

プレキャスト壁高欄への部材更新時のアンカーおよび  
エポキシ接着による固定に関する基礎的研究

Structural Rigidity of Connections of Reinstalled  
Precast Bridge Barriers  
Using Combination of Steel Anchors and Epoxy Resin

2020 年 3 月

鹿児島大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻

坂本 和也

Kazuya SAKAMOTO



# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1 本論文の背景と目的	3
1.2 本論文の構成	10
< 第 1 章の参考文献 >	13
第 2 章 エポキシ樹脂の材料性能評価	14
2.1 概説	16
2.2 エポキシ樹脂の特性	16
2.2.1 エポキシ樹脂の種類および生産動向	16
2.2.2 エポキシ樹脂の力学的特性	18
2.3 エポキシ樹脂の高温高湿環境下における疲労特性	18
2.3.1 実験概要	19
2.3.1.1 実験供試体	19
2.3.1.2 供試体配合	19
2.3.2 試験方法	20
2.3.3 試験結果	21
2.4 フィラー（改質材）混入によるエポキシ樹脂の特性	23
2.4.1 フィラーの物理特性および化学成分	24
2.4.2 接着強度	25
2.4.2.1 試験方法	25
2.4.2.2 試験結果	27
2.4.3 圧縮強度	29
2.4.3.1 試験方法	29
2.4.3.2 試験結果	29
2.4.4 反応熱および硬化収縮	31
2.4.4.1 試験方法	31
2.4.4.2 試験結果	32
2.4.5 充填性能	34
2.4.5.1 試験方法	34
2.4.5.2 試験結果	35
2.5 本章のまとめ	39
< 第 2 章の参考文献 >	41

<b>第 3 章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証</b> .....	42
3.1 概説.....	44
3.2 あと施工アンカーについて.....	44
3.3 アンカーの引抜試験（その 1）.....	45
3.3.1 実験概要.....	45
3.3.2 実験供試体.....	46
3.3.3 実験結果および考察.....	48
3.4 アンカーの引抜試験（その 2）.....	50
3.4.1 実験概要.....	50
3.4.2 実験供試体.....	51
3.4.3 実験結果および考察.....	53
3.5 アンカーの引抜試験（その 3）.....	56
3.5.1 実験概要.....	56
3.5.2 実験供試体.....	57
3.5.3 実験結果および考察.....	58
3.6 本章のまとめ.....	61
< 第 3 章の参考文献 >.....	62
<b>第 4 章 模擬供試体による接合部の構造性能評価</b> .....	63
4.1 概説.....	65
4.2 静的載荷試験.....	65
4.2.1 実験概要.....	65
4.2.2 実験供試体.....	65
4.2.3 試験方法.....	69
4.2.4 実験結果および考察.....	70
4.3 200 万回の疲労耐久性試験.....	75
4.3.1 実験概要.....	75
4.3.2 実験供試体.....	75
4.3.3 試験方法.....	75
4.3.4 試験結果および考察.....	76
4.4 本章のまとめ.....	80
< 第 4 章の参考文献 >.....	81

<b>第 5 章 実構造物での施工性評価</b> .....	82
5.1 概説.....	84
5.2 プレキャスト壁高欄の設計.....	84
5.2.1 壁高欄の設計指針.....	84
5.2.2 設計の基本方針.....	88
5.3 プレキャスト壁高欄の接合部の要求性能.....	89
5.4 プレキャスト壁高欄と床版部との接合方法.....	90
5.4.1 プレキャスト壁高欄と床版部の接合箇所.....	90
5.4.2 プレキャスト壁高欄と床版部の接合構造.....	91
5.4.3 プレキャスト壁高欄同士の横連結部の接合構造.....	91
5.5 供試体の作製.....	92
5.5.1 型枠の製作.....	92
5.5.2 鉄筋ユニットの組立て.....	94
5.5.3 型枠の組立ておよび鉄筋セット.....	95
5.5.4 コンクリートの打込み.....	98
5.5.5 製品の脱型および接合面の処理.....	99
5.6 プレキャスト壁高欄の施工.....	101
5.7 本章のまとめ.....	112
< 第 5 章の参考文献 >.....	115
<b>第 6 章 実構造物における接合構造の性能評価</b> .....	116
6.1 概説.....	118
6.2 静的載荷試験の実験概要.....	118
6.2.1 試験方法.....	119
6.2.2 試験結果および考察.....	124
6.3 重錘衝突試験の実験概要.....	137
6.3.1 試験方法.....	137
6.3.2 試験結果および考察.....	139
6.4 本章のまとめ.....	140
< 第 6 章の参考文献 >.....	141
<b>第 7 章 結論</b> .....	142
<b>謝辞</b> .....	150



# 第 1 章

## 序論



第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的

日本では、高度経済成長期に建設された構造物の老朽化が深刻な問題となっている。特に、全国で73万橋を超えると言われる道路橋では、図-1.1および図-1.2に示すように建設年代の古いものが多く<sup>1)</sup>、建設後50年に達する道路橋の割合は、2023年3月には約39%、2033年3月には約63%に達すると報じられており<sup>2)</sup>、一部の道路橋では既に老朽化による変状が顕在化しているものも存在する。

国民の安全で安心な暮らしを守るためには、これらの老朽化した橋梁の適切な維持・管理が必要不可欠であるが、生産年齢人口の減少による労働力不足、財源の不足、人口の一極集中とのかつてない社会構造の変化の中で、良質な社会資本を次世代に継承することは極めて困難であり、課題も多く残されている。

