n 数は 1 とする。

c) 暴露試験場数

腐食因子による影響が小さい大気環境中の 1 箇所とする。

d) 試験体数

試験体数は下記のとおりとする。

- ・耐候性鋼材：1種類×14回（回収回数）×1（n数）×1箇所（暴露試験場）＝14体
- ・ステンレス：1種類×14回（回収回数）×1（n数）×1箇所（暴露試験場）＝14体
- ・チタン：1種類×1回（回収回数）×1（n数）×1箇所（暴露試験場）＋予備1＝2体

1.1.3 試験方法と評価項目

(1) 大気暴露試験方法

直接暴露試験方法とする。直接暴露試験装置の要求事項^{1.3)}を表1.1.1に示す。

表 1.1.1 直接暴露試験装置の要求事項^{1.3)}

No.	要 求 事 項
1	日照，雨，風などの大気環境に試験体を直接に暴露することができる構造とする。
2	試験体に試験の目的以外の外力が加わらないように，暴露架台に試験体を直接取り付けられるか，または暴露架台の試験体保持枠に取り付けて固定できる構造とする。
3	日陰，水滴の落下，試験体以外の腐食生成物などによる汚染などが，暴露試験期間中の試験体に影響を与えない構造とする。

(2) 評価項目

a) 初期試験

- ・ミルシート（化学成分，引張強度），寸法，質量。

b) 暴露試験開始後および終了時

- ・引張強度は，適切な非破壊検査方法が確立された場合に実施する。
- ・外観観察，写真撮影
- ・耐候性鋼材は腐食減耗量を計測する（JIS Z 2371，JIS H 8502）。
- ・ステンレスとチタンはさび発生度（レイティングナンバ）で評価する。

1.1.4 暴露試験実施にあたっての再検討

超長期暴露試験を実施するにあたって，複合構造部材を考える際に材料を組み合わせる上で，鋼板単体の超長期暴露試験によって新たに耐久性に関する知見や試験データを取得する必要性や，300年保たせる構造物を実現するにはどうすればよいかという視点で再検討を行った。

鋼橋の計画時におけるLCCの算出において，過去の暴露試験や促進試験等の結果を踏まえて（一社）日本橋梁建設協会等から鋼材の各防食仕様の耐用年数を明記した資料が発行されており^{1.4)}，実務上，発注者やコンサルタントもこれらに基づいて設計を行っている。提示されている耐用年数の信頼性という点については，あくまで机上の計算であり，耐用年数は施工の良否や使用環境に大きく影響されるが，これを証明するために鋼板単体で超長期暴露試験を実施するのはそぐわないと考えられる。耐用年数は塗り替え等の維持管理を判断するものではなく，あくまで維持管理における更新は点検結果に基づいて行われるものである。防食性能を高めるため，防錆上の弱点となる箇所（桁端部，下フランジ，継手部等）は増し塗りをすることが標準仕様となっている場合がある^{1.5)}。増し塗りは一般部にも適用されることがあるが，塗料の膜厚が増えた分だけ耐用年数が増えるという考えで評価されている。また，この30年でもポリウレタン，ふっ素，金属溶射等，高耐久の防食仕様が開発，実用化されており，今後も維持管理，更新の仕様も

様変わりする可能性が高いと考えられる。以上により、鋼板単体で超長期暴露試験を実施することで、有益な結果や新たな知見は得られ難いと判断し、鋼板による超長期暴露試験は実施しないこととした。

1.2 コンクリート

1.2.1 方針

セメント系材料に関しては過年度の「300 年プロジェクト小委員会」において、詳しく超長期暴露試験方法の検討が進められており^{1.6)}、ここでグレード分けを行う提案がなされている。

本小委員会では、セメント系材料の代表としてコンクリートを取り扱うとし、コンクリート単体の超長期暴露試験における「300 年間暴露した場合の材料劣化の経過確認」を目的として、グレード 1 での「300 年間の超長期耐久性の実現」と、グレード 2 の「一般材料の長期耐久性配合の性能確認」の 2 種類を設定し、詳細な試験内容を検討することとした。

1.2.2 試験体の選定

(1) 材料・材質

材料の選定にあたっては、過年度の「300 年プロジェクト小委員会」で記載されているセメント種別および強度設定を踏襲することとした。試験体の候補として選定した材料は下記のとおりである。

グレード 1：300 年間超長期耐久性の実現を目指した材料

- ・シリカフェウムセメント(W/C：20%以下、圧縮強度 150～200N/mm²)

グレード 2：一般材料の長期耐久性配合

- ・普通ポルトランドセメント（圧縮強度 60～100N/mm²）

ただし、グレード 2 は一般的な材料と言いながら、多くの構造物で用いられている標準的な強度設定ではないため、ある程度は劣化することを想定してグレード 1,2 の効果を見るための基準となるグレード（例えばグレード 2 よりも強度を低くしてグレード 3 とする等）の試験体を必要に応じて設定することとした。

(2) 形状

試験体の寸法は JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」の圧縮強度試験用供試体に従い、φ10cm×h20cm の円柱供試体とする。

(3) 試験体数

a) 試験体回収回数

初期測定のための回収を 1 か月後もしくは 3 か月後として、1 年、3 年、5 年、10 年、30 年（以降、30 年間隔）の 14 回分とする。

b) n 数

圧縮強度試験を実施するため試験体の n 数は 3 とする。

c) 暴露試験場数

大気環境中の 1 箇所もしくは 2 箇所とする。

d) 試験体数

試験体数は下記のとおりとする。

グレード 1 供試体：1 種類×14 回（回収回数）×3（n 数）×1(2)箇所（暴露試験場）＝42(84)体

グレード 2 供試体：1 種類×14 回（回収回数）×3（n 数）×1(2)箇所（暴露試験場）＝42(84)体

1.2.3 試験方法と評価項目

(1) 大気暴露試験方法

鋼材、FRP 等の供試体と同じ環境下で、接地面の影響を受けないように暴露を行う。

(2) 評価項目

a) 観察

- ・ 外観観察

b) 計測

- ・ 供試体寸法（直径、長さ）計測
- ・ 圧縮強度試験（JIS A 1108）
- ・ 中性化深さ計測（JIS A 1152）
- ・ その他（ビッカース硬さ試験、動弾性係数測定、EPMA 分析、透過率測定等から選択）

1.2.4 暴露試験実施にあたっての再検討

コンクリート（セメント系材料）単体の暴露試験において最も問題となる点は、鋼材で腐食が進展していくような明確な劣化の兆候がわかりにくく、耐久性の観点から性能喪失の判断指標の設定が難しいことである。圧縮強度が低下したとしても、設計強度を下回ったことですぐに性能が喪失されたと判断されることは現実的でなく、例えば、強度の低下幅が目標範囲内であればよいという判断が十分にあり得ると考えられる。

また、一般的なコンクリート構造物の劣化は、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に起因するようなひび割れが多く、コンクリート床版劣化部の土砂化や、ASR による鉄筋破断のような特殊な事例を除いては、セメント系材料単体の経時劣化が耐荷性に顕著な影響を及ぼすことは考えにくい。

さらに、厳しい環境下における鉄筋コンクリート構造物であっても、塗装等の予防保全的な処置により、耐久性が改善されることも先行する様々な実験^{1,7)}等により確認されており、維持管理時における劣化後の断面補修やひび割れ注入等によっても耐久性は大きく回復する。

以上により、鋼材に対する超長期暴露試験の再検討結果と同様に、セメント系材料単体においても超長期暴露試験を実施することで新たな知見は得られ難いと判断し、単体での超長期暴露試験は実施しないという結論とした。

1.3 FRP

これまでの暴露試験および耐久性に関する知見をもとに、FRP 材料に関する 300 年暴露試験の意義および方針について検討を行った。以下に、暴露試験の方針と想定される課題についてまとめる。

1.3.1 暴露試験の方針

FRP の暴露試験結果はこれまでに存在するが、超長期の暴露試験はこれまでに情報がないこと、また土木構造物に使用されるような厚板の FRP の板厚方向の劣化進展については、劣化進展速度に関する定量的な知見が存在しないことから、FRP の材料レベルでの暴露試験結果は有益であると判断し、材料レベルでの暴露実験を実施する。

歩道橋や水門の構造部材に使用される構造部材では、耐久性を確保するために、表面保護層を設けることが前提となっており、材料レベルの暴露試験体においても、表面保護層を設けた試験体を用いて暴露試験を実施することが考えられるが、FRP 合成床版のように直射日光が当たらない部材では、表面保護層を設けずに使用されていることがある。また、表面保護層を有する試験体では、表面保護層が存在するうちは、表面保護層の劣化試験となり、FRP 部材の剛性や強度の変化を十分に評価できないため、表面保護層を有する試験体だけではなく、表面保護層を設けない試験体の暴露試験も実施する。

さらに、材料レベルの暴露試験だけでなく、部材レベルでの暴露試験を実施することにより、FRP 部材内の異なる部位での劣化や、FRP 部材どうしのボルト接合部、FRP 部材どうしの接着接合部、FRP と鋼との接着接合部、FRP とコンクリートとの接着接合部等の長期耐久性の評価が可能となり、FRP を用いた土木構造物の維持管理において非常に有益な知見を得られることが予想されるため、本小委員会での実施は難しいが、将来的に実施の可能性について検討するのがよい。

1.3.2 材料レベル

材料レベルの暴露試験の目的は以下のように設定する。

- ・FRP の板厚方向の劣化がどのように進むのかの知見が少ないため、超長期暴露試験の実施により、板厚方向の劣化進展について、定量的に明らかにする。また、異なる材料（たとえば、GFRP と CFRP）でも板厚方向の劣化進展が異なることが予想されるため、材料の違いによる板厚方向の劣化進展の違いを明らかにする。
- ・300 年の超長期暴露となるため、表面保護層または FRP 自体の劣化程度が大きいと判断された場合は、補修等の維持管理行為を実施し、その効果を確認する。

材料レベルの試験体は板材とし、試験体のパラメータとしては、材料の違い（GFRP、CFRP、ハイブリッド FRP (HFRP)）、表面保護層の有無とする。また、暴露試験中の計測項目としては、写真撮影、外観観察、光沢度・色差・重量・板厚の計測、破壊試験となる SEM 観察や顕微 IR 分析等が想定される。さらに、劣化による材料特性の変化を定量的に把握するため、引張試験や層間せん断試験等の材料試験を定期的実施する。また、実施場所については、標高が高く紫外線量の多い、土木研究所朝霧屋外暴露場で実施する。

具体的な試験体の詳細については、第 2 章で記載する。

1.3.3 部材レベル

部材レベルの暴露試験は、上述のように、部材内の異なる部位での劣化程度の違いの評価や、接合部の長期耐久性に関する知見の収集に非常に有益であるが、費用および暴露場所等のさまざまな制約から、現時点では、具体的な計画を立案しない。ただし、土木研究所の朝霧屋外暴露場に暴露されている FRP トラス橋について、将来的な利用計画が決まっていないため、300 年暴露プロジェクトで利用することも可能であることの情報提供がなされた。構造物としてすでに 30 年暴露されているものであり、今後も暴露を続け、経過観察および必要に応じて材料試験や部材試験を行うことができれば、構造物内で暴露された部材の劣化特性に関する知見が得られる。

1.3.4 想定される課題

議論の中で明らかとなった、FRP 材料の超長期暴露試験に関する課題を以下にまとめる。

- ・材料レベルでの超長期暴露試験において、鋼製の暴露架台を使用した場合、FRP 材料の劣化より、暴露

架台の劣化が進み、暴露架台のメンテナンスに苦勞することが想定される。超長期暴露を想定した暴露方法を考慮する必要がある。その一つとしては、FRP 溝形材等、暴露架台なしで自立できる部材を地面に設置し、試験体としては、そのウェブのみを対象とすること等が考えられる。

- ・暴露試験だけでなく、促進試験を実施し、暴露試験と促進試験との対応関係が明らかになれば、今後 FRP の耐久性に関して非常に有用な知見となる。
- ・劣化程度が大きくなると補修等の維持管理行為を実施することになっているが、その方法や使用材料等は、実際に補修する時点での技術で行うことになり、暴露試験中同じ技術で補修を繰り返すことにはならないことが予想される。ただし、補修時点での最新技術で補修し、300 年間性能が確保できるのであれば問題ない考える。

