

鋼材と樹脂モルタルとの接着強度とその管理方法に関する研究

交通工学研究室 Cuevas Sandoval Julio Cesar

1. はじめに

日本は環太平洋火山帯に位置する列島国であり、少なくとも4つのリソースフェアプレートが絶えず衝突している状態である。すなわち、ユーラシアプレート/中国プレート、北米プレート、フィリピンプレート、太平洋プレートである。これらの衝突により、日本は頻繁に地震やそれに起因する津波の被害に晒されている。記録に残る最も古い地震は、西暦416年に奈良県で発生した。現在、気象庁は日本の領土内において年間平均で約1,500回の地震を観測している。このような状況により、日本は世界で最も厳しい建築基準法を整備せざるを得なくなっている。

大地震が発生した場合、緊急車両の通行や被災者の支援のためには、道路交通が重要な役割を果たす。2024年1月に昨年発生した能登半島地震では、地滑り、陥没、崩壊などにより、複数のインフラが被害を受けた。2024年3月に国土交通省が発表した報告書によると、阪神・淡路大震災後に設計された橋梁は大きな被害は見られなかったが、古い基準で設計された橋梁は、特に



写真-1 地震により橋台パラペット部に生じた段差

路面段差による被害が深刻であった。そして、橋台背面の土工部と橋面に大小の段差や隙間が多数あるケースが見られた。小規模の段差や隙間は応急復旧が迅速に行われ、緊急車両は通行することができた。その一方で、液状化現象等により地盤が最大1.5メートルも沈下した橋梁もあり、段差や隙間が大規模の場合は復旧が難しいため、交通が分断されてしまった。写真-1に橋台パラペット部に生じた段差の状況を示す。能登半島地震は被害が甚大だったため、交通の分断が多く、箇所が発生し、半島の一部地域では緊急車両や物資の到着が最大5日間も遅れてしまった。政府は自衛隊のヘリコプターやホバークラフトを活用して物資や人員の輸送を行った。

1.1 踏掛版の役割

橋台背面の橋梁へのアプローチ部に配置される踏掛版は、圧密や地震等による裏込め土の沈下によって路面に段差が生じることを防ぐために設置される鉄筋コンクリートの構造物である。踏掛版は図-1に示すように、橋台のパラペット上に設置されたプラットフォームに片側を支持し、もう片側を盛土上に設置する構造である。橋台背面の盛土が沈下しても、踏掛版を傾斜させることで段差を防止し、緊急車両の通行を確保することができる。

1995年の阪神・淡路大震災は、日本の歴史上、最大かつ最悪の被害をもたらしたものと考えられている。この災害の後、橋梁や道路構造物については緊急車両の安全な通行を確保するために、より確実な地震対策を盛り込んだ複数の耐震基準が改定された。1996年の道路橋示方書では、その他の改訂事項のひとつとして、橋台の種類、盛土の高さ、裏込め材や地盤の種別に応じて、

沈下が発生した場合でも交通機能の著しい低下を防ぐために、コンクリート製の踏掛版を設けるべきであると記載されている⁵⁾、⁶⁾。

踏掛版の設置は段差抑制システムとして有効性が実証されており、2024年に発生した能登半島地震でも、その効果が発揮されていた。しかしながら、鉄筋コンクリート構造の踏掛版の設置は、時間と費用がかかるため、主に高速道路や主要幹線などの交通量の多い橋梁に運用されている。日本の橋梁総数は約732,000橋で³⁾、その約30%（約215,000橋）に踏掛版が設置されている。踏掛版の設置がない橋梁は、市町村道に位置する橋梁で、その数は約517,000橋ということになる。そして、その多くは50