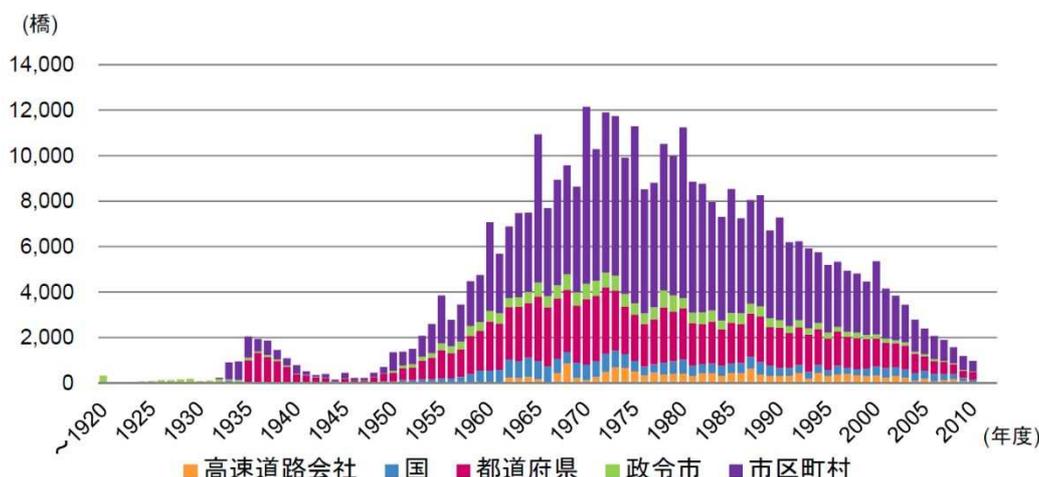


図-1.1 建設年度別の道路橋施設数

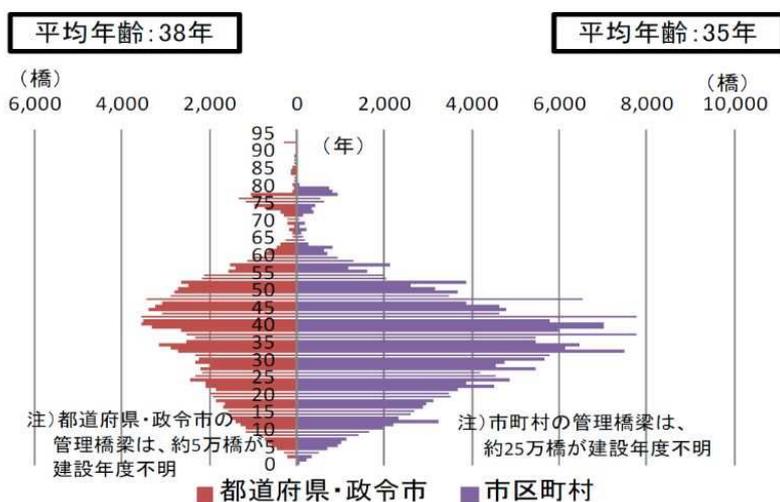


図-1.2 道路橋のストックピラミッド

## 第1章 序論

特に建設分野において、少子高齢化に伴う熟練技能者の不足は益々深刻な状況となっている。図-1.3 に建設投資額と建設就業者数の推移を示す<sup>3)</sup>。これを見ると建設就業者数は、平成9年度をピークに年々減少傾向にあり、平成26年度ではピーク時から約26%減少している。

また建設投資額も同様に平成4年度の84兆円をピークに減少傾向が続いており、平成22年度は約41兆円と平成4年度の半分程度にまで減少したが、その後増加に転じ、平成26年度は約51兆円となっている。建設投資は一定の回復をみせてはいるものの、平成26年度の建設投資額はピーク時の6割程度であり、依然として低い水準での推移となっている。



図-1.3 建設投資額と建設就業者数の推移

次に、建設業就業者に占める55歳以上と29歳以下の割合を全産業と比較したものを図-1.4に示す<sup>4)</sup>。

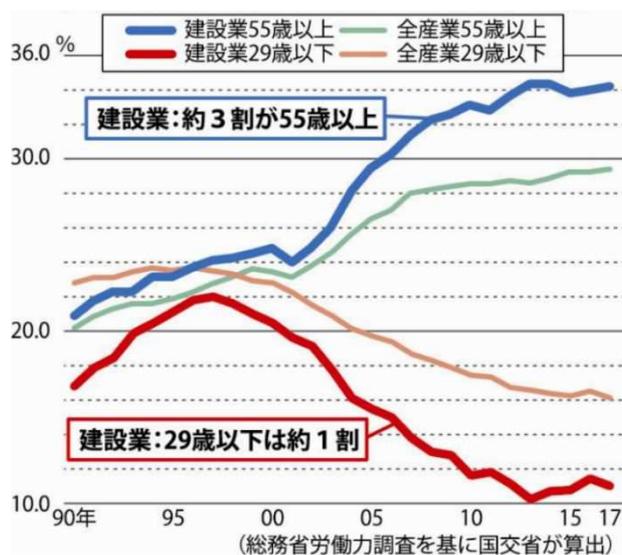


図-1.4 建設就業者数に占める55歳以上と29歳以下の割合

これを見ると全産業に比べ建設業では、55歳以上の年配者と29歳以下の若者の間に大きな開きがあることが分かる。もともと建設業界は3K(きつい, 汚い, 危険)という印象が強く, 若者から敬遠される要因が存在したが, 昨今の建設投資額の減少に伴う企業の経営状況の悪化や, 就業者数の減少による仕事量の増大, さらに労働条件の悪化により, ますます若者離れが深刻化している。このため国土交通省では, これらの問題に対処するために『i-Construction』(以下アイコンストラクション)という取組を2016年度から本格的に推進している。

アイコンストラクションとは測量から設計, 施工, 検査, 維持管理に至る全ての事業プロセスでICTを導入することにより建設生産システム全体の生産性向上を目指す取組みである。そこでは新3K(給与, 休暇, 希望)を掲げ, ICTを活用し省人化・省力化を実現することで, 一人あたりの生産性を上げる方向に力を入れている。

図-1.5 にトンネル工事の50年での生産性の推移, 及び新工法を示す<sup>5)</sup>。また図-1.6 に土工, コンクリート工の同じく50年間の生産性の推移を示す<sup>5)</sup>。これを見るとトンネル工事に関しては, この50年間で生産性を最大10倍に向上させているのに対し, 土工やコンクリート工ではほとんど変わらない状況となっていることが分かる。