参考文献

- 1.1) (一社) 日本鋼構造協会 ステンレス技術標準委員会材料小委員会：ステンレス鋼の耐さび性に及ぼす地域性の影響，JSSC 会誌，No.48，pp.48-50，2022 年 1 月
- 1.2) 村上貴紀，萩原篤，鈴木克弥，前田博：製作・溶接・防食に関する研究，(一社) 日本橋梁建設協会 令和元年度 橋梁技術発表会
- 1.3) (一財) 日本ウエザリングテストセンター：大気暴露試験ハンドブック，p.共-4，平成 19 年 1 月
- 1.4) (一社) 日本橋梁建設協会：'21 デザインデータブック，p.216，令和 3 年 6 月
- 1.5) 中部地方整備局 道路部：橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き（案）（第 2 版），pp.15-18，平成 25 年 3 月
- 1.6) (公社) 土木学会 平成 24 年度「重点課題」調査研究報告書：土木構造物の持続性を考慮した 300 年プロジェクトに関する研究
- 1.7) (国研) 土木研究所，(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究第 2 分科会，平成 28 年 3 月

（執筆者：北根安雄，齋藤 隆，皆田龍一）

第2章 300年超長期暴露試験の計画

2.1 超長期暴露試験の概要

本小委員会で検討する超長期暴露試験は、「300年保たせる構造物を実現するにはどうすればいいのか、この問いに答えるための暴露試験とする。」という方針のもと、実施計画を立案することとした。本章では、材料ごとの暴露試験の検討結果（第1章）を踏まえ、複合構造物における長期耐久性を実現させるための構造や対策を検討した上で試験体の形状や仕様を決定し、超長期暴露の試験計画を行った。材料・構造ごとで設定する試験体の仕様を検討する際、鋼、コンクリート、FRP、ゴムおよびこれらを組み合わせた構造で統一してグレード分けをすることは困難であった。そのため、暴露試験開始前と暴露試験期間中に実施する試験の種類や方法、試験間隔については、材料・構造ごとに設定することとした。

2.2 複合構造物における長期耐久性を実現させるための構造

2.2.1 鋼とコンクリート

(1) 合成構造

複合構造物の維持管理上の弱点となりやすいトリプルコンタクトポイントの腐食メカニズムに関しては、土木学会複合構造委員会「維持管理を考慮した複合構造の防水・排水に関する調査研究小委員会(H214)」で各種検討が行われている。鋼コンクリート境界部の腐食は、鋼材を腐食因子から防護する塗装等の耐久性が不足し、劣化や剥離等で腐食が発生するケースと、コンクリート内部の鋼材腐食が進展した結果、境界部も腐食するケースがあるとしている^{2.1)}。道路橋のコンクリート系床版を有する鋼桁では、鋼桁上フランジと床版コンクリートの境界部がトリプルコンタクトポイントとなり鋼桁上フランジが腐食している事例として、RC床版の劣化部からの漏水による鋼桁上フランジの腐食^{2.2)}や、水抜き孔からの伝い水による鋼桁上フランジの腐食^{2.3)}が報告されている。

鋼桁のボルト連結部や桁端部等の腐食損傷が発生しやすい部位では、構造改良や塗装等の腐食を防止する方法によって防食性能の向上ならびに回復が可能である。しかしながら、鋼桁上フランジと床版コンクリートの境界部は、床版コンクリート、伸縮装置および排水装置等の劣化により雨水等の劣化因子が侵入することで鋼桁上フランジが腐食した場合、床版コンクリートを撤去しない限り、直接、鋼桁上フランジの防食性能を回復することが困難な部位である。そのため、建設初期の防食対策や、腐食が発生した場合における長期耐久性を確保するための補修方法が重要となる。

鋼桁上フランジの防食対策として、参考文献 2.3)「道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究」の参考資料「道路橋の耐久性の信頼性向上における配慮事項に係るディテール集」では、上フランジの床版コンクリートとの境界部となる角部は、防錆上の弱点となり発錆する事例がみられることから、必要に応じて防食環境の改善を検討し、初期の防錆対策として上フランジにまわし塗装をする工夫が考えられると記載されている^{2.4)}。参考文献 2.5)「橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き」では、上フランジ上面はコンクリートと鋼材の境界部から水が浸入し、鋼材が腐食する恐れがあるため、下塗りでまわし塗装すると規定されている。まわし塗装の範囲を図 2.2.1 に示す。塗装仕様の鋼桁の場合、鋼コンクリート合成床版やプレキャ

スト PC 床版では、上フランジ縁端部に止水パッキンやソールスポンジが設置されることから上塗りまでまわし塗装をする事例が多い。床版の種類によって鋼桁上フランジとの接合部の構造が異なるため、長期耐久性を確保するための防食方法は環境条件や接合部の構造等を考慮して設定する必要がある。また、床版取替では早期に交通解放しなければならない場合が多く、防食対策工の施工期間が制限されるなどの課題があると考えられる。

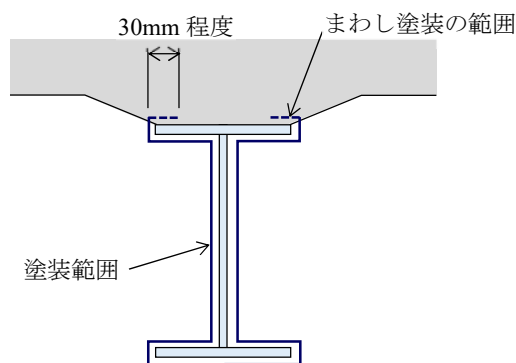


図 2.2.1 まわし塗装の範囲

(2) 混合構造

コンクリート部材と鋼部材等、異種部材を接合する混合構造の長期耐久性を実現させるためには、それぞれの部材の耐久性を向上させるだけでなく、接合部の耐久性を向上させる必要がある。主には、鋼部材の防錆処理と、接合部への水の浸入を防ぐ排水処理や防水処理を徹底することで耐久性を確保することとなるが、維持管理時において点検・補修しにくい箇所が多いため、初期対応をしっかりと実施しておくことが重要となる。

例えば、橋梁構造物で採用される混合構造として、径間ごとにその径間長に応じた鋼部材やコンクリート部材を選択して橋軸方向に接合する構造や、直交する鋼桁と RC 橋脚を柱頭部で接合する複合ラーメン構造等が挙げられる。鋼部材がコンクリート部材を囲う接合部では、鋼部材内面の腐食、コンクリートのひび割れ等、コンクリート部材が鋼部材を囲う接合部では、ずれ止めの腐食等については簡単には確認できない。また、外観的な変化が見られなくても、接合部で一体挙動するための付着・摩擦・支圧等の機能が内部で低下している可能性もあり、これらの事象の検知が非常に難しいとも言える。

このため、接合部の初期の防錆対策としては、塗装仕様のグレードを上げるだけでなく、チタンクラッド鋼やステンレス製スタッド等、耐久性の高い材料を採用することが考えられるが、さらに、塩害環境下における耐久性向上を目的として、接合部に、スズ添加鋼を用いてマクロセル腐食対策を行った混合箱桁ラーメン橋の事例も報告されている²⁶⁾。この事例では、他にも EM センサーと呼ばれる接合部の PC 緊張力をモニタリングするセンサーや、モニタリング孔からの漏水検知センサー等を最初から設置して、検査がしにくい接合部の異変を早期に検知する対策を講じている。

橋梁上部構造の場合は、鋼・PC 混合構造の接合部上面は床版面となるため、床版防水を施してもトリプルコンタクトポイントとしての腐食が発生しやすい。何重もの防水対策や排水対策を講じることは必要であるが、さらに、鋼・コンクリートの目地部には、供用時の車両荷重による挙動等で、コンクリートが圧壊しないよう V カットを入れるなどして伸縮性の高い防水層の連続性を担保することも重要である。

2.2.2 FRP

(1) FRP の用途と長期暴露試験の目的

FRP は、強化繊維と樹脂との複合材料であり、FRP 製品が実用化されてから、すでに半世紀以上経過し、その利用範囲も、船舶、宇宙・航空機、機械、交通機器、電機通信機器、建築・土木、スポーツ機器、生活用品と広範囲におよんでいる。これは、FRP が、軽量で高強度な材料である上、耐食性（耐化学抵抗性）に優れるという特徴を有していることに起因するものである。

しかし、FRP の耐候性に関しては、ウェザーメーターなどによる促進試験や塩水噴霧試験等により、紫外線劣化の影響や耐海水性の確認が行われているものの、複合的な作用を受けた場合の影響、促進試験と実環境での相関関係は不明確である。このため、実環境での超長期耐候性を確認することを目的として、FRP の暴露試験を行う。

土木分野では、FRP を、鋼材やコンクリートの表面に接着し、それらの補強材として用いられることもある。FRP 接着により補修・補強された部材の長期耐久性を検討することも選択肢として考えられたが、FRP の主な劣化因子は紫外線であり、それらが FRP と鋼・コンクリート部材との接合面に与える影響は小さいこと、また影響がある場合には、表層の FRP の劣化に依存すると考えられることから、暴露試験は、FRP 単体にて実施するものとする。なお、接合面に対しては、滞水などによる劣化が考えられるが、実環境の再現が難しいことから、別途検討が必要となる。

(2) FRP の積層構成と耐久性を確保するための防食技術

図 2.2.2 に、FRP 引抜成形材の積層構成の模式図の一例を示す。一般に、FRP は、平面に配置された強化繊維を複数重ね、それらに樹脂を含浸・硬化して、一体化することで作製される。FRP の最外層には、表面保護層として、ゲルコート、不織布、チョップドストランドマット（CSM）などを配置することにより、樹脂量の多い層を設けることが多い。CSM には、短繊維のガラス繊維が多用される。FRP の材料劣化は、暴露面、すなわち最外層または FRP 部材の端面（コバ面）から進行する。材料劣化は、強化繊維ではなく、樹脂で生じるため、外観の変化としては、変色、白亜化、繊維の露出、き裂、ふくれなどが生じる。表層の樹脂に劣化が生じはじめた段階では、直ちに機械的性質が低下するわけではないが、繊維の露出、き裂が進行して、強化繊維層にまで劣化が及ぶと機械的性質が低下する恐れがある。そこで、耐久性を確

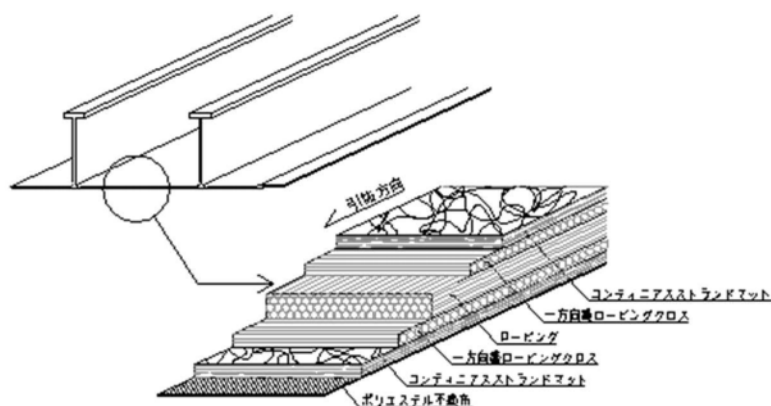


図 2.2.2 FRP の積層構成の模式図

保するために、フッ素系塗装で表面を保護することが一般的である。

FRP の機械的性質の低下の主な要因は、樹脂の劣化によって、強化繊維の一体性がなくなること

するものであり、一般に、引張特性よりも圧縮特性、曲げ特性に及ぼす影響が大きいとされている。ただし、それらの特性に及ぼす影響は明確になっていないことから、JIS 規格に準拠した、引張試験、曲げ試験、層間せん断試験、45°方向引張試験を実施し、長期暴露によるそれらの機械的性質の相関関係も検討することとした。

本検討では、FRP の長期耐久性を確保するために、一般的に用いられる、フッ素系塗装を適用することとし、フッ素系塗装の劣化の度合いに応じて、定期的に塗替えを実施し、長期耐久性を確保する計画とする。塗替えの間隔は、フッ素系塗装の劣化に依存するが、表面保護層がなく FRP 単体における劣化の進行も検討することとし、同時並行で実施することから、それらの状況から判断して、フッ素系塗装の塗替え間隔を検討することとする。また、表面保護層の技術開発に応じて、より耐久性の高い塗装を採用することとする。

製造方法には、①強化繊維の積層・樹脂の含浸を手作業で行うハンドレイアップ成形、②所定の型枠に強化繊維と樹脂を連続して送り込んで作製する引抜成形、③強化繊維の配置などは手作業で行うが、樹脂の含浸に、真空状態での圧力差を利用した真空含浸成形（VaRTM）などがある。本検討では、板状の試験体を暴露し、それらから切り出すことで、各種試験の試験体を採取することから、比較的大きな FRP 板を作製する必要がある。そこで、様々な形状寸法に柔軟に対応できる VaRTM により、板状の試験体を複数作製する計画とした。