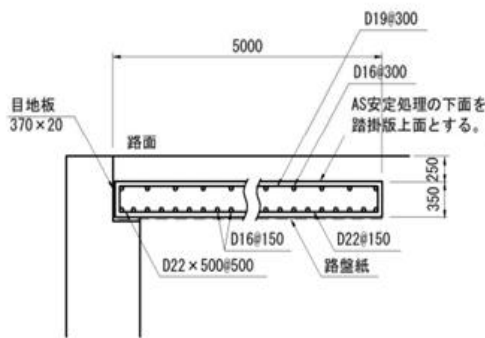


図-1 橋台パラペット部の踏掛版の構造

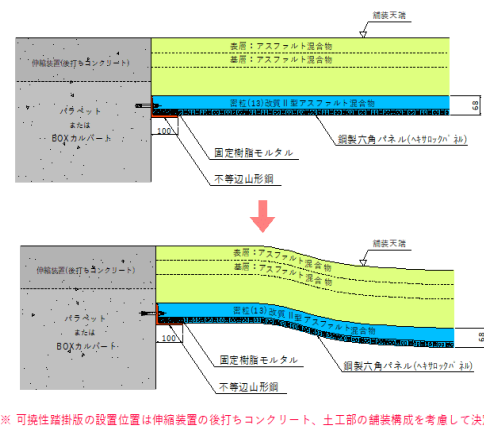
年以上前に建設された古い基準の橋梁である。さらに、昨今の維持修繕費の削減により、後付けで踏掛版を新たに設置することが困難な状況になっている。そのため、地震発生時においても車両の通行が可能となるような、安価で短時間で施工ができる踏掛版、あるいはその代替となるような施設やシステムの開発が必要である。

1.2 背面処理工「可撓性踏掛版」の概要と検討課題

橋台パラペット部の段差発生抑制システムの一つに、アスファルトコンクリートとハニカムセル状1補強材で構成される「可撓性踏掛版」が運用されている。アスファルトコンクリートは材料が入手しやすく、施工も簡便であり、打設後の養生にあまり

時間を要しないというメリットがあるが、引張や曲げ作用に対して強度が低いというデメリットがある。そのため、鋼製の六角形格子パネルを補強材として埋め込むことにより、ある程度の可撓性と破壊抵抗性の両方が得られるようになっている。これを平面のスラブ状に施工することにより、橋台やボックスカルバート等の構造物と土工部の境界における踏掛版として構築する。比較的施工が容易であることから、メンテナンスのプロセスでの一つの工種として施工することができる。

可撓性踏掛版と取付部は図-2に示すような構造で、橋台パラペットの背面にL型ア



※ 可撓性踏掛版の設置位置は伸張装置の打ち込みコンクリート、土工部の舗装構成を考慮して決定

図-2 可撓性踏掛版の概要と地盤沈下の場合の変形状況

ングルをアンカーボルトで固定し、これを受けとして可撓性踏掛版を樹脂モルタルで固定する。可撓性踏掛版自体は厚さ68mmのアスファルトコンクリートで、底部に鋼製六角格子パネルが埋め込まれている。圧密や地震等でその下の地盤に沈下が生じた場合、不等辺山形鋼がパラペット背面に固定されているため可撓性踏掛版の固定部は沈下しないで、舗装表面に段差が生じないで滑らかな曲線形状を呈するように変形する。その結果、パラペットと可撓性踏掛版の固定部に空洞が存在しても、路面に段差を生じることなく緩やかなスロープが形成させ、車両の通行が可能となる。¥

この工法の特徴は、既設橋への設置が容易で、施工時間が短く、アスファルト混合物が硬化して道路開放まで、交通遮断を大

幅に短縮できることである。さらに、従来の高価で工期のかかるプレキャスト踏掛版に比べ、安価で信頼性の高い代替策であるといえる。施工のプロセスでは、樹脂モルタルの硬化状況は色調の変化や表面のべた付き具合で判断している。樹脂モルタルの硬化程度は温度条件によってかなり左右されることが経験的に知られている。そのため、施工者の感覚的な判断で強度発現を推定しているのが実状である。

1.3 本研究の目的

上記のとおり、可撓性踏掛版には不等辺山形鋼と六角格子パネルを固定するための樹脂モルタルの施工管理に対して、硬化の判断に裏付けとなるデータがなく、経験的管理の不確実性が問題視されている。これまで、樹脂モルタルと不等辺山形鋼の接着強度は、表面の色やべた付き感などの要因に基づいて経験的に決定されていた。本研究では、不等辺山形鋼と同じ金属表面の樹脂モルタルの接着強度が、養生時間や養生温度によってどのように変化するかを、一面せん断試験を実施することで定量的に調査した。本研究の目的は、樹脂モルタルの硬化条件と付着強度に関する実測データを収集し、現場施工における品質管理のための基礎資料を得ることである。これにより、今後異なる条件で研究を行う際の裏付けデータが得られるだけでなく、このような工法の実施効率が向上し、プロジェクトの費用と時間の削減につながる。