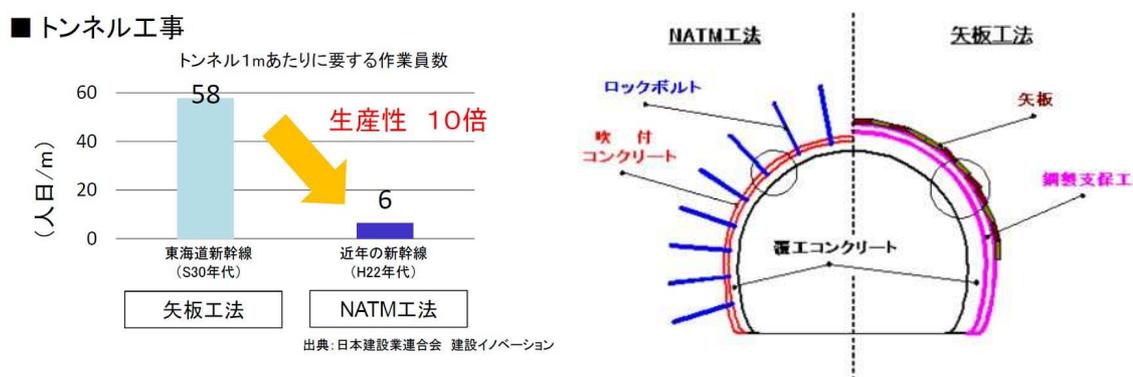


図-1.5 トンネル工での50年間の生産性の推移

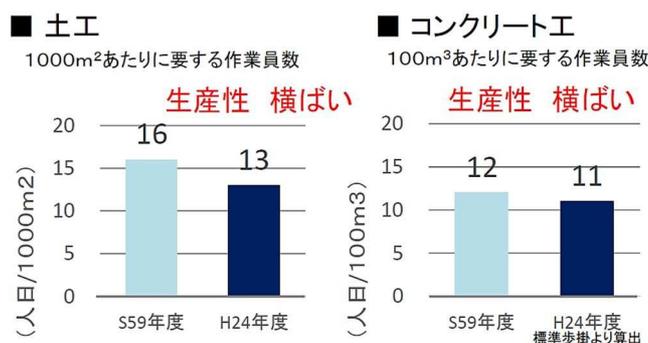


図-1.6 土工、コンクリート工での50年間の生産性の推移

# 第1章 序論

また図-1.7 に平成 24 年度の国土交通省発注工事実績を示す<sup>5)</sup>。これを見ると発注工事に占める，土工，コンクリート工の割合は全体の 40%であり，さらに現場打コンクリート関連は 16%を占めており，こうした現状から建設現場の生産性向上のためには，現場打ちコンクリート工の生産性向上を図ることが重要なポイントであると言える。

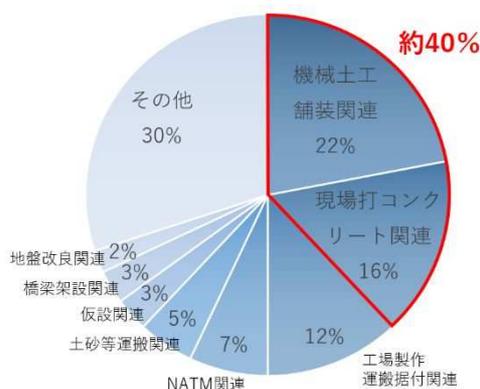


図-1.7 平成 24 年度国土交通省発注工事実績

アイコンストラクションの取組には大きな 3 つの柱があり，一つ目が ICT 技術の全面的活用，二つ目が規格の標準化，三つ目が施工時期の平準化である。二つ目の柱である規格の標準化では，工期短縮・品質の安定・熟練技能者不足等への対策として，プレキャストコンクリートの利用促進に力を入れている<sup>6)</sup>。

図-1.8 にそのプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートとの，建設作業の比較を示す。



図-1.8 現場打コンクリートとプレキャスト製品の比較

## 第1章 序論

現場打コンクリートの場合には、型枠製作、鉄筋加工・組立て、コンクリート打設、脱型、とプレキャスト製品に比べ工種も増え、またそれぞれが人手を要する作業であるため生産性向上が難しい要因となっている。一方プレキャスト製品は、工場であらかじめ製造された高品質な製品を、気象作用の影響を受けず施工できるメリットがあり、さらには性能試験や品質管理が容易で、省力化・工期短縮やコスト削減、労務の標準化、環境負荷低減などの効果も期待できる。

しかし図-1.9 に示すように、実際の工事でのプレキャスト化率（セメント使用量に占めるコンクリート製品の割合）は、近年少しずつ増加しているものの、ヨーロッパの国々と比較するとまだまだ低いというのが現状である<sup>7)</sup>。

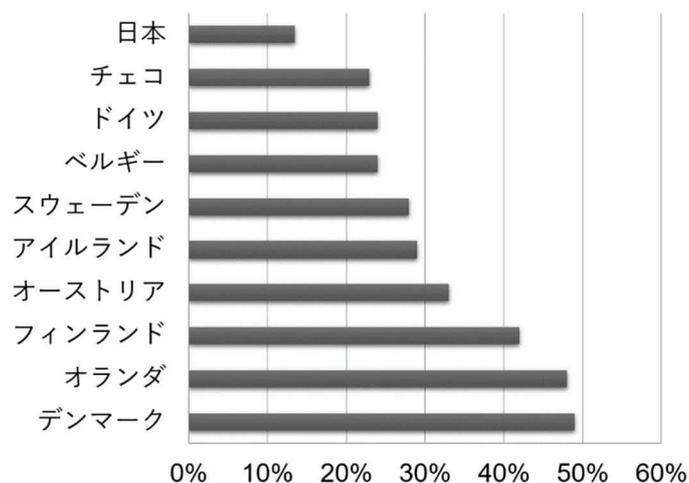


図-1.9 日本とヨーロッパ諸国のプレキャスト化率

その理由の一つとしてコストの問題があげられる。図-1.10 にプレキャストコンクリートのコストの内訳を示す。現場打ちコンクリートと比較すると、現場までの運搬費用の他にも、型枠費用などの設備投資がコスト増の要因となっている事が分かる。