2.2.3 積層ゴム支承

(1) 積層ゴム支承の超長期暴露試験の目的

単に積層ゴム支承の部材としての長期的な暴露試験を行ってその結果を見るという興味本位で実施するのではなく、道路橋では設計耐用期間が 100 年とされる橋梁を構成する 1 部材となっている積層ゴム支承について、その長期耐久性を説明することを目的として実施する。積層ゴム支承を構成する主な材料は有機化合物で造られたゴムであり、過去に大気中のオゾンの影響によって積層ゴム支承の被覆ゴムにき裂が発生した事例も報告^{2,7)}されており、長期耐久性を説明するためにゴムに老化防止等の定期的な維持管理が必要となるのであれば、それを前提とした試験計画を考案することとする。

なお、積層ゴム支承は、橋梁上部工と下部工との接続に用いるベースプレートやソールプレート等のプレート類やアンカーボルト類等の鋼部材とともに構成^{2,8)}されることが一般的であるが、今回はこれらの鋼部材の超長期暴露試験は除外し、積層ゴム支承を構成する主な主材料であるゴム材料にフォーカスして試験計画を検討することとする。

(2) 積層ゴム支承の構造

積層ゴム支承のゴム部分は 図 2.2.3 に示すように、「被覆ゴム」と「本体ゴム」に分けられ、「本体ゴム」はさらに「ゴム」と「内部鋼板」とに分けられる。

$$\text{＜積層ゴム支承＞} = \text{被覆ゴム} + \text{本体ゴム} = \text{被覆ゴム} + (\text{ゴム} + \text{内部鋼板})$$

設計上、支承としての荷重支持等の性能は本体ゴムで確保し、被覆ゴムは外部からの劣化因子が本体ゴムに到達するのを防ぐ目的で設置されるものである。その意味では被覆ゴムは、いわばコンクリートのかぶりに近いと考えられる。

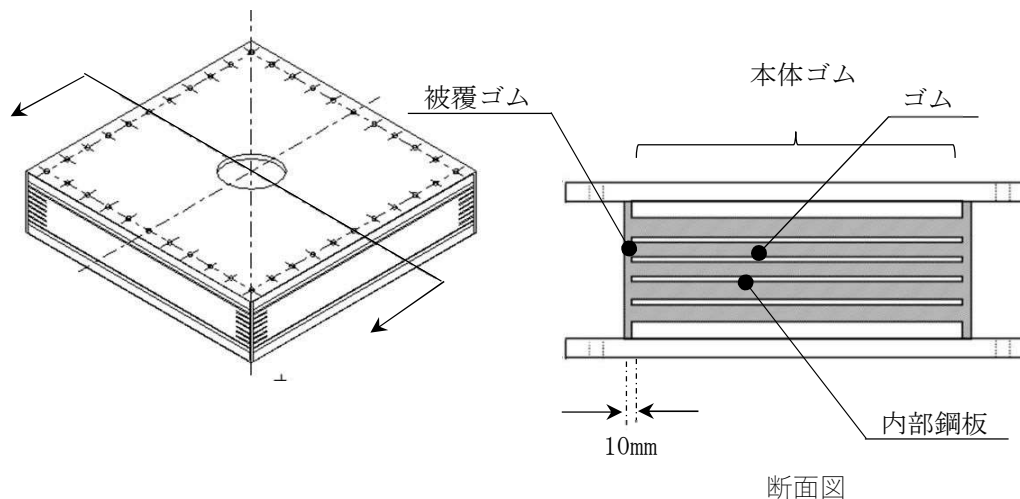


図 2.2.3 積層ゴム支承の構造

2.3 超長期暴露の試験計画

2.3.1 鋼とコンクリートの接合部

(1) 合成構造

a) 試験目的

道路橋合成桁のコンクリート接触面における鋼材の防食方法および維持管理を検討するための知見を取得することを目的として、鋼桁と床版コンクリートの境界部に着目した試験体を大気環境中に暴露する超長期暴露試験について検討した。

b) 暴露試験体

道路橋合成桁の鋼桁と床版コンクリートを模した形状とする(図 2.3.1)。試験ケースは①鋼桁, ②床版, ③その他に示す仕様を組み合わせて検討するものとする。

① 鋼桁

- ・形状：I 桁（300H 程度の形鋼またはビルト H）
- ・桁本数：床版支間を設けるため 2 本以上
- ・材質と桁外面防錆仕様：耐候性鋼材（SMA400W）無塗装仕様，C5 塗装系（SS400 または SM400A）
- ・コンクリート接触面の防錆仕様：無塗装，無機ジンクリッチペイント
- ・まわし塗装（縁端から 30mm 程度）：なし，無機ジンクリッチペイントのみ，C5 塗装系下塗りまで，C5 塗装系上塗りまで，C5 塗装系上塗りにチタン箔貼り付け

② 床版

- ・形状：床版張り出し部やハンチ等，実構造を反映（床版厚 200mm 程度，ハンチ高 80mm 程度）
- ・床版の種類：RC 床版，合成床版，場所打ち PC 床版，プレキャスト PC 床版，UFC 床版

③ その他

- ・床版張り出し部（片側）には，排水管やスラブドレーンを模した管を埋設する。
- ・床版コンクリートや防水層の劣化による雨水等の浸入を再現するため，コンクリートに疑似ひび割れを設けることを検討する。
- ・鋼桁と床版の接合部は，実構造に合わせて製作する（合成床版：止水パッキン，プレキャスト PC 床版・

UFC 床版：ソールスポンジと無収縮モルタル)

- ・床版張り出し部は、実構造にあわせて地覆や水切り等を設ける。
- ・試験体端面からの劣化や雨水浸入を防止するための処置を検討する。

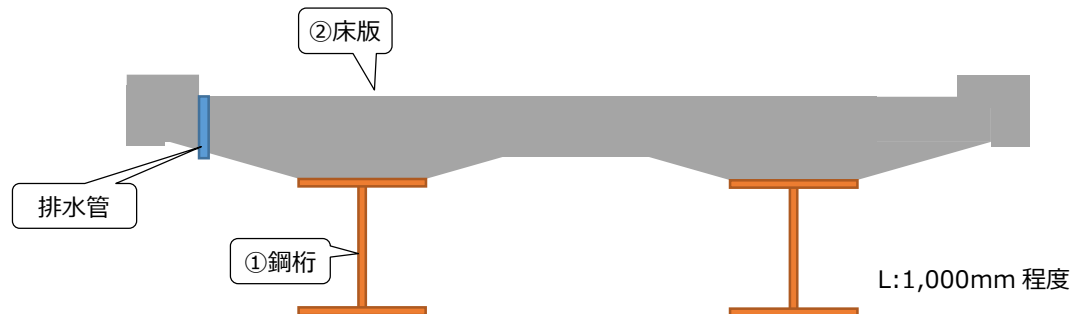


図 2.3.1 試験体断面図

c) 暴露試験場

腐食因子（飛来塩分）の影響が大きい大気環境中の 1 箇所

d) 計測項目

① 材料試験

- ・鋼：ミルシート（化学成分，引張強度）
- ・コンクリート：圧縮強度試験（7 日，28 日），経過観察用数十体

② 初期計測

- ・表面観察，写真撮影，寸法計測（板厚含む）

③ 暴露開始後の計測

- ・1 年もしくは 2 年ごと：表面観察，写真撮影，寸法計測（板厚含む），付着塩分量
- ・表面観察で床版コンクリートと鋼桁の境界部から発錆が確認された場合，非破壊検査等により雨水等の浸入経路を特定する。

e) 維持管理

- ・床版コンクリートと鋼桁の境界部以外での発錆や耐候性鋼材の異常さびが確認された場合，経過観察を行い適切な方法で防食性能の回復を図る。暴露試験を実施する場合は，具体的な補修の時期や方法について検討する。
- ・実構造物で生じる可能性が小さい劣化や試験体形状に起因する劣化が確認された場合，適切な方法で補修する。

(2) 混合構造

a) 試験目的

道路橋鋼桁－PC 桁間の接合部，もしくは鋼桁－RC 橋脚の柱頭部における鋼材の防食方法および維持管理を検討するための知見を取得することを目的として，鋼部材と RC 部材の接合部を模した試験体を大気環境中に暴露する超長期暴露試験について検討した。

b) 暴露試験体

鋼部材と RC 部材を接合した形状とする（図 2.3.2）。試験ケースは①鋼部材，②ずれ止め，③RC 部材

の各仕様を組み合わせて検討するものとする。

① 鋼部材

- ・形状：矩形断面（□500 程度のビルト材）， $t=12\text{mm}$ 程度
- ・材質と外面防錆仕様：C5 塗装系（SS400 または SM400A）
- ・コンクリート接触面（内面）の防錆仕様：無塗装，無機ジンクリッチペイント
- ・まわし塗装（縁端から 30mm 程度）：なし，無機ジンクリッチペイントのみ，C5 塗装系下塗りまで，C5 塗装系上塗りまで，C5 塗装系上塗りにチタン箔貼り付け

② ずれ止め

- ・種類：孔あき鋼板ジベル，頭付きスタッド
- ・寸法：鋼板 12mm 程度，頭付きスタッド $\phi 16\text{mm} \times L60\text{mm}$

③ RC 部材

- ・コンクリート強度： 30N/mm^2 ， 60N/mm^2
- ・鉄筋：一般鉄筋，エポキン防錆鉄筋
- ・RC 側の端部に鋼板を配置し，これに溶接もしくはネジ止めして鉄筋を固定する。

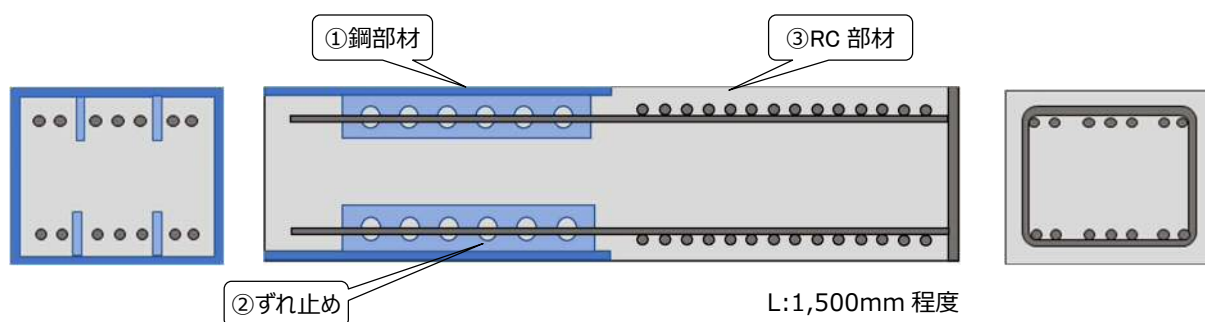


図 2.3.2 試験体断面図

c) 暴露試験場

腐食因子（飛来塩分）の影響が大きい大気環境中の 1 箇所

d) 計測項目

① 材料試験

- ・鋼：ミルシート（化学成分，引張強度）
- ・コンクリート：圧縮強度試験（7 日，28 日），経過観察用数十体

② 初期計測

- ・表面観察，写真撮影，寸法計測（板厚含む）

③ 暴露開始後の計測

- ・1 年もしくは 2 年ごと：表面観察，写真撮影，寸法計測（板厚含む），付着塩分量
- ・外観観察でコンクリート部のひび割れや鋼材部との接合部から発錆が確認された場合，非破壊検査等により鋼管内部の検査や雨水等の浸入経路の特定を行う。

e) 維持管理

- ・鋼部材-コンクリート部材の接合部以外での発錆が確認された場合，経過観察を行い適切な方法で防食性

能の回復を図る。

2.3.2 FRP

(1) 試験の目的

FRP は、強化繊維、樹脂の種類により様々な材料が成形可能であるため、一般化した長期耐候性は示されていない。このため、強化繊維に炭素、ガラスを用いた試験体を対象に、大気環境（特に紫外線）に着目した超長期暴露試験について検討した。

(2) 暴露試験体

a) 繊維、樹脂の組合せ

強化繊維は GFRP、CFRP を対象とするものとし、ハイブリッド FRP (HFRP) は、別途検討とする。使用する繊維、樹脂の組み合わせ案は以下のとおりとする。

- ・ GFRP : ガラス 2 方向材 + 不飽和ポリエステル
- ・ CFRP : 炭素 1 方向材 + ビニルエステル樹脂
- ・ HFRP : 実施する場合は別途検討

① 積層構成

GFRP : 板厚 10mm を想定し、表面保護材を入れるかどうかは別途検討

市販の目付量のロービングクロスを用い、Vf (50%) とする。

CFRP : 板厚 5mm を想定し、繊維の種類により別途検討

② 樹脂の選定

GFRP : 耐アルカリのためビニルエステルが使用されている場合もあるが、一般的な不飽和ポリエステル樹脂を用いる。

CFRP : エポキシ樹脂を用いる場合が多いが、引抜成形を想定し、ビニルエステル樹脂を用いる。

b) 試験体数 (N 数, 試験期間の間隔)