2. 本研究の検討方法

2.1 樹脂モルタルに関して

樹脂モルタルは、セメントの代わりに樹脂主剤と砂やシリカなどの細かい骨材からなる複合材料である。樹脂モルタルは、従来のセメントベースのモルタルでは不相当であったり、使用できないような状況で使用されることが多く、耐久性に優れ、安価な材料を使用しているため、道路やコンクリートの補修やメンテナンスなど、幅広い建設分野でさまざまな用途に用いられている。橋台背面処理工法で使用される樹脂モ

ルタルは、本研究で使用されたものも、以下の3つの要素で構成されている。

表-1 樹脂モルタルの各化学化合物

名(商品名)	材料	化学物質の組成
ブレンマー RC-301XJ	主剤	メタクリル酸エステル, スチレン系樹脂液
ナイパー S D	硬化剤	ジベンゾイルパーオキシド(40%), ジブチルフタレート(48%), その他
細骨材	珪砂	主に二酸化ケイ素(SiO ₂)から成る砂

各材料の配合条件は、主剤 100 g に対して硬化剤を 5 g、珪砂を 480 g 混合する。

主剤に硬化剤を混合すると両者が反応し、珪砂を結合する重合反応を起こして、混合物の機械的性能が向上させる。反応が進むにつれ、材料は硬化し始めて付着も進行し、硬化時間と硬化温度の影響により、所望の付着強度が得られる。

2.2 付着強度試験の供試体

この実験で使用した供試体は、長方形形状の樹脂モルタルサンプルを 82.5×90×20mm の型枠に流し込み、長さ 120mm の溝形鋼 JIS G 319 (25×50×100mm) の上に置いたものである。

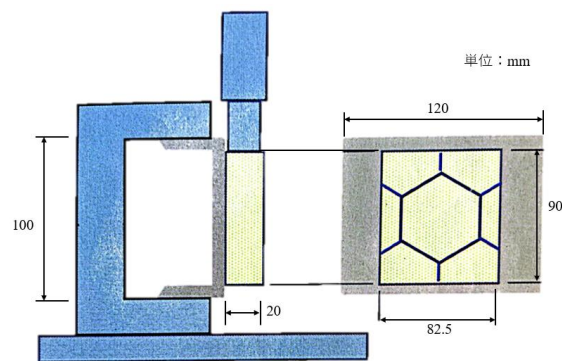


図-3 一面せん断試験の供試体と荷重方法の概要

2.3 一面せん断試験の概要

現在、樹脂モルタルと不等辺山形鋼の強度結合を評価するための標準化された試験方法は存在しない。しかし、実験手順は高橋教授の提案に基づき、一面せん断試験に関する背景研究を参考に、万能試験機による一面せん断試験を実施した。供試体には圧縮力が加えられたが、供試体にせん断力が加わるように装置の構成を変更し、供試体が破壊するまでせん断応力を加えるという条件を満たした。この実験により、変位量、荷重、移動量が得られ、それらを用いてひずみとせん断応力を経時的に算出した。養生温度は、温度上昇に伴う変化を観察するため、10℃、20℃、30℃とし、各温度値につき3バッチとした。各バッチにつき5つのサンプルが作成され、養生時間は90分、120分、150分、180分、210分という水準に設定された。表-2は、実験の条件の詳細を示している。

表-2 一面せん断試験条件

項目	内容
養生時間 (min)	90, 120, 150, 180, 210
養生温度 (°C)	10, 20, 30
撮影方法	スマホ
供試体の高さ (mm)	90
変位計スケール	50mm/10VFS
試験速度 (mm/min)	5
弾性区間 (%)	0.1
色調モニタリング	観測