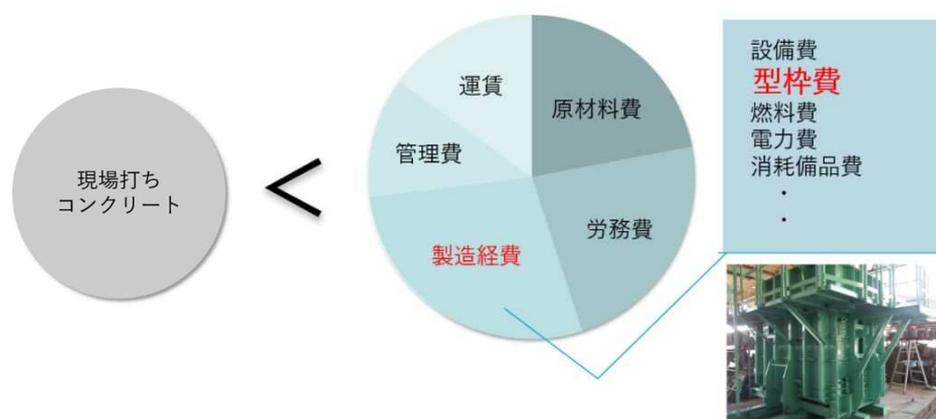


図-1.10 プレキャストコンクリートのコスト内訳

そのため施工現場では、現場打ちよりもプレキャストコンクリートの方が扱いやすいが、設計・積算段階では基本的にコストを優先した工法選定となるため、採用されにくいという実状がある。

しかし橋梁の壁高欄のような同一形状の線状構造物であれば、同じ型枠で製品を大量に製造できるため型枠費用などの設備投資が抑えられ、コストの面でも現場打ちコンクリート同等、もしくはそれ以下に抑えることも可能となる。実際に国土交通省では、アイコンストラクションの取組におけるコンクリート工の規格の標準化の中で、「コンクリート橋のプレキャスト化ガイドラインの概要」を発表し、壁高欄におけるプレキャスト化を推進している<sup>8)</sup>。

また令和元年7月には、(株)高速道路総合技術研究所出版の施工管理要領も改定され、その中にプレキャスト壁高欄の項目も新たに追記された<sup>9)</sup>。

そこで本論文ではまず、多品種少量生産に不利であるというプレキャストコンクリートの特徴を勘案し、同一形状が連続する線状構造物等である道路橋の壁高欄を対象として、その新・旧部材交換時のより簡便かつ機能的な交換手法の開発を研究テーマとして選定した。

またプレキャストコンクリートの普及率が低いもう一つの要因として、既存構造物とプレキャスト部材を一体化するための方法も、まだ十分には確立されていないことが挙げられる。図-1.11に現在プレキャスト壁高欄で実際に使用されている接合構造の一例を示す<sup>8,10)</sup>。

この継手構造の場合、床版部からのループ筋を製作する必要があるため、どうしても床版コンクリートの打ち直しが必要となり、さらにプレキャスト壁高欄との接合部には大量の無収縮モルタルを充填させる必要があるため、そのための型枠製作、脱型作業が発生し、結果的に工期も伸びプレキャスト化のメリットが見えにくいという課題がある。

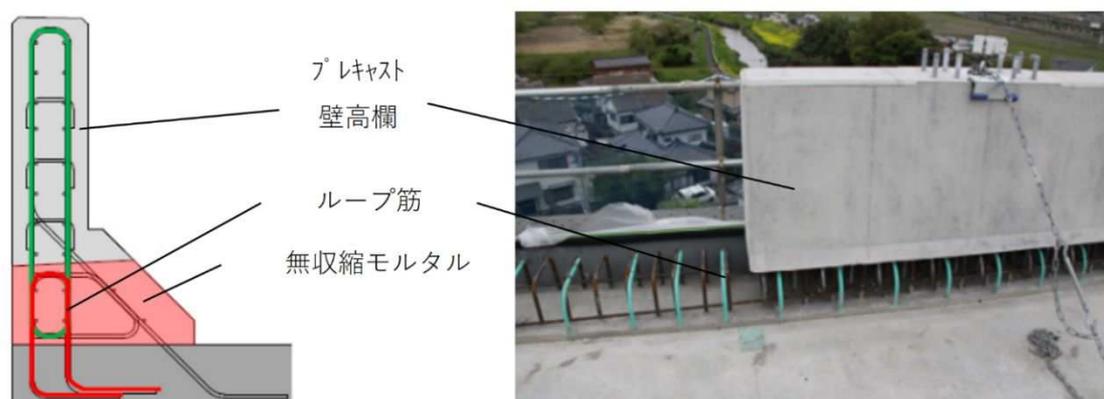


図-1.11 プレキャスト壁高欄の接合構造の一例<sup>10)</sup>

## 第1章 序論

高欄の更新工事において、既存の壁高欄を撤去した後プレキャスト製壁高欄に交換することができれば、工期短縮による交通渋滞の軽減など、そのメリットはさらに大きくなる。しかしその際に問題になるのは既存の床板の厚さや強度不足である。そのためにアンカーの引抜強度が十分に得られない、また写真-1.2に示すように、近年耐震基準の強化などで過密化された鉄筋が障害となって所定の位置にアンカーを挿入することができないケースが多発している。



写真-1.1 橋梁床版部の配筋



写真-1.2 橋梁壁高欄部の配筋

そこで本研究では、既存の躯体とプレキャスト製壁高欄を一体化させる方法として、図-1.12に示すように、アンカーとエポキシ樹脂を併用し、アンカーに要求される引抜耐力の一部をエポキシ樹脂の接着力に負担させることにより、アンカーの本数の削減ならびに埋め込み長さを低減する新たな接合方法を提案し、実用化に向けその工法の構造安全性および耐久性を確認するための一連の実験を行い、結果について取りまとめた。