- ・ N=6 (予備 1 体を含む)
- ・ 15 体 × 2 水準 (塗装あり・なし) = 30 体

c) 樹脂の仕様

- ・ 塗装なし : 樹脂にトナーを入れ、無色は避ける。
- ・ 塗装あり : トナーなしの試験体に塗装する。検査路の仕様に準じたフッ素系塗装を検討する。

d) 試験体寸法

- ・ 計測項目に対応できる試験体寸法とする。

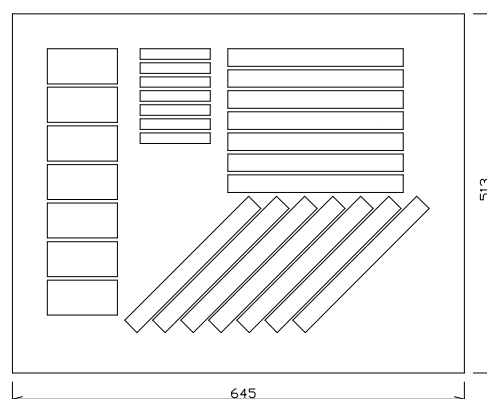


図 2.3.3 試験体寸法(寸法単位 : mm)

(3) 暴露試験場

a) 試験体の設置場所

- ・暴露試験の場所は、紫外線の影響が大きい、土木研究所朝霧屋外暴露場を候補とする。

b) 試験体の架台

- ・U 字溝など安価で比較的耐久性が高いものなどが考えられるが、試験体の固定等を考慮して、熔融亜鉛メッキ製を検討する。

(4) 計測項目

a) 外観観察, 写真撮影

b) 非破壊試験

- ・光沢度, 色差, 重量, 板厚

c) 破壊試験 (分析) : 10mm 角程度の少量の材料が必要. 板厚方向の劣化進展を観察

- ・SEM 観察
- ・顕微 IR 分析

d) 破壊試験 (分析) : 10mm 角程度の少量の材料が必要. 板厚方向の劣化進展を観察

- ・SEM 観察
- ・顕微 IR 分析

e) 破壊試験 (材料試験)

- ・曲げ (繊維方向が試験体長手方向) JIS K 7017
- ・層間せん断 (繊維方向が試験体長手方向) JIS K 7057
- ・引張 0 度 (JIS K 7164, K 7165)

試験体が厚いと、引張 0 度方向の強度試験は、つかみ部で鋼管定着を行った試験体で引張試験を実施する必要があり、試験体長さが 800mm 程度となることが予想される。試験体が大きくなることや、試験方法が JIS 規格でないことから、実施する場合は、最初にマニュアルを作成するなどの検討が必要となる。

- ・引張±45 度 (JIS K 7019)

±45 度引張試験は、一方向材を用いる CFRP には適用できない。

(5) 計測間隔

初期, 1 年, 5 年, 10 年, 25 年, 50 年, 75 年, 100 年, ..., 300 年 (暴露開始から 25 年以降は 25 年間隔) の計測→16 体

(6) 維持管理

- ・FRP 材以外 (架台, 取付ボルト) での発錆などが確認された場合は、必要に応じて防食性能の回復や、取替を行う。

2.3.3 積層ゴム支承

(1) 対象とするゴム材料

積層ゴム支承の長期耐久性を説明するには、本体ゴムが長期にわたって健全であることを明らかにする必要がある。その前提として本体ゴムへの劣化因子の侵入を防ぐ被覆ゴムが長期にわたって健全であることを証明できれば良いと考える。そもそも、被覆ゴムが超長期耐えられなければ本体ゴムの検証を行って

も意味がないとも考えられることから、今回は被覆ゴムにフォーカスすることとする。

ちなみに、本体ゴムについて被覆ゴムで劣化因子が遮断されると仮定すると超長期にわたり性能が保持されることを説明するには、繰返し荷重に対する疲労によってゴムの引張強さや伸び等、の力学的性能の変化が一定の範囲内であることと、ゴムと内部鋼板の接着の劣化によって支承としての荷重支持等の性能変化が一定の範囲内であることを証明できれば良いと考える。このことについては、暴露期間は短いですが、実橋梁に設置された積層ゴム支承を取り出して本体ゴムの性能が大きく変化していないことが確認された知見^{2,9)}がある。

(2) 試験計画の概要

被覆ゴムが健全であることの指標として大きくは表面のひび割れの程度を把握することと引張強さや伸び等の力学的性能の変化を把握することが考えられる。したがって、積層ゴム支承の使用環境を模擬した暴露試験を行い、定期的にひび割れの有無の観察および試験体から取り出した試験片を用いた力学試験を実施する暴露試験計画を検討する。ゴムに発生するひび割れについては、「JIS K 6259-1 付属書 1 図 1 き裂の状態」にて定量的に診断が可能であるため、これを用いることとする。なお、ひび割れ深さを計測する手段としてはレーザー顕微鏡等を用いる方法があるものの確立された技術とはなっていないのが実情であるため、今回は除外する。また、力学試験については、「JIS K 6251 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性の求め方」にて求められるため、これによって求めた値の経年変化を評価する計画とする。

積層ゴム支承に用いる被覆ゴムの厚さは一般に 10mm である。劣化因子は外側から作用するので、被覆ゴム単独で暴露試験を行うには劣化因子が被覆ゴムの両面から作用するので試験体の最低厚さは 20mm と考えられる。また、使用環境を再現するには試験体に荷重（変形）を与えることも重要であると考えられる。被覆ゴムは、設置環境の劣化要因からゴムの耐久性を確保するために、劣化防止剤や劣化要素の少ない材料を各社開発しているものであるが、今回は一般にオゾン劣化等に対して耐久性が高いと考えられる EPDM 系のゴムを対象とし、かつ、超長期の耐久性を保持するためには維持管理（耐オゾン性保護材）が必要と考えられるのでそれを前提とした試験計画とする。

(3) 試験体概要

a) 使用するゴム材料

一般に積層ゴム支承に用いる被覆ゴム（EPDM 系）とする。

b) 試験体寸法

図 2.3.4 に示すように 35mm×35mm×150mm とする。

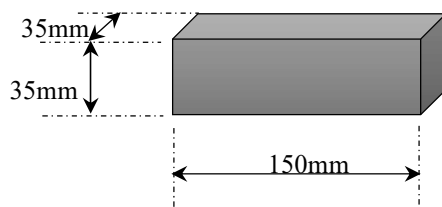


図 2.3.4 試験体（1 体あたり）の寸法

c) 負荷の導入

実構造物における荷重支持の状態を模擬するため、図 2.3.5 に示すように試験体 6 本を 1 単位として治具を製作して負荷（面圧）を与える。なお、与える面圧はゴム表面のひずみが、橋梁上部工の桁の温度

伸縮時等常時に受ける積層ゴム支承のせん断変形の許容ひずみの 70%と等価となるように与える。

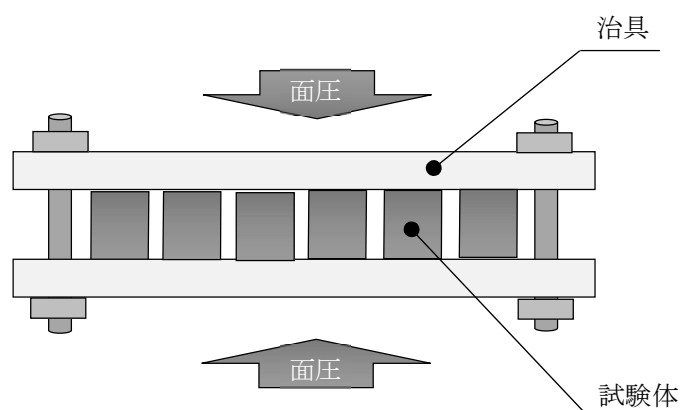
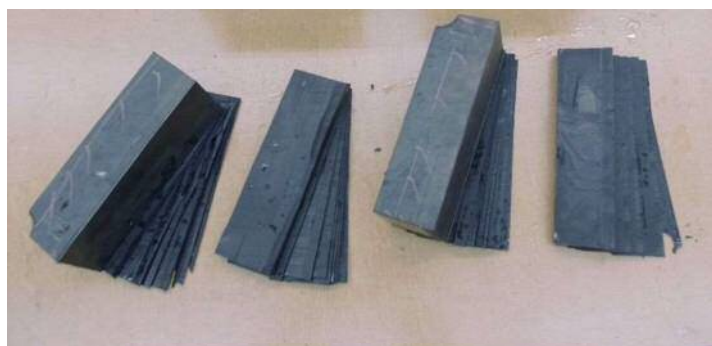
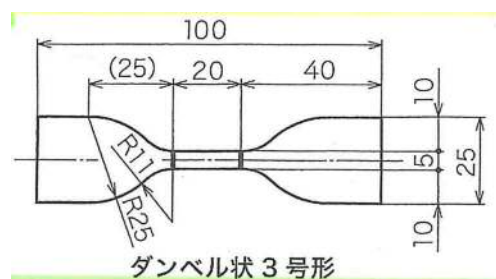


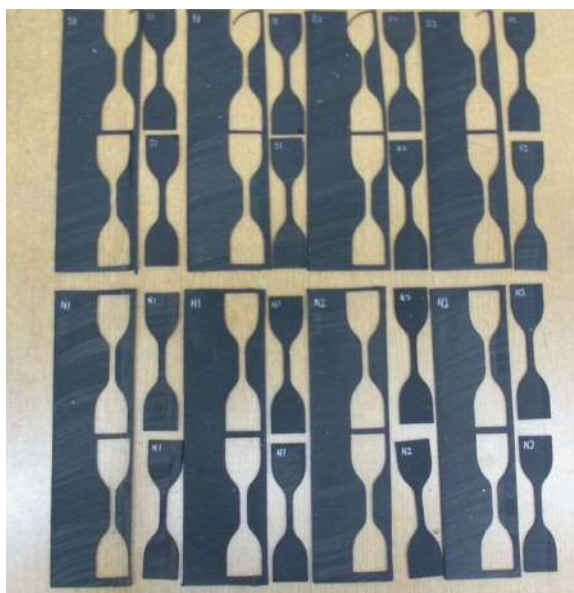
図 2.3.5 負荷の与え方



(a) 試験体から 2mm 厚さを切り出し



(b) 試験片（ダンベル状 3 号形）寸法



(c) 試験片（ダンベル片）の型抜きイメージ



(d) 引張試験のイメージ

図 2.3.6 引張試験の概要

d) 試験体数

治具 1 体で試験体 6 体に負荷を与える。治具は 2 体とし、試験体は合計で 12 体とする。

e) 試験項目

- ・外観目視（ひび割れ幅，ひび割れ深さ）・・・肉眼による観察を行い，JIS K 6259-1 付属書 JA に準じて評価を行う．
- ・力学試験（引張強さ，伸び）・・・図 2.3.6 に示すように JIS K 6251 によるダンベル状 3 号形を試験体 1 体より切り出して実施する．

f) 暴露環境条件

暴露環境は実際に積層ゴム支承が使用される環境を模擬することが望ましい．ミクロな視点に立つと個々の橋梁によって使用環境は異なるが，マクロ的に考えると積層ゴム支承は橋梁の桁下に設置され，特に，積層ゴム支承が多く使われ始めた平成 8 年以降の時代には，長支間床版を採用する規模の大きな橋梁では張出し床版も長くなり，床版によって雨風の影響や日光による紫外線の影響も受けにくい環境と想定される．そこで，本プロジェクトでは暴露環境として雨風の影響を受けにくい環境を模擬することとし，屋外とするものの，試験体は屋根の下などに設置することとする．

g) 試験頻度

表 2.3.1 に試験頻度の概要を示す．試験体数は，力学試験の実施数に余裕を持たせた 12 体で設定する．また，力学試験のたびに新たに製作した試験体と入れ替える．これは，負荷（面圧）を安定的に導入するためと，定期的に新たな試験体製作によって本プロジェクトの目的を風化させないためである．

表 2.3.1 試験頻度の概要

	3 カ月	6 カ月	1 年	2 年	3 年	5 年	10 年	30 年	N 年	N 年	N 年	N 年	N 年
外観目視	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
力学試験			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

2.3.4 ずれ止め

(1) 試験目的

鋼とコンクリートの複合構造にずれ止めとして数多く用いられている頭付きスタッド(以下，スタッドと略記)の設計せん断耐力式は，主に，押抜き試験の結果に基づいて規定されている．一般的に押抜き試験は，試験体を製作した後，鋼やコンクリート部材が健全な状態で実施されていることから，実構造物における経年劣化で生じる鋼部材の腐食やコンクリートのひび割れ等がせん断耐力に及ぼす影響は明らかにされていない．