2.4 実験手段

実験手順は、準備、注ぎ込み、実行の3つの段階に分かれている。段階1では、型枠に収まるように格子パネルを個々のパネルに切断した。必要なパネルをすべて切断した後、接着強度を高めるためにグラインダーを使用して金属部分の表面を研磨した。次に、型枠をアセトンで洗浄し、残留油分やほこりを除去し、外部要因の介入を防止した。メンテナンスのプロセスでの一つの工種として施工することができる。

アセトンが乾いた後、型枠に付着した樹脂モルタルが型枠の壁に付着するのを防ぐ

ため、型枠の部分に油性離型剤を塗布した。その後、この技術の担当者からの要望により、樹脂モルタルを流し込んだ現場の状況を再現するため、金属の接着面を主剤30グラム以下と硬化剤2グラムからなる混合物で覆った。約40分後、金属表面に流し込まれた混合物が粘着性を帯び、樹脂モルタルの注入準備が整ったことを示す。その後、クランプの補助により型枠が組み立てられ、個々の格子パネルが型に導入される。漏れを防ぐため、また継続使用のため、型枠は油ねんどで覆われた。

手順を続けると、表-3に記載された化合物とその比率を混合して樹脂モルタルを準備する。まず、主剤と硬化剤を混合し、瞬時に黄色から濃い緑色への色調変化が確認された。これは重合反応が始まったことを示す。混合物が完全に変色したら、均一性を確保するために細骨材を徐々に加えた。液体が分離するため、常に樹脂モルタルを混合する必要があった。混練しながら樹脂モルタルを5つの養生型枠に流し込み、硬化後、所定の温度に設定された養生室内に供試体を入れた。所定の養生時間を経て型枠を解体し、供試体を万能試験機にセットした。一面せん断試験を行い、結果をコンピュータに登録し、さらに分析に利用した。

3. 実験結果及び考察

実験の期間に応じて、1つの供試体につき4000から最大5000の値が算出された。さらに、供試体は養生時間によって供試体1(90分)、供試体2(120分)、供試体3(150分)、供試体4(180分)、供試体5(210分)をということで識別できる。

3.1 せん断応力と養生時間の関係

想定通り、養生時間が長くなるにつれ、荷重が増加し、その結果、せん断応力も増加する。また、養生時間が150分経過すると、温度によっては、樹脂モルタルが特定の範囲の値で安定することを示している可能性がある。このようなパターンは、特にグラフ3で確認できる。しかし、このよう

な仮定を立てるには、より長い養生時間でさらに多くの実験を行うことが重要である。

実験結果は施工現場で経験的に知られて

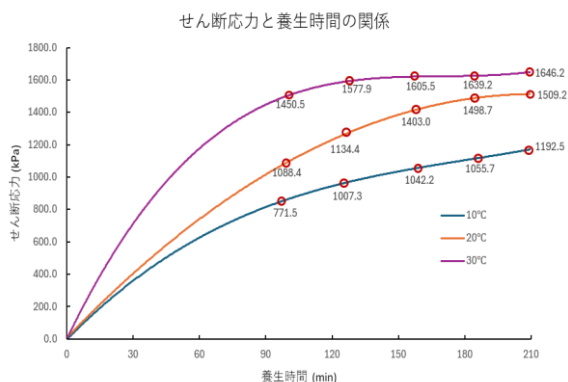


図-4 養生時間とせん断応力の関係

いるものに一致した。接着面積が 7425 mm²、接着強度が 80 kg/cm²であることから、最大荷重は 5940 kg であると考えられた。しかし、この実験の範囲が限られていたため、そのような値は得られなかった。このような目標を達成するには、範囲を拡大し、改善を行う必要がある。本実、この技術の担当者の一の監督下で行われたことは特筆すべきである。担当者が準備した供試体と、本実験で再現された供試体は同様の値を示しているため、結果の信頼性が確認された。