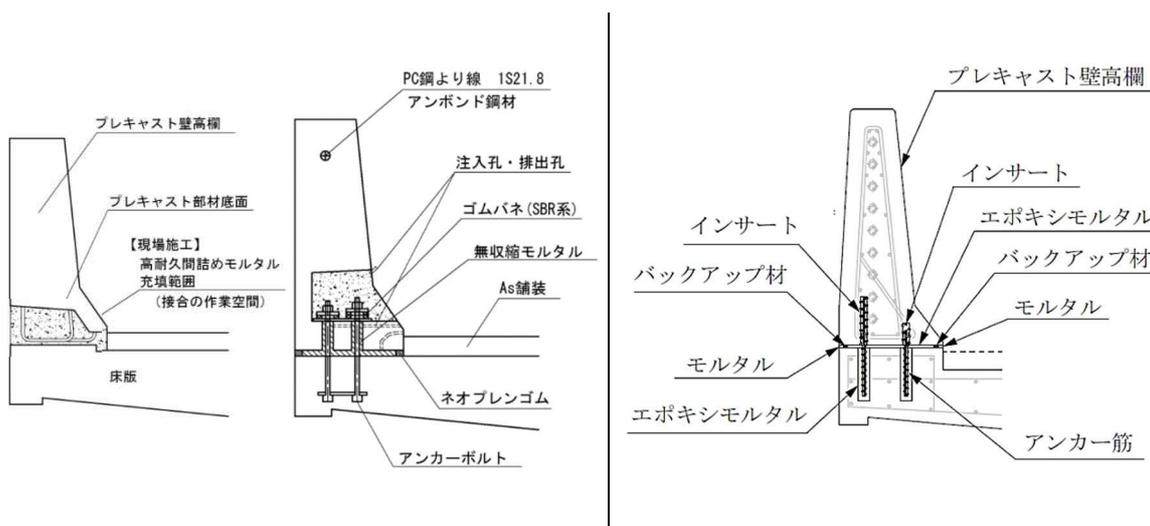


図-1.12 従来工法<sup>8)</sup> (左) と本研究の新たな接合方法 (右)

## 1.2 本論文の構成

本論文は、以下に示す7つの章により構成されている。

第1章は社会インフラの維持補修に関して、労働者不足や予算不足、少子高齢化などの社会的背景による様々な課題、また社会資本の老朽化の現状などを取り上げ、この研究の意義を定義し、これらの課題を解決する方策、ならびに本研究の目的と概要について述べた。

第2章では、プレキャスト部材をアンカーにて構造躯体コンクリートに一体化させるために用いるエポキシ樹脂の材料性能評価について述べた。エポキシ樹脂は一般的にアンカーの充填材やひび割れ注入材としては使用されているが、これだけ多くのエポキシ樹脂を主材料として使用することは、土木分野においてはあまり実例がない。特に橋梁に用いる場合に懸念される事項として、充填不良部の発生、樹脂自体の硬化収縮による接着不良部の発生、温度変化などによる接着力低下等が挙げられる。そこで、本章では、硬化収縮を低減するための特殊フィラーの混入率を様々に変化させて充填性、硬化収縮量、接着強度などについ

## 第1章 序論

ての実験を行い、使用するエポキシ樹脂の基本的な性能について評価し、その考察をまとめた。

第3章は、アンカーとエポキシ樹脂接着剤を併用することによるアンカーの接着効果を検証するため、引抜試験を実施し、その結果を取りまとめた。また、アンカーの引抜耐力は、使用するアンカーの径や埋め込み長さ並びに、充填材の性能により変化することから、エポキシ樹脂接着剤の効果を確認するため、実際に適用するプレキャスト部材の一条件に準じてアンカーを埋め込み、簡易引張試験機を用いてアンカーの引抜耐力を測定した。

第4章では、実構造物の壁高欄の取換えを想定して、プレキャスト部材と既設床版を模擬したブロックを作成し、両者を実際の施工と同様にエポキシ樹脂とアンカーを用いて接合させたうえで、静的曲げ載荷試験により接合部の性能を確認した結果を示した。さらに、同様のブロックに対して200万回の疲労試験も実施し、その結果についても考察した。

第5章では、実構造物を想定して、実物大の供試体を製作し、実際の施工手順に従って製品を施工し、作業性やエポキシモルタルの充填性を確認すると共に、施工時間を計測し、作業工程における場所打ちコンクリートとの比較を行った。

第6章では、今回の研究において新たに開発した道路橋壁高欄の実物大の試験体に対して、実際の車両の衝突荷重を想定した静的載荷試験を、高欄の中央部、横連結部、端部の3箇所で行い、さらに横連結部において重錘による衝突実験を実施した。これらの結果をもとに、新たに開発した壁高欄の接合部の構造安全性を評価した。

第7章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

## 第1章 序論

### 第1章 序論

課題に対する解決策として新しい工法を提案



### 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

提案工法に使用する材料の性能を評価



### 第3章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証

実際に提案工法により引抜耐力が向上するのか検証



### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

さらに接合部の模擬供試体にて耐力アップ，耐久性を最終検証



### 第5章 実構造物での施工性評価

実物大の供試体で施工性を確認し，生産性向上を評価



### 第6章 実構造物における接合部の構造性能評価

静的載荷試験，重錘衝突試験にて本工法の構造安全性を最終確認



### 第7章 結論

<参考文献>

- 1) 国土交通省 今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について  
<https://www.mlit.go.jp/common/001023145.pdf>
- 2) 令和元年度国土交通白書
- 3) 国土交通省 i-Construction の推進について  
<https://www.mlit.go.jp/common/001170255.pdf>
- 4) 厚生労働省 建設労働者を取り巻く状況について
- 5) 国土交通省 建設現場の生産性に関する現状  
<https://www.mlit.go.jp/common/001113550.pdf>
- 6) 市村靖光，高野進，笹川隆介，古本一司：コンクリート工の生産性向上のためのプレキャスト化の推進について，2016年12月
- 7) (社)日本コンクリート工学協会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書
- 8) 国土交通省 コンクリート橋のプレキャスト化ガイドライン  
<http://www.mlit.go.jp/common/001240409.pdf>
- 9) (株)高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領，令和元年7月
- 10) DAK式プレキャスト壁高欄工法研究会：DAK式プレキャスト壁高欄「設計・施工ガイドライン」，平成29年3月