そこで，超長期暴露試験を行う目的は，押抜き試験体を所定の期間，大気環境中で暴露した後，押抜き試験を実施することで，経年劣化が頭付きスタッドのせん断耐力等に与える影響を把握するとともに，スタッドを用いた鋼とコンクリートの複合構造の維持管理を検討する上での知見を取得することである．

(2) 試験概要

超長期暴露試験用ずれ止め試験体の形状を図 2.3.7 に示す．試験体は，H 型の部材（幅 200mm，厚さ 22mm，長さ 400mm）とコンクリートブロック（幅 400mm，厚さ 250mm，長さ 400mm）により構成する^{2.10)}．鋼部材は 1.1.2 での検討結果を踏まえて，耐候性鋼材（SMA400W 材）とする．スタッドはφ22×150（SS400 相当），使用するコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ ，鉄筋は D13（SD345）とする．鋼部材の防錆処理は，ブラストやジンクリッチプライマー等の処理は行わずに原板のままとする．ただし，

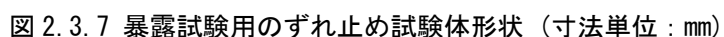
試験体は、暴露実施期間を考慮して7体準備する。押抜き試験を実施する間隔は、0年、10年、25年、50年、100年、200年、300年を想定する。

a) 暴露試験場の選定

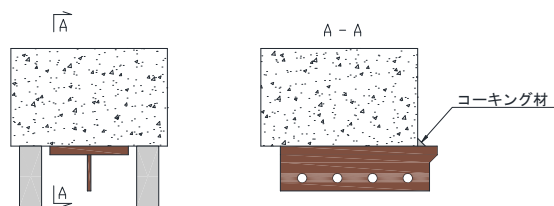
b) 試験体設置要領

ケース 2 は、ブロックを押抜き試験時の状態で暴露し、接合部の取り外しを不要とした案である。

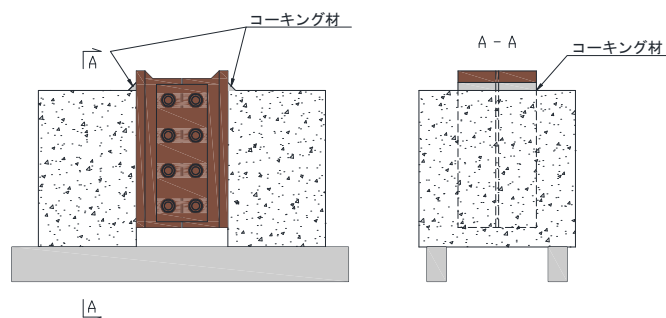
なお、両ケースとも、着目外の箇所からの水の浸入を防ぐため、図中に示す鋼とコンクリートの境界部



に止水対策として、コーキング材による処理を施すこととする。



(a)ケース 1（コンクリート打込み時と同じ向きの状態）



(b)ケース 2（ブロックを押抜き試験時の状態）

図 2.3.8 暴露試験時の設置要領（案）

設置時の架台は、経年劣化に配慮した部材としてコンクリート製の U 字溝、もしくは、定期的な取替えを実施することで対応するなど、試験体の設置要領と併せて試験実施前に再度検討する。

(4) 計測項目

a) 材料試験

鋼材はミルシートを保管し、引張試験等の材料試験は割愛する。一方、コンクリートは、標準養生の 7 日、28 日および各押抜き試験実施時の 7 回分の計 48 体の円柱試験体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を準備し、材料試験を実施する。コンクリート試験体の必要本数を表 2.3.2 に示す。各段階で圧縮試験を実施し、現場養生分の試験片については割裂引張試験およびヤング係数も計測する。

表 2.3.2 コンクリート試験体

No.	養生期間	養生方法	確認試験	試験体数
1	7 日養生	標準	圧縮強度	3 本
2	28 日養生			3 本
3	初期の押抜き試験時	現場	圧縮強度 引張強度 ヤング係数	6 本
4	10 年後の押抜き試験時			6 本
5	25 年後の押抜き試験時			6 本
6	50 年後の押抜き試験時			6 本
7	100 年後の押抜き試験時			6 本
8	200 年後の押抜き試験時			6 本
9	300 年後の押抜き試験時			6 本
合 計				48 本

b) 初期計測

初期の計測は、表面観察、写真撮影および寸法計測（板厚含む）を実施する。また、No.1 の試験体の押抜き試験を実施し、せん断耐力および初期剛性を把握する。残り 6 体の試験体は、No.1 におけるせん断耐力の 1/3 程度を漸増繰返し载荷し、初期剛性を確認する。

c) 暴露開始後の計測

計測は初期と同様に表面観察、写真撮影、寸法計測（板厚含む）を実施し、計測頻度は 2 年に 1 回を基本とする。押抜き試験は、表 2.3.3 に示すように初期計測に加えて、10 年、25 年、50 年、100 年、200 年、300 年のサイクルで実施する計画とし、せん断耐力および初期剛性を確認する。

表 2.3.3 押抜き試験の記録表（案）

試験体 No.	暴露年数 (年)	暴露試験前 載荷荷重(kN)	暴露試験後 最大荷重(kN)	初期剛性			せん断耐力 (kN/本)
				初期載荷時	暴露試験後	低下率	
1	0		-		-	-	
2	10						
3	25						
4	50						
5	100						
6	200						
7	300						

d) 押抜き試験の载荷および計測要領

ずれ止めの押抜き試験に用いる計測機器として、変位計を準備する。変位計は、高感度変位計（CDP-25）を使用し、試験体の 4 点に設置して相対変位を計測する。変位計設置要領（案）を図 2.3.9 に示す。

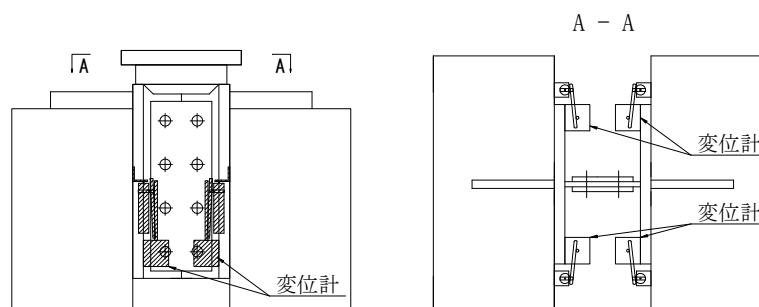


図 2.3.9 変位計設置要領（案）

荷重の载荷には容量 2000kN 万能試験機を用いる。試験体は、载荷面と支持面が平行を保ち偏心载荷を防ぐため、図 2.3.10 に示すように試験体のコンクリート下端はモルタルを敷設する。なお、すべての試験体において初期载荷を行うが、残りの 6 体は初期载荷後に暴露試験を開始するため、試験体下面とモルタルの間にはビニールを設置することで撤去に配慮した構造で統一する。試験方法は、JSSC 案に準拠した押抜き試験法^{2.10)}に従って行う。载荷要領は相対ずれが 4mm までは荷重制御（最大荷重の 1/20 の荷重増分ごとに除荷）の漸増繰返し载荷とし、それ以降は、変位制御による単調増加の载荷を行う。

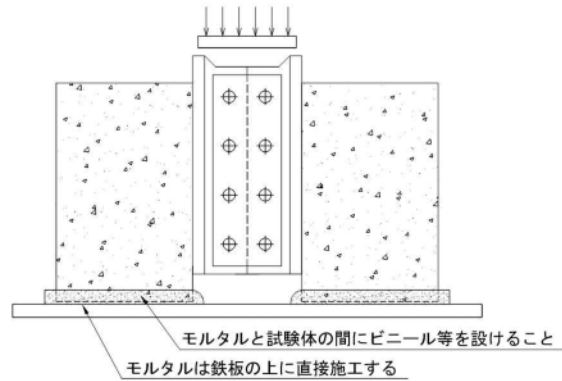


図 2.3.10 押抜き試験載荷時の設置要領

(5) 維持管理

表面観察，写真撮影および寸法計測（板厚含む）時に，維持管理についても確認および検討を行う必要がある．以下に主な内容を整理する．

a) 表面観察および寸法計測による確認

コンクリートのひび割れやコンクリート内部からの発錆，フランジの板厚の減少がないか確認する．

b) 押抜き試験による確認

押抜き試験でせん断耐力の低下や初期剛性からの変化を確認する．

c) 設置状況の確認

試験体の設置状況に関する対応として主なものを以下に列挙する．

- ・ 塵埃等の清掃を行う．
- ・ 試験体の架台はコンクリート製の U 字溝を用いることを想定しているが，架台の耐久性が不透明であるため，計測時に状況確認し，必要に応じて取替えを検討する．
- ・ 鋼とコンクリートの境界部にコーキング処理を行っているため，劣化がみられる場合はコーキング材の手直しを行う．手直しなどを行った場合は作業記録を残す．

(6) 超長期暴露試験工程（案）

押抜き試験体の超長期暴露試験工程（案）を表 2.3.4 に示す．2021 年度は計画から鋼部材の試験体製作とし，コンクリートの打込みを 2022 年度の 4 月頃，暴露試験を 7 月頃から開始予定とする．

表 2.3.4 超長期暴露試験工程（案）

年度	2021	2022	2023～2031	2032	2033～2046	2047	2048～2071	2072	2073～2121	2122	2123～2221	2222	2223～2321	2322	備考
経過年数(年)	-	0	1～9	10	11～24	25	26～49	50	51～99	100	101～199	200	201～299	300	
計画	■														
試験体製作	■														2021 年度は鋼部材製作まで、2022 年 4 月頃コンクリート打込み想定
暴露試験		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	2022 年 7 月頃スタート想定
押抜き試験 (回数)		☆ (1)		☆ (2)		☆ (3)		☆ (4)		☆ (5)		☆ (6)		☆ (7)	計 7 回の押し抜き試験を実施
経過観察 (回数)		☆ (1)	■	☆ (6)	■	■	■	☆ (26)	■	☆ (51)	■	☆ (101)	■	☆ (151)	2 年に一回の頻度とし、必要に応じて期間は見直す
データ整理		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	計測頻度に対してデータ整理を実施
まとめ															

参考文献

- 2.1) (公社) 土木学会複合構造委員会：複合構造物の防水・排水技術，複合構造レポート 15，pp.112-113，令和 2 年 3 月
- 2.2) (公社) 土木学会鋼構造委員会：大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策，鋼構造シリーズ 30，p.111，令和元年 7 月
- 2.3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，(一社) 日本橋梁建設協会，(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会，(一社) 建設コンサルタンツ協会，(国研) 土木研究所：道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究，国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書，No.1121，p.36，令和 2 年 7 月
- 2.4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，(一社) 日本橋梁建設協会，(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会，(一社) 建設コンサルタンツ協会，(国研) 土木研究所：道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究，国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書，No.1121，p.参 1-12，令和 2 年 7 月
- 2.5) 国土交通省 中部地方整備局 道路部：橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き（案）（第 2 版），pp.15-18，平成 25 年 3 月
- 2.6) 知名広道, 奥那原 邦仁：牧港高架橋における維持管理の取組み～連続モニタリングの導入，～土木学会西部支部沖縄会 第 7 回技術研究発表会，平成 30 年 1 月
- 2.7) 杉本博之，溝江実，山本吉久，池永雅良：天然ゴム支承の低温対候性に関する研究，土木学会論文集 No.693/IV-53，pp.79-86，2001.
- 2.8) 鋼構造シリーズ 25，道路橋支承部の点検・診断・維持管理技術，土木学会，pp.27-28，2016.3
- 2.9) 須藤千秋，西敏夫，島田源一，矢崎文彦，奥津宜幸：10 年間使用後の免震支承の性能変化評価と内部物性分布，土木学会第 58 回年次学術講演会資料，I-382，pp.763-764，2003.9
- 2.10) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート No.35，1996.11.