3.2 色調モニタリングに関して

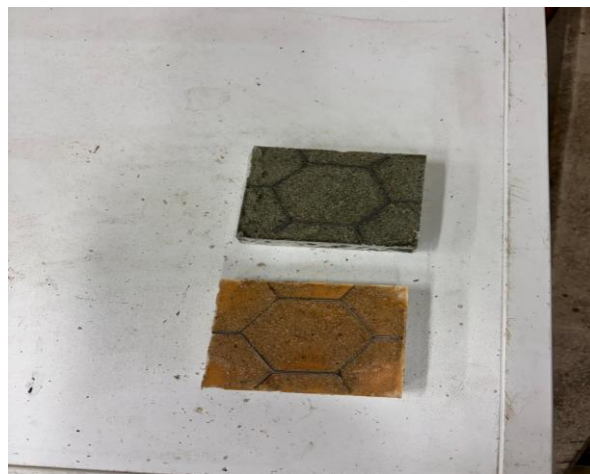
表-3 養生時間と樹脂モルタルの色調

	10°C	20°C	30°C
0-60分	濃緑色	濃緑色	濃緑色
60-120分	暗緑色	暗緑色	暗緑色
120-180分	灰色	灰色	灰色

色調の変化も施工現場における養生状況の重要な評価項目である。本実験では、養生中の色の変化が経験的に観察され、グラフ 4 が作成された。実験の結果から、樹脂モルタルが薄い灰色に変化するとすぐに、樹脂モルタルはより大きな荷重やせん断応力に耐えるようになると言える。また、色の変化は温度の影響も受け、低温では遅く、高温では速くなる。そのため、色によって判断のが難しい。

3.3 樹脂モルタルの配合設計変化に関して

混合物のより深い理解を得るため、また試みとして、硬化剤の量を 15%増量して混合設計を変更した。その結果、10°Cと 20°Cで荷重耐力が低下し、せん断応力が低下し、最大荷重は 4500N であった。さらに、色は濃い緑色から黄色に変化し、当初のパターンを満足するものではなかった。これは、メーカーが提供する特殊な材料の標準化が原因である可能性がある。耐荷重能力を向上させるために樹脂モルタルの混合設計を変更する必要がある場合は、その混合に使用される化学物質のメーカーに相談すべきである。



写-2 供試体の比較

4. 結論

本研究では、現場や今後の研究のためのバックアップデータを確立するために、異なる温度と時間の養生条件の下で樹脂モルタルの性能を評価した。異なる条件に従っ

て合計 48 個の供試体を作成し、万能試験機でせん断応力を評価した。得られたデータを分析し、供試体の特性を示す資料を作成した。さらに、養生状態を経験的に制御するために、色の変化も色調した。結果は以下のとおりである。

- 養生時間の経過により、せん断強度は徐々に増加する。強度発現は温度によって異なるが、おおむね養生時間 150 分でせん断強度は変化が少なくなる。特に、30℃で養生させた場合である。養生温度が高くなるとせん断応力も増加する。
- 養生温度における色調の変化はあまりなく、色によって判断は難しい。
- 現場施工で温度が低い場合は、必要に応じて加温養生を考えたほうがよい。
- 色調やべた付き感の変化も樹脂モルタルの品質評価には有効であるが、温度と時間の管理のほうがより合理的と判断される。

本研究により、せん断応力を大きく得るための条件を検討してきたが、いずれの条件も経験的に知られているものに一致した。今後、より多くのデータを取得し、メカニズムの理解を深めるためには、環境条件や硬化条件を拡大しながら研究を継続していくことが重要である。

参考文献

- 1) 踏掛版設置基準，中国地方整備局土木工事設計マニュアル，参 10-40，p. 3-5-143，2023.
- 2) PRMS 工法について．[オンライン]．2025 年 2 月 1 日アクセス，<https://www.osadagiken.co.jp/prms.html>
- 3) 国土交通省，道路施策の展開，pp. 1-2
- 4) 国土交通省，令和 6 年能登半島地震道路構造物（橋梁，土工，トンネル）の被害分析，参 1，pp. 2-4
- 5) 国土交通省，道路橋示方書 第 10 章 橋梁，pp. 22-23
- 6) 国土交通省 土木構造物標準設計，道路橋示方書の主な改訂概要，pp. 1-3，2023.

- 7) 背面処理工【可撓性踏掛版】について．[オンライン]．2025 年 2 月 1 日アクセス，<https://www.japacon.co.jp/pages/38/>