## 第 2 章

### エポキシ樹脂の材料性能評価



## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

### 2.1 概説

エポキシ樹脂は熱硬化性樹脂の一種で、分子内にエポキシ基を有する化合物の総称であり、塗料や接着剤として盛んに使用されている。基本的な製法は主剤と硬化剤を混合することであり、この主剤と硬化剤の組み合わせにより液体から固体まで様々な形態や用途で使うことが可能となる。

今回の工法では、コンクリート同士を一体化する目的で使用するため、コンクリートが有する性質のうち、アルカリ性が高いことや、ひび割れの発生・進展、体積変化が生じることに對して留意する必要がある。一般的にエポキシ樹脂は耐アルカリ性が高いとされており、またひび割れに對する追従性も高い材料である。しかし橋梁に用いる場合に懸念される事項としては、充填不良部の発生、硬化収縮による接着不良部の発生、温度変化などによる接着力低下が挙げられる。そこで、内部収縮を抑制するためのフィラーを改質材として樹脂に混入することとし、その混入率を様々に変化させて充填性、硬化収縮量、接着強度などについての実験を行い、考察をまとめた。

### 2.2 エポキシ樹脂の特性

#### 2.2.1 エポキシ樹脂の種類および生産動向

数多くの高分子材料の中でエポキシ樹脂は、接着性、寸法安定性、機械的強度、さらには現場作業性に優れているため、橋梁・ダム・道路・トンネル・下水道等の土木構造物に種々の形式（接着剤、ライニング剤、断面修正材、注入材等）で利用されている。さらに常温で硬化接着することや、硬化の際にガスなどが発生しないこともあり、厚付けが可能で土木分野への使用に最も適した樹脂材料と言える。

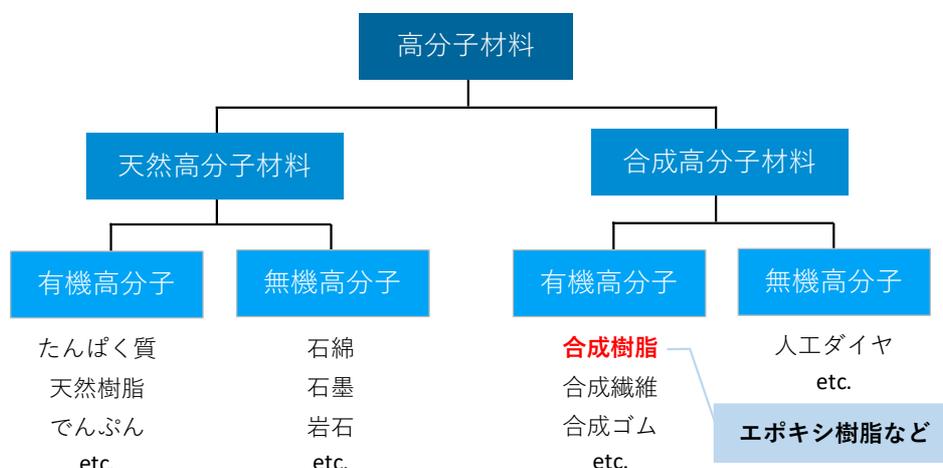


図-2.1 高分子材料の分類<sup>1)</sup>

## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

エポキシ樹脂は図-2.1 に示すように、高分子材料のひとつであり、さらにその中の有機高分子材料の合成樹脂である。また合成樹脂にも、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂の分類があるが、力学的特性に優れた熱硬化性樹脂に分類される。

またエポキシ樹脂は 1930 年代に開発されて以降、様々な産業分野で応用実績を積みながら発展してきた。用途としては電気特性，強度，耐溶剤性といった特性を活かし，塗料や接着剤，電気・電子部品，建設関連で使用されている。

しかし図-2.2 に示すように，国内の生産量は減少の一途をたどっている。国内需要の動向を見ると（図-2.3）塗料が最も多く，次いで電気，その次に土木・建築用途となっている<sup>2)</sup>。

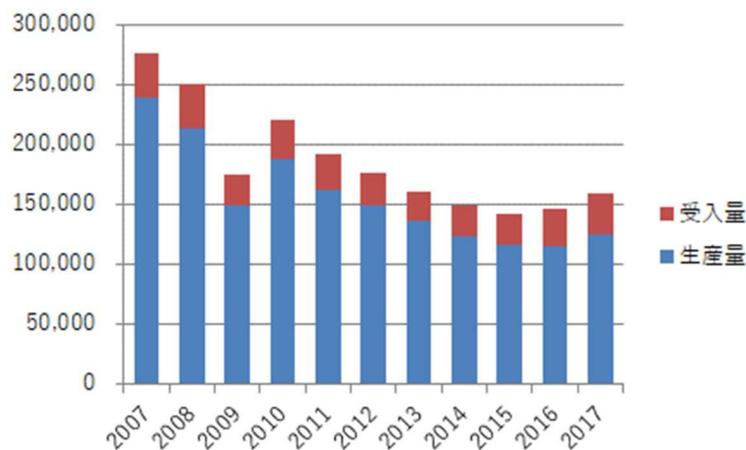


図-2.2 エポキシ樹脂の国内動向



図-2.3 エポキシ樹脂の国内動向

次に世界におけるエポキシ樹脂の需要を見ると<sup>3)</sup>，今後も年々増加することが見込まれている。世界需要の約半分を占めるとともに，世界最大の生産国にもなっているのが中国である。大規模な生産設備を有し，汎用タイプのエポキシ樹脂

はその安さから中国製品が世界を席卷している。

その一方で、高付加価値タイプのエポキシ樹脂についてはまだ途上にある。高付加価値タイプの生産能力を増強し始めているものの、技術面でもまだその需要を満たしてはいない。日本のエポキシ樹脂ユーザーは、汎用タイプのエポキシ樹脂を輸入に切り替え、高付加価値製品を日本で調達する動きを見せている。