《添付資料》ずれ止め試験体 製作図

(執筆者：石田 学，今井 隆，久保圭吾，斉藤成彦，齋藤 隆，塩畑英俊，武野正和，中村一史，
橋本国太郎，姫野岳彦，松井孝洋，皆田龍一，山本将士)

第 3 章 300 年超長期暴露試験の実施

3.1 はじめに

本章では、第 2 章「300 年超長期暴露試験の計画」の内容を受けて、実施に向けての場所選定および具体的に準備が進んでいる積層ゴム支承の暴露試験実施要領について報告する。

3.2 暴露試験場の選定

3.2.1 朝霧屋外暴露場^{3.1)}

国立研究開発法人 土木研究所 先端材料資源研究センター（英語名：Innovative Materials and Resources Research Center の頭文字から略称を iMaRRC）には、つくばと朝霧に屋外環境における耐久性を評価するための屋外暴露場がある。その中で、朝霧屋外暴露場は、標高が約 900m と高いため、紫外線量が多いことが特徴であり、敷地面積は、約 10000 m² を有している。鋼材の防食塗料試験体、FRP シートによるコンクリートの補強試験体、FRP 成形材を用いたトラス部材等の暴露試験の状況を写真 3.2.1～写真 3.2.5 に示す。



写真 3.2.1 暴露試験状況(1)：鋼材の防食塗料試験体



写真 3.2.2 暴露試験状況(2)：FRP シートによるコンクリートの補強試験体



写真 3. 2. 3 暴露試験状況 (3) : 鋼材の防食塗料試験体



写真 3. 2. 4 暴露試験状況 (4) : FRP 成形材を用いたトラス部材



写真 3. 2. 5 暴露試験状況 (5) : FRP 成形材を用いたトラス部材

撮影日 : 全て 2022 年 3 月 14 日(月)

3.2.2 港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所は、神奈川県横須賀市にある国立研究開発法人であり、冬季の降水量が少ない太平洋側気候である。図 3.2.1 に港湾空港技術研究所に最も近い気象観測点である神奈川県三浦市の気温および降水量を示す。これらの気象データは気象庁の 1991～2020 年までの平均値で、年気温および年間降水量の平均は、それぞれ、16.1℃および 1574mm である^{3.2)}。

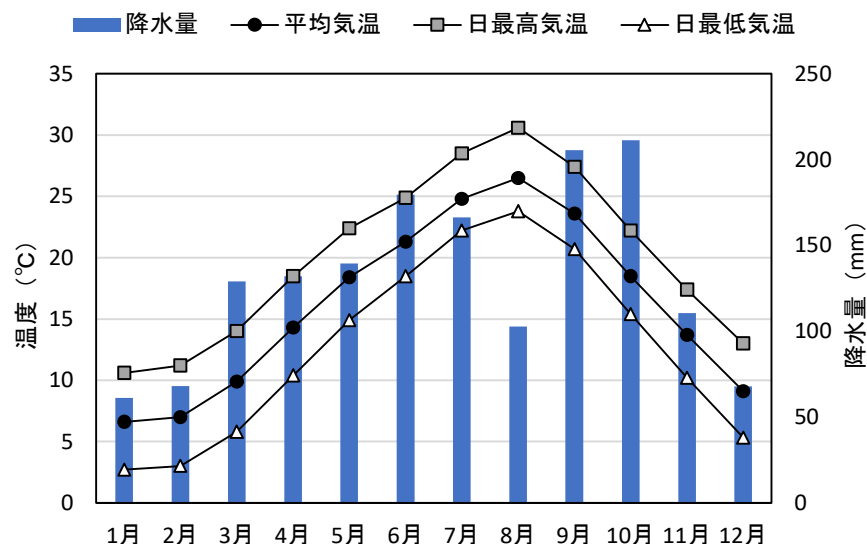


図 3.2.1 三浦市の気象データ(気象庁データ)

港湾空港技術研究所には海洋環境を模擬するための施設として、長期暴露試験施設がある。長期暴露試験施設は昭和 41 年に建設され、平成 27 年に改修された。コンクリートや鋼材、その他建設材料の長期耐久性を評価するため、各種海洋環境を模擬した長期暴露試験を実施するため、本施設が建設された。本施設の特徴として、久里浜湾の自然海水を取水することで、実際の海水組成を反映した試験が可能であること、また後述する施設によって、様々な海洋環境を再現することが可能であること、の 2 点が挙げられる。

長期暴露試験施設は海水循環水槽と海水シャワー暴露場に大きく分かれる(写真 3.2.6)。海水循環水槽は海洋環境のうち干満帯および海中部を再現するもので、試験体等を設置できる水深が数パターン設けられるほか(図 3.2.2)、一般的な海洋環境と同様に 1 日 2 サイクルの干満が自動的に行われる(図 3.2.3)。したがって、試験体の設置水深を変えることで、試験体の浸漬および乾燥条件等を変化させることができる。また、海水シャワー暴露場は、海洋環境のうち飛沫帯を再現するものである。海水循環水槽での満潮位から干潮位となる際に不要となる海水について、散水パイプを介して試験体に噴霧することで(図 3.2.3)、試験体に 1 日 2 サイクルで海水飛沫を与え、それ以外の時間は基本的に海水を直接与えない。このため、海水の供給を受けない時間帯は気象条件に強く影響を受け、日射や湿度、降雨の影響も強く受ける。また、海水シャワー暴露場の中であっても、海水の散水を直接受けない場所では、海上大気中と同様の環境を再現することができる。また、本施設との比較のため、幾つかの港にも暴露施設を設けており、これらの比較によって環境条件の相違が建設材料の長期耐久性に及ぼす影響を検討している。

これらの施設を用いて得られた成果については、多くは港湾空港技術研究所の所報(港湾空港技術研究所資料、港湾空港技術研究所報告)で公開されている。本施設を活用した研究成果としては、コンクリートの長期暴露試験に基づいた塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算定式の提案^{3.3)}、珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性^{3.4)}、などが挙げられる。



(a) 海水循環水槽



(b) 海水シャワー暴露場

写真 3.2.6 長期暴露試験施設

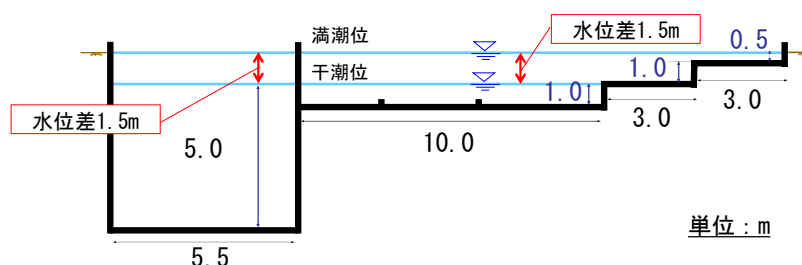


図 3.2.2 海水循環水槽の断面

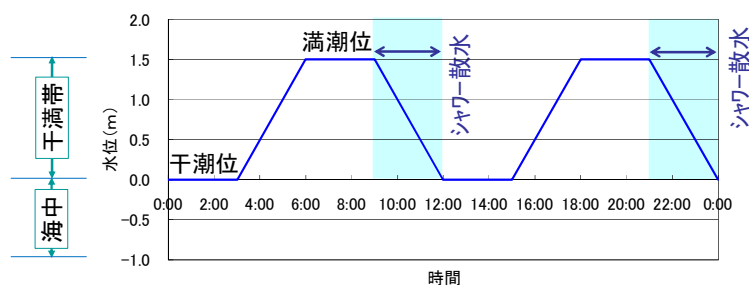


図 3.2.3 海水循環水槽における海水位サイクル

3.2.3 大阪工業大学 八幡工学実験場^{3.5)}

大阪工業大学 八幡工学実験場内にある構造実験センターは、大阪府枚方市と京都府八幡市にまたがる「学校法人 常翔学園」枚方第一校地内にあり、主に、土木・建築の構造に関する試験・研究施設が設置されている。構造実験センターに最も近い気象観測点である京都府京田辺市の 30 年間（1991～2020 年）の年気温、年間降水量の平均および日照時間は、15.3℃、1430mm および 1962 時間である^{3.2)}。

同センターには、土木・建築構造物の材料、構造強度などに関する試験研究設備が設置されており、その一部に、写真 3.2.7 に示す暴露場が設けられている。



写真 3.2.7 八幡・構造実験センター 暴露場

3.3 積層ゴム支承の暴露試験実施要領

3.3.1 試験体の製作

道路橋に用いる積層ゴム支承の製造工程は、道路橋支承便覧^{3.6)} 参考資料-19 図-参 19.2 に示されている。本暴露試験に用いる試験体は、積層ゴム支承の被覆ゴム部について抜き出したものであるため、図-参 19.2 の工程の中で鋼板の処理や積層ゴム本体製造プロセスを除く製造工程で製作した。

以下に、試験体の製作概要を示す。

- ① 原料ゴム（生ゴム）を素練りする。
- ② 素練りした原料ゴムにカーボン等の充填剤や硫黄等の加硫剤を配合する。



写真 3.3.1 混練の状況

混練

写真 3.3.1 に示すロールやバンバリー等により、金属間の狭い隙間を通してゴムに圧力を加えながら行う。この状態のゴムを配合ゴムまたは未加硫ゴムと呼ぶ。

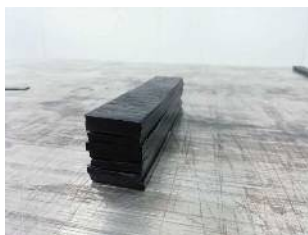
原料ゴム（生ゴム）は、線状の高分子量ポリマーで、原料ゴムを手で引っ張るとからみ合いがほぐれ、分子同士がすべりながら伸びるが、長時間伸ばした原料ゴムは元に戻らなくなる。ゴム製品は、原料ゴムの他にカーボンブラックなどの充填剤などを混ぜて高強度ゴムにする。劣化防止剤や加硫剤などの混練を行い、配合ゴムとする。

③ 配合ゴムを所定の形（金型に入れる形状）に成型する

配合ゴムは、写真 3.3.2 に示す手順にてシート状に整形し、必要厚さにシートを重ねて成型する。



a) 整形（35mm×150mm に加工）



b) 必要厚さに重ねる



c) 金型 6 個分の成型

写真 3.3.2 配合ゴムの成型状況

④ 化成物を圧縮加熱して加硫ゴム製品をつくる

写真 3.3.3 に示すように、金型に成型ゴムを組み込み、圧縮力と 150℃程度で過熱することで、硫黄などの架橋剤により化学反応（架橋反応という）させ、ゴム製品（加硫ゴム）とする。この時、原料ゴム（生ゴム）は線状ポリマーから網目状ポリマーに変わり、弾性体となる。



a) 成型用金型（6 個取り）



b) 成型した配合ゴムを金型に組込む



c) 加硫用プレス（圧力・加熱）



d) 完成したゴムブロック

写真 3.3.3 加硫ゴムの製作状況

以上より、暴露試験用治具および試験体の組込状況を図 3.3.1 および写真 3.3.4 に示す。

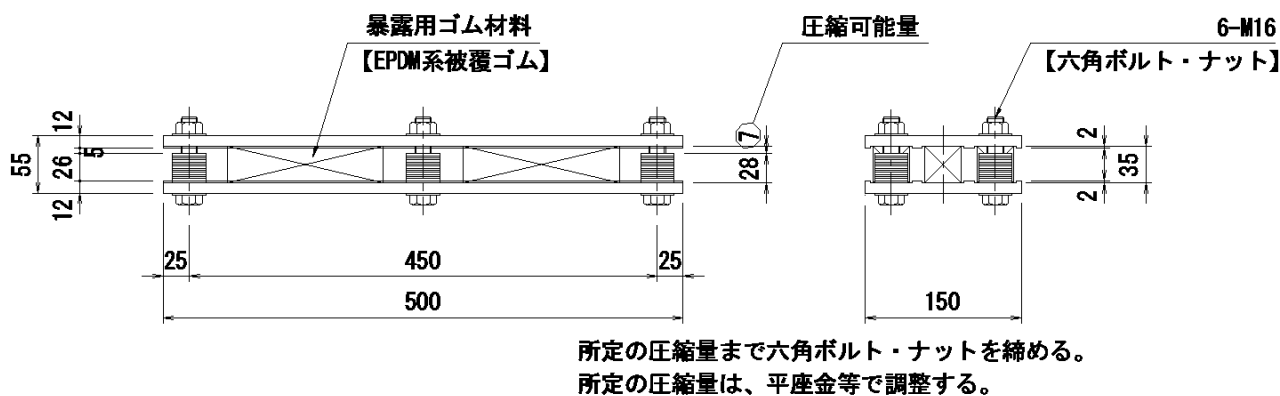


図 3.3.1 暴露試験用ゴム材と組込み用治具 (6 本 1 組を 2 組) (寸法単位 : mm)



※: ゴム試験片の圧縮量は, ゴム表面の伸びについて確認試験後, 暴露試験開始までに設定

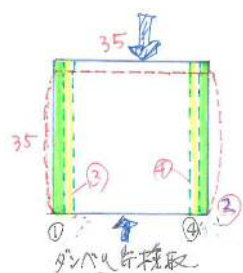
写真 3.3.4 ゴム試験片の設置と治具組込み

3.3.2 力学試験の初期値

暴露試験を行う試験体と同時に製作した試験体を用いて, 暴露試験前の力学試験 (破断伸び・破断強さ) を行った. 寸法 35mm×35mm×150mm の試験体 1 体から厚さ 2mm の試験片 (ダンベル状 3 号形) 4 体取り出した. なお, ダンベル片は試験体の表面側からそれぞれ 2 体取り出している.