### 2.2.2 エポキシ樹脂の力学的特性

エポキシ樹脂の力学的特性としては、熱硬化性樹脂の中では、①硬化収縮がもっとも小さい。②被着体を選ばずによく接着する。③耐水・耐アルカリ性に優れている。④電気絶縁性に優れているなどの特徴を持つ材料である<sup>4)</sup>。

表-2.1 にコンクリートと代表的なエポキシ樹脂であるビスフェノール系樹脂との物性値の比較を示す。

表-2.1 コンクリートとエポキシ樹脂の物性値の比較

	単位	コンクリート (kg/cm <sup>3</sup> )	エポキシ樹脂 (ビスフェノール系)
比重		2.3～2.5	1.1～1.2
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	1.5～3.0	35～84
弾性率	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	22～33	2.0～5.0
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	18～50	100～200
曲げ強度	N/mm <sup>2</sup>	2.5～7.0	60～120
線膨張係数	10 <sup>-5</sup> cm/cm・°C	1.0	4～8
熱伝導率	10 <sup>-4</sup> cal/cm・sec・°C	60	4.2～5.0

### 2.3 エポキシ樹脂の高温高湿環境下における疲労特性

エポキシ樹脂などの高分子化合物はガラス転移温度を超えると物性値が急激に低下する。その為周辺温度が上昇する夏場に繰り返し荷重を受けると、エポキシ樹脂の性能が低下することが確認されている。しかしガラス転移温度はエポキシ樹脂の種類により異なるため、対象構造物の最高温度を予測し、それ以上の転移温度を持つ材料を使用することで問題を解決することができる。

そこで温湿度環境振動試験装置を用いて雰囲気環境を温度 60°C、湿度 80% に設定し、200 万回の繰り返し振動を与え、動弾性係数の変化を確認するとともに、200 万回疲労後の試験体と無疲労試験体において曲げ強度試験を実施し、疲労特性を確認した。

### 2.3.1 実験概要

#### 2.3.1.1 実験供試体

実験に使用した供試体は  $40 \times 40 \times 160$  (mm) の角柱供試体を幅 10mm のエポキシ樹脂で接着し、全長が 330mm になるよう製作した。比較用としてモルタルのみの試験体も製作し試験を行った。実験状況を写真-2.1 に、供試体の寸法を図-2.6 に示す。また実験に用いたエポキシ樹脂は市販の物で、広くコンクリートの打継用として利用されている 2 液性のものを使用した。



写真-2.1 実験状況

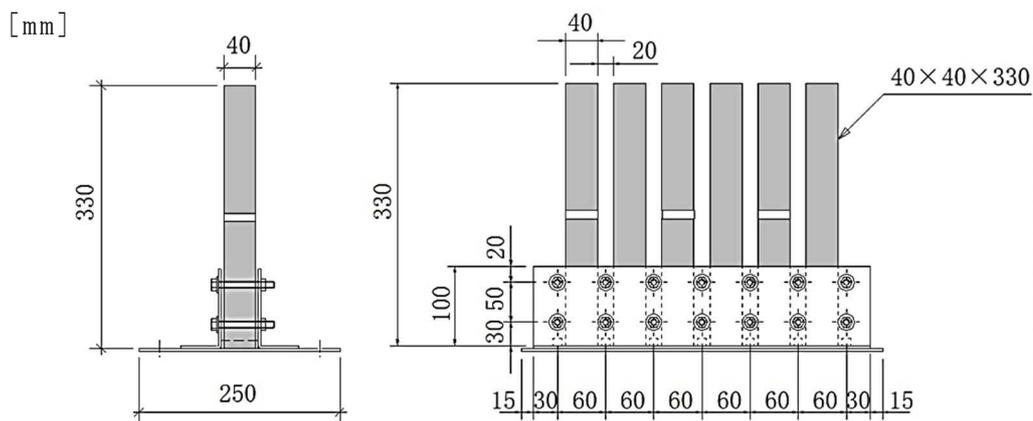


図-2.4 供試体の寸法

#### 2.3.1.2 供試体配合

供試体の配合を表-2.2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を 0.4 とした。供試体は品質のバラツキを抑えるために、全ての供試体を一回のミキシングで製作した。

表-2.2 供試体の配合

W/C	S/C	W	C	S	Ad
0.4	1.56	307	767	1197	3.8

ここで, W: 水 (密度  $1.0\text{g/cm}^3$ ), C: 普通ポルトランドセメント (密度  $3.16\text{g/cm}^3$ )

S: 砕砂 (密度  $2.6\text{g/cm}^3$ ), Ad: ポリカルボンサン系高性能減水剤 (密度  $1.02\text{g/cm}^3$ )

### 2.3.2 試験方法

試験は IMV (株) 社製の i230 振動試験装置 (写真-2.1) を使用し行った。雰囲気温度は, 夏場の壁高欄部の最高温度を想定し  $60^\circ\text{C}$  とし, 湿度は 80% とした。また蘇迪らによる既往の研究<sup>5)</sup>では, 首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測の結果は, 振動数の平均値が  $3.2\text{Hz}$ , またその時の最大加速度は  $50\text{gal}$  となっている。よって式 2.1 より, 振動数を  $30\text{Hz}$  とした場合に換算し, 加速度  $468\text{gal}$ , P-P 振幅  $0.26\text{mm}$  の振動を 200 万回繰返した。

$$E = 2\pi^2mf^2d^2 \quad \text{式 2.1}$$

ここで, E: 振動エネルギー, m: 質量 (g), f: 振動数 (Hz), d: 片振幅 (mm) である。また超音波伝搬速度と動弾性係数の関係は図-2.5 に示すように高い相関関係が確認できる<sup>1)</sup>。そこで 33 万回ごとに写真-2.2 に示すように, 超音波の伝播速度を測定し, 動弾性係数の変化を確認した<sup>6)</sup>。