(1) 試験片の切り出し

試験片の製作状況を写真 3.3.5 に示す. 試験片は負荷 (面圧) を与える方向と平行な方向から厚さ 2mm のシートを切り出した.



a) 加工概要図



b) 暴露試験片(力学試験用)



c) 2mm シートの切り出し

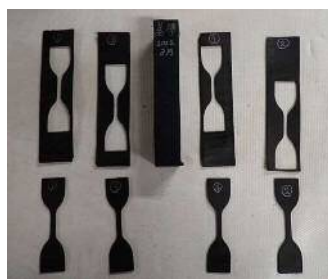
写真 3.3.5 試験片の切り出し

(2) ダンベル状 3 号試験片の加工と力学試験（破断伸び・破断強さ）

試験片の加工と力学試験の状況を写真 3.3.6 に示す。



a) 切出し片の厚さ測定



b) ダンベル切出し



c) 試験片セット



d) 力学試験状況

写真 3.3.6 ダンベル状 3 号形の製作と力学試験

(3) 試験結果

暴露試験前の力学試験の結果を表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 暴露試験前の力学試験結果

		単位	試験結果				試験条件
硬度		—	61				JIS K 6253
採取位置		—	①	②	③	④	JIS K 6251
引張試験	引張強さ	N/mm ²	17.7	19.3	19.3	20.2	
	伸び	%	650	700	710	730	

3.4 まとめ

本章では、300 年超長期暴露試験実施に向けて、選定した 3 箇所の暴露試験場について簡潔にまとめた。以上より、試験は、FRP に関連する供試体は紫外線に弱いため朝霧屋外暴露場、それ以外の 3.3 でまとめた積層ゴム支承や頭付きスタッドの静的押抜きせん断試験供試体は、大阪工業大学八幡工学実験場にて実施する予定である。

参考文献

- 3.1) 国立研究開発法人 土木研究所 先端材料資源研究センター ホームページ
<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/facility.html>
- 3.2) 国土交通省 気象庁 ホームページ (ホーム>各種データ・資料>過去の気象データ検索>平年値(年・月ごとの値)) <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 3.3) 与那嶺一秀, 山路 徹, 加藤絵万, 川端雄一郎: 長期海洋暴露試験および実構造物調査に基づくコンクリートの塩化物イオン拡散性状に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1339, 2018.
- 3.4) 西田孝弘, 山路 徹, 与那嶺一秀, 谷口 修, 田中亮一, 竹中 寛, 清宮 理: 珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, Vol.59, No.2, 2020.9.
- 3.5) 大阪工業大学 八幡工学実験場 ホームページ
<http://www.oit.ac.jp/japanese/yawata/>
- 3.6) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2018.12.

(執筆: 今井 隆, 大山 理, 川端雄一郎, 櫻庭浩樹, 塩畑英俊, 姫野岳彦)

第4章 既往の暴露試験の実績調査と課題抽出

4.1 調査の方針

H24年度の重点研究課題として実施された「土木構造物の持続性を考慮した300年プロジェクトに関する研究」（以降、第1期委員会）でも文献調査がなされており、39の文献が収集されている。この第1期の文献調査では、暴露試験だけでなく、鋼・コンクリート構造物の長期耐久性や健全度評価に関する内容が含まれており、暴露試験については、鋼（特に耐候性鋼と防食）とコンクリートに関するものが主となっている。

本WGでは、暴露試験に対象を絞り、特に以下の内容に関する文献について調査を実施した。

- ・ 長期暴露（50年程度以上）
- ・ 複合材料／複合部材・構造
- ・ 新材料

また、鋼とコンクリートのみでなく、FRPや、免震支承に使われるゴム材料についても調査を実施した。

4.2 実績調査

4.2.1 コンクリートと鉄筋コンクリート

第1期で調査された小樽港百年耐久性試験や、今回調査した4.1)や4.2)などのように、コンクリートおよび鉄筋コンクリートの分野では、超長期暴露試験が以前から計画され、すでに100年程度経過し、現在も継続されている事例が複数存在する。4.1)ではひび割れがRC部材の長期耐久性に与える影響が検討され、4.2)では55年供用された実構造物の一部を北海道の積雪寒冷地で200年間暴露することが計画されており、コンクリートおよびRC部材の長期耐久性に関するデータは蓄積されていることがうかがえる。

4.2.2 金属系材料

金属系材料で最も構造材料として使用されている鋼は、腐食環境下では腐食が進行するため、鋼構造物では何らかの防食が施されている。したがって、鋼材または鋼部材の長期暴露試験では、無防食で使用する耐候性鋼材を除き、防食性能の長期耐久性を把握することを目的としている。4.4)では、海洋環境下における鋼管杭に対する各種防食工法の長期暴露試験結果がまとめられている。どの程度の耐久性が要求されるかにより防食工法は選択されるべきであるが、腐食環境の非常に厳しい海洋環境下においても、ペトロラタム被覆＋チタンカバーの組み合わせが長期耐久性を有することが示されている。

また、第1期の文献調査でも多くの文献が収集されている耐候性鋼材については、4.6)において日本で最も古い無塗装耐候性鋼橋梁の50年経過時の健全性評価結果が示されている。この橋梁では、材料の腐食状態および構造性能の両面で健全であり、100年以上の余寿命が確保されている可能性が高いことが結論付けられており、環境が良ければ、無塗装の耐候性鋼の長期耐久性が示されている。

4.5)は、温泉地区の腐食環境が厳しい環境における各種金属材料の耐久性を暴露試験により検討した事例である。鋼、アルミニウム、チタン、ステンレス鋼、ニッケルを検討材料としており、温泉地区のような厳しい腐食環境では、チタンが唯一使用でき、超長期耐久性が期待できることが示されている。

4.2.3 鋼・コンクリートの複合構造

4.3)では、鋼板被覆工法により補修された RC 構造物の鉄筋腐食特性を暴露試験により検討しており、試験結果からは、鋼板被覆は鉄筋の腐食に影響を与えていないことが示されている。4.7)では、複合構造物の鋼材とコンクリートの接触面を模擬した要素試験体を作成し、鋼材とコンクリートの接触面の腐食の発生や進展に関する検討を行うため、暴露試験や浸漬試験を実施している。その結果、鋼板とコンクリートの接触面の付着状態が良好な場合においても、コンクリートの乾燥収縮によって鋼板とコンクリートの接触面の端部に CO₂ が侵入するほどの隙間が生じ、その隙間が生じている範囲のコンクリートの接触面は中性化する。また、その中性化範囲においては、鋼板表面の不動態被膜は破壊されやすくなるとともに、水や酸素などの腐食因子が侵入することで接触面の鋼板に腐食が進展することが示されている。4.8)では、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造の海洋環境下での腐食特性を暴露試験を実施することで明らかにしている。ここで検討されたハイブリッド構造では、マクロセル腐食は全体腐食に対して、大きな影響を示さず、コンクリートとの接触面における鋼板の腐食は、端部から数 cm のところまでにとどまっていることが示された。検討したハイブリッド構造の劣化は、鋼板の腐食が主であり、鋼板の腐食に伴いコンクリートのひび割れへとつながる場合もあるため、耐久性向上のためには、鋼板に対して適切な防食対策を講じることが必要であることが示されている。

上記のように、鋼・コンクリートの複合構造における長期耐久性が暴露試験により検討されているが、今後、さらに検討事例が増え、鋼・コンクリートの各種複合構造における長期耐久性が明らかになることが望まれる。

4.2.4 FRP

FRP は水や紫外線など環境作用によって劣化するため、水分の影響や直射日光を受ける箇所では、表面保護層を設けることで耐久性を確保している。4.11)では、GFRP 引抜成形材における表面保護塗料の効果を検証するために 10 年間の暴露試験を実施している。無塗装試験体では、引抜方向の繊維量が少ない試験体では引張強度が約 20%低下したが、塗装試験体では強度の顕著な低下は認められなかった。塗装試験体では、塗膜下でも日射の影響を受けることが明らかとなったが、無塗装の場合の 1/3 程度であり、表面保護層の効果が示されている。

CFRP の暴露試験としては、日本では日本ウェザリングテストセンターが屋外長期暴露試験を継続中である。4.12)に暴露後約 11 年の結果、4.14)に暴露後 33 年までの結果が報告されている。いずれも無塗装の試験体であるが、暴露後約 11 年では、強度の低下は明確には見られず、暴露後約 32 年では、織物強化板では強度低下が見られなかったが、一方向強化板では 18%強度低下が見られ、その理由として一方向強化板では炭素繊維回りの樹脂を紫外線から遮る度合いが小さいことや表層からの部分的な劣化に対して敏感であることが指摘されている。その他に、フィラメントワインディング成形による CFRP パイプを部材ごと暴露している事例が 4.13)に報告されている。CFRP 立体トラス構造に用いられているフェノール樹脂をマトリックスとする CFRP パイプであり、12 年間の屋外暴露では、塗装がない場合、樹脂の減耗により、炭素繊維の露出が観察されたが、力学的特性の変化は見られなかったことが報告されている。

4.10)では、GFRP 引抜成形材を用いたトラス歩道橋について、供用開始後 8 年の時点で、外観観察、載荷試験および、試験片の材料試験を実施している。外観観察では局所的な損傷以外は大きな変状は見られず、橋全体の載荷試験でも、供用開始前のたわみと同程度のたわみとなり、供用開始時からの大きな変化は見ら

れなかった。ただし、部材から切り出した試験片による引張試験では、最大 18%の強度低下が見られており、現状では安全性に問題はないが、今後 60～80 年後には安全性に支障が出る可能性があることが示されている。今後も定期的に強度の低下程度を把握することにより、GFRP 引抜成形材の時間軸を考慮した安全率の考え方の基礎データになるものと思われる。

4.9)では、アルカリ環境下での炭素繊維強化ポリマーケーブルの耐久性を明らかにするために、アルカリ浸漬試験を行い、アレニウス則により長期の強度保持率の予測を行っている。試験結果より、年間平均気温が 50°C を想定しても、200 年後の炭素繊維強化ポリマーケーブルの強度保持率が 90%以上であると予想されている。今後、このような室内試験結果による長期的な強度の予測を屋外暴露試験結果により検証することで、炭素繊維強化ポリマーケーブルに限らず、FRP の信頼性向上に寄与することが期待される。

4.15)では、ハイブリッド FRP (HFRP) の母材と、HFRP および鋼の添接板からなる維持管理に優れた新しい高力ボルト接合部の屋外暴露試験が報告されている。報告は、暴露後 14 か月しか経過していないため、表面の錆のみが観察されているが、暴露試験を継続することにより、今後、腐食の進行や継手耐力の変化などのデータが期待される。特に、CFRP と鋼の接合部では、異種金属接触腐食が懸念されており、暴露試験により、腐食の進行速度や腐食抑制対策効果などのデータ取得が期待される。

以上のように、FRP の暴露試験のデータは、これまでに 30 年から 40 年程度であり、材料の種類や繊維構成によっても耐久性が異なることが示されているため、今後も長期暴露試験を実施することにより、FRP の長期耐久性の基礎データを取得することは重要であるとともに、室内促進試験結果との相関関係を明らかにしていく必要がある。

4.2.5 ゴム

ゴム分子は、3 次元網目構造体であるが、この網目構造を形成する長鎖分子や架橋部分は、大気中の酸素やオゾンなどの劣化因子によって、切断と再結合といった分子構造の変化が繰り返され、その結果、ゴム材料の破断強度や伸び性能が変化する。代表的な劣化機構としては、熱酸化劣化、オゾン劣化、光劣化が挙げられる。特に天然ゴムは、各種合成ゴムと比較して、酸素やオゾンの影響を受けやすいと言われている。したがって、支承用ゴム材料や免震ゴム支承の耐久性におよび経年変化については、以前から多くの研究がなされている。

4.16)～4.20)では、実際に橋梁で使用されたゴム支承を回収し、その性能の変化を調査した結果が報告されている。以下に、主な事例をまとめる。

- オーストラリア・メルボルン市内にある鉄道高架橋において、約 100 年間使用された天然ゴム防振パッドについて、性能変化を調査した結果、ゴム表面では、雨水やオゾン、酸化などによるき裂を伴う損傷が見られたが、表面から 5mm 程度内部に入ると、ゴムの架橋密度、破断伸び、破断強度はほとんど変化していなかった。
- イギリスの Pelham 橋では、約 40 年使用された天然ゴム支承を回収し、その性能試験および支承内部の物性変化が調査された。支承表面のオゾンクラックは見られなかったが、ゴム支承の水平剛性は、設計値に対して約 10%増加しており、支承表面から約 50mm の深さにおいてゴム材料の物性が変化していることが明らかとなった。
- 鬼怒川橋梁で約 17 年使用されたゴムパッドを回収し調査した結果、引張強度が 15%、伸びが 17%減少しており、わずかな永久変形も確認された。また、表面のき裂は、端面前面に見られたが、最大 2mm 程度であった。静的せん断弾性率は初期値から約 13%増加していたが、当初の目標値を満足していた。

- 山あげ大橋で10年間使用された高減衰震ゴム支承を回収し、性能変化を調査した結果、水平剛性は3～4%増加して、等価減衰定数は-2～4%の変化が見られた。また、支承内部の物性変化は、表面から30mm程度の深さまで確認された。

4.21)および4.22)では、天然ゴム支承および高減衰ゴム支承の長期耐久性について、加熱促進劣化実験により検討している。材料レベルおよび支承レベルの実験を行うことで、各種物性値の変化特性や、支承表面から物性値が変化する深さ（クリティカル深さ）を明らかにしている。これらの実験結果を用いて、ゴム支承の水平剛性の変化量や高減衰ゴム支承の等価減衰定数の長期予測を可能としている。

オゾン劣化によるゴム支承表面のき裂をオゾンクラックと呼ぶが、寒冷地域や長大橋といった特殊な環境下ではオゾンクラックの発生が多く報告されている。4.23)では、積雪寒冷地である北海道の橋梁におけるオゾンクラックの発生状況を調査しており、低温化においては、耐候性保護膜が氷結によって欠落したり、耐候性保護剤の滲出しが遅れたりすることにより、オゾンクラックが発生しやすくなることを報告している。

4.24)では、せん断変形が大きくなると支承表面の引張ひずみが大きくなり、引張ひずみが大きい場合にオゾンクラックが発生しやすくなることを示している。4.25)では、支承モデルの促進実験により、オゾンクラックが発生する条件を検討している。

以上、実構造物から回収したゴム支承の性能変化および促進実験によるゴム支承の長期性能変化予測に関する文献を調査した。橋梁用ゴム支承の100年以上の超長期暴露については、データがなく、超長期暴露試験を行うことにより、内部物性変化を調査することは有益なデータとなることが期待できる。

4.3 課題

以下に文献調査から明らかとなった暴露試験および構造物の長期耐久性に関する課題をまとめる。

- 1) 暴露試験を行う場合には、試験を遂行できる組織が試験体を管理し、関連するデータを確実に記録・保管する必要があると考える。また、定期的に技術レポート等にまとめておくことは有益と考える。超長期にわたる暴露試験を計画する場合には、その当時に想像しない周辺状況の変化により、試験の継続が難しくなる可能性も考えられる。そのため、架台を含め極力メンテナンスを必要としない暴露方法や、人為的な影響等により環境が変化しない場所での試験の実施方法を、十分に検討した上で試験を開始する必要があると考える。
- 2) 新材料を除き、構造材料単体の長期暴露試験は実施されている事例が複数存在する。今後、暴露試験結果と促進試験結果との関係性の解明や、暴露試験結果を数値解析により再現できる技術の進展などにより、超長期暴露試験結果を短期間で予測できる方法を確立することが望まれる。
- 3) 複合構造物として設計され新設されたものや、当初は鋼またはコンクリート構造物であったが、維持管理段階で補修され、複合構造物となったものなど、異種材料や異種部材が組み合わさって構造物を構成する複合構造物が増加している。それら複合構造物の長期耐久性を把握するためには、合成構造や混合構造などの複合構造の長期耐久性を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 4.1) 鳥取誠一, 土田伸治, 宮川豊章: ひび割れと鉄筋腐食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, コンクリート工学論文集, No.10, Vol.3, pp.1-15, 1999.
- 4.2) 吉田行, 嶋田久俊, 島多昭典: 初代十勝大橋コンクリートの長期暴露試験における経年調査について, 第 59 回 (平成 27 年度) 北海道開発技術研究発表会, Vol.67, No.3, pp.451-461, 2011.
- 4.3) 在田浩之, 鳥取誠一, 乾司, 北後征雄: 既設 RC 柱に鋼板被覆した場合の鉄筋腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.895-900, 1998.
- 4.4) 山路徹ら: 長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の耐久性評価に関する研究 (30 年経過時の報告), 港湾空港技術研究所資料 No.1324, 2016.
- 4.5) 大野茂: 蔵王温泉における金属材料暴露試験—チタン, ステンレス鋼, 銅, 銅合金等—, チタニウム・ジルコニウム, Vol.35, No.4, pp.212-216, 1987.
- 4.6) 若山萌美, 中西克佳, 加藤真志: 供用 50 年目を迎えた国内初の無塗装耐候性鋼橋梁の調査と健全度評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.2, pp.75-87, 2019.
- 4.7) 中島章典, 倉持弥奈, 出川佑莉, 磯光夫: 鋼とコンクリート界面の腐食の発生・進展に関する基礎的研究, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.417-422, 2011.
- 4.8) 福手勤, 横田弘, 濱田秀則: 鋼・コンクリートハイブリッド構造の海洋環境下における劣化性状, コンクリート工学論文集, 第 4 巻, 第 2 号, pp.89-99, 1993.
- 4.9) B. Benmokrane, A. H. Ali, H. M. Mohamed, M. Robert, and A ElSafty: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, Journal of Composites for Construction, Vol. 20, No.1, Paper No. 04015043, 2016.
- 4.10) Thomas Keller, Yu Bai, and Till Vallée: Long-Term Performance of a Glass Fiber-Reinforced Polymer Truss Bridge, Journal of Composites for Construction, Vol. 11, No.1, pp. 99-108, 2007.
- 4.11) 西崎到, 櫻庭浩樹, 富山禎仁: GFRP 引拔成形材の屋外環境における劣化と表面保護塗膜による劣化抑制効果に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.5, pp. II_13-II_21, 2015.
- 4.12) 代田忠, 山口富三雄: 炭素繊維複合材料の耐候性試験結果, 1997 年ウエザリング技術研究成果発表会, pp. 17-29, 1997.
- 4.13) 米丸啓介, 松本幸大: CFRP の長期耐久性試験, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 46 号, pp. 997-1000, 2014.
- 4.14) 米丸啓介, 桑原圭介: 屋外暴露 33 年目までの CFRP 板の劣化状態—CFRP 板の長期耐候性試験—, 日本建築学会技術報告集, 第 26 巻, 第 62 号, pp. 164-168, 2020.
- 4.15) 濱崎景太, 中村一史, 瀬戸内秀規, 柳沼謙一: ハイブリッド FRP 部材の接合方法の合理化と高耐久性化に関する検討, 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp. 146-154, 2014.
- 4.16) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 1.10 節, pp.311-319, 1989.
- 4.17) 日本免震構造協会 (編): 免震積層ゴム入門, 8 章, pp.90-109, 1997.
- 4.18) P.B Lindley (著), 松木勇 (訳): 天然ゴム橋梁ベアリング, 日本ゴム協会誌, Vol. 48, No. 2, pp. 91-96, 1975.
- 4.19) 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. 174-184, 1981.
- 4.20) 須藤千秋, 西 敏夫, 島田源一, 矢崎文彦, 奥津宣幸: 10 年間使用後の免震支承の性能変化評価と内部物性分布, 土木学会第 58 回年次学術講演会, I-382, pp.763-764, 2003.

- 4.21) 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.
- 4.22) Paramashanti, Kitane, Y., Itoh, Y., Kito, S., and Muratani, K. : Experimental investigation of aging effect on damping ratio of high damping rubber bearing, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol. 57A, pp. 769-779, 2011.
- 4.23) 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.
- 4.24) 兼子一弘, 柴山聡 : ゴム支承のオゾン劣化に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, VI-157, pp.313-314, 2011.
- 4.25) 廣畑幹人, 伊藤義人, 汪深 : 環境劣化因子とひずみによる天然ゴム支承のき裂発生に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp. 302-312, 2015.

(執筆者 : 今井 隆, 北根安雄, 櫻庭浩樹, 武野正和, 中村一史, 仁平達也, 松井孝洋)

第5章 300年超長期暴露への期待

5.1 土木構造物の耐久性の必要性

土木構造物は設計時に耐用年数を設定し、その要求性能にしたがって建造されているが、実際には要求が満たされる範囲で、維持管理を行いながら半永久的に供用され続けているのが現状であり、既に120年を超える構造物が存在している。一方で、複合構造物では鋼やコンクリート、FRPなどの材料を有効に組み合わせ、それぞれの材料特性を生かした形で構成されており、耐用年数を延ばすことのできる構造物であると考えられる。構造物は設計時の耐用年数を終えた時点で役割を終え、構造物を更新するという考え方もあるものの、より長く供用できるのであれば、使い続けるということが社会の要求でもあり、今後、我々土木技術者が考えなければならない課題であると言える。

このような考えのもと、複合構造委員会では、土木技術の魅力を次世代の技術者に伝えることを目的として、300年暴露プロジェクトを立ち上げ、今後の複合構造物の耐久性の必要性を検討した。特に、鋼とコンクリートの接合部が損傷すると、構造物の性能が保持されなくなるので、接合部に着目した超長期暴露試験をスタートさせた。また、FRPとゴム材料は素材そのものの耐久性に関する暴露試験データが不足していることから、FRPは紫外線を強く受ける状態で、ゴムは通常の大気環境で超長期暴露試験をスタートさせることとした。

5.2 産官学のそれぞれの役割

300年超長期暴露を実現させるためには、産官学の連携のもと、それぞれの役割を認識しながら進めていく必要がある。

産としての役割は、現状の材料の特性を生かし、それに応じた構造物の計画・設計・施工を行うことが基本であると考え。将来的には、技術の進歩による新材料の開発や、それらを効率よく組み合わせた構造物の計画・設計・施工が重要となる。また、適切な維持管理を行い、その時代に合った補修や補強を施すことにより、長期的に構造物を存続させることができると考える。

官としての役割は、現在供用されているインフラ、これから建設されるインフラの耐久性を国民に理解いただくことだと考える。そのために300年間を目指したこのプロジェクトの取組みは非常に重要な役割を担っていると考えられる。道路橋を例にすると、近い将来は自動運転、もっと先には車が宙を浮くことになれば道路自体に求める要求性能は変化すると思われる。しかしながら、地球上の物質は有限であり、超長期暴露で想定する期間内では大きく変化することは無いと思われ、構成する材料に多少の変化は生じるかも知れないが、鋼、コンクリートやFRP自体が無くなることはないと考えられる。そう考えると、使われ方が多少変化してもインフラを支える材料はマクロ的には変化しないと思われ、マクロ的に変化しない材料の超長期暴露性能の説明に取り組むことに大きな意味があることを国民に伝えていく必要がある。

学としての役割は、試験体の劣化経過の観察と力学試験結果に基づく劣化機構の理解と予測式の提案が行える研究を進めることである。また、促進試験との等価式の提案、そして、現実の部材が置かれる条件への展開、現実の部材が有する品質によるばらつきの考慮をしながら、300年保たないようであれば、上記調査研究に基づく改善向上への取り組み、これらを通した人材教育を行うことが必要であると考え。維持管理を疎かにすると劣化するという定性的なイメージは誰でも出来るが、数十年おきに載荷試験などを行うよう

な定量的な結果を示すことで、先を見据えることができる学生を育てる教育が必要である。

5.3 300 年超長期暴露への期待

土木構造物の供用期間が 100 年と言われるが、その先の維持について考えることは、現時点においてはあまりにも遠い将来であり、さらに 300 年先となると、もはや未知の世界と考えざるを得ないと思われる。しかしながら、300 年先はいずれ来るものであり、今回の 300 年超長期暴露プロジェクトは、現代の技術者から、未来の技術者へのメッセージである。そして、この壮大な計画は土木技術者としての新たな挑戦であると言える。

現状では、今ある材料との組み合わせ技術で最高のグレードを作ったとしても、どの程度の耐久性があるかは不明であるが、超長期を意識することで、これから開発されるであろう新しい材料や、グレードアップさせた構造計画など、様々な可能性を考えながら長持ちさせる構造物を計画・設計・施工できる技術の確立が必要となる。

その手始めとして、今回のプロジェクトが契機になれるように、これから取得するデータをもとに、300 年超長期供用できる構造物の実現を目指すことができればと考える。そのためには、しっかりとした技術の伝承、その時代に合った維持管理、どんなことにでも対応できる柔軟な学生の教育等、未来の技術者に期待することは大きい。

(執筆者：大久保宣人，大山 理，塩畑英俊，松本高志)