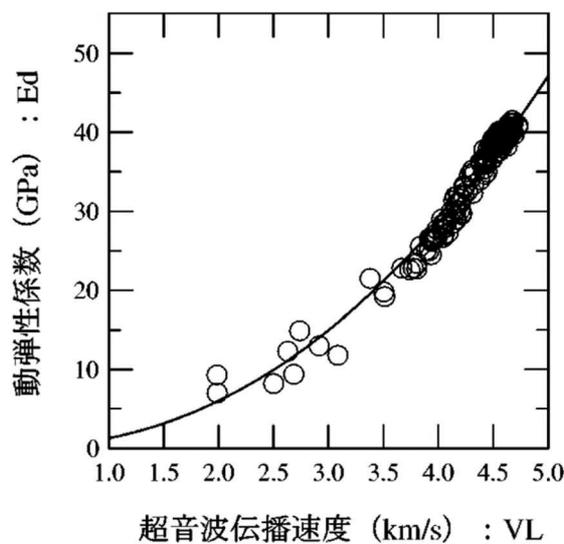


図-2.5 超音波伝搬速度と動弾性係数の関係



写真-2.2 振動試験装置



写真-2.3 伝搬速度測定状況

### 2.3.3 試験結果

モルタルのみの供試体の超音波伝搬速度の変化を図-2.6 に示す。

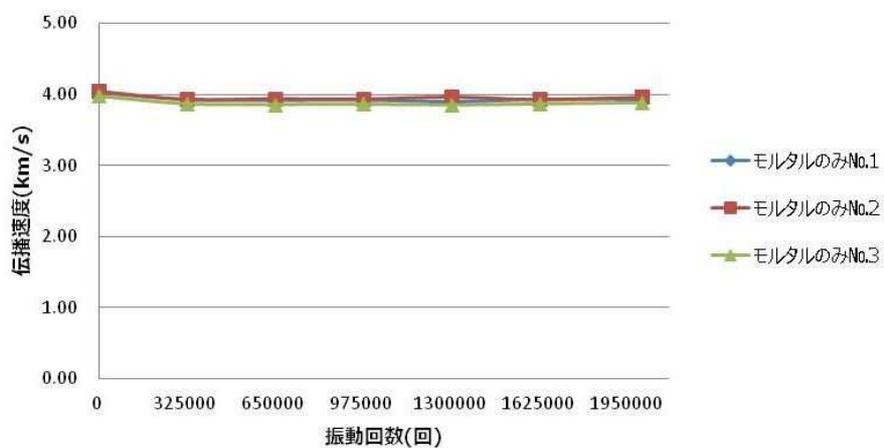


図-2.6 モルタルのみの供試体の伝搬速度変化

## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

これを見ると3体の試験体ともに、200万回までの振動において、伝搬速度に変化は見られなかった。次にモルタルをエポキシ樹脂で接着した供試体の超音波伝搬速度の変化を図-2.7に示す。こちらも200万回までの振動において、伝搬速度に変化は見られなかった。

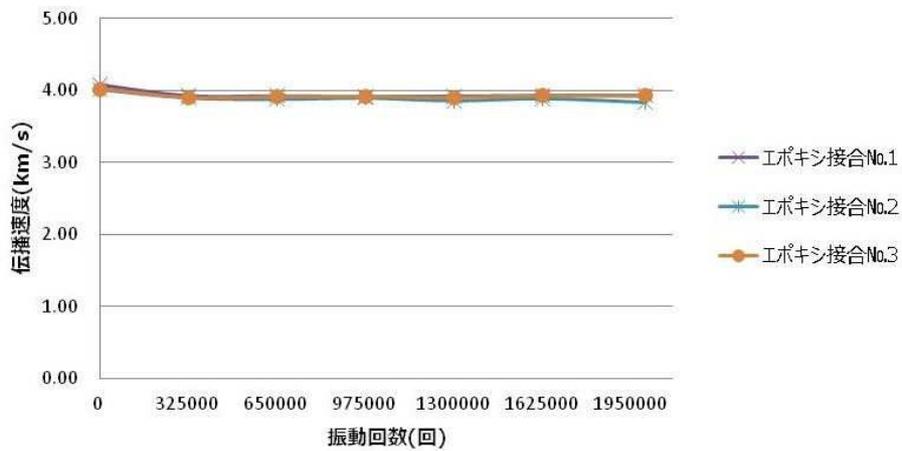


図-2.7 エポキシ接合の供試体の伝搬速度変化

次に200万回振動後の試験体と、無疲労試験体の曲げ強度試験の結果を図-2.8に示す。モルタルのみの供試体もモルタルをエポキシ樹脂で接着したどちらの供試体も、ヤング率の違いによるひずみの差は確認されたものの疲労前と疲労後での傾きの違いは確認されなかった。

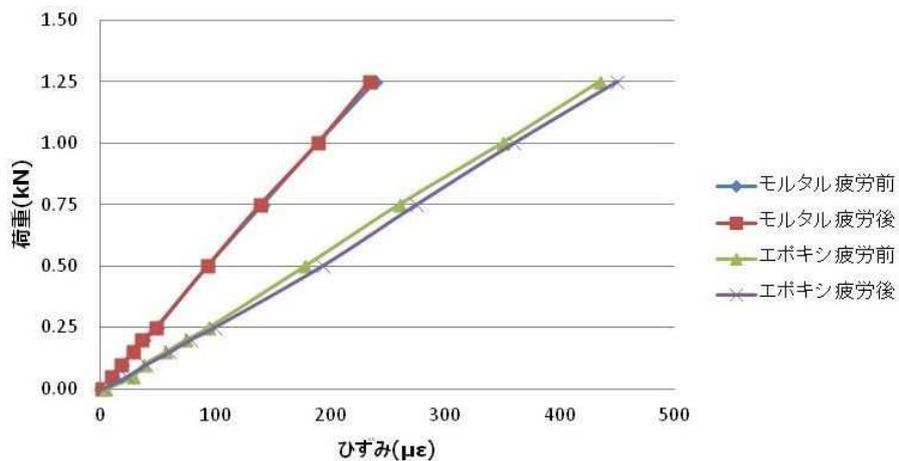


図-2.8 荷重-ひずみの関係

その時の破壊強度を表-2.3に、破壊の状況を写真-2.4に示す。どちらの供試体も疲労前と200万回疲労後の破壊強度に大きな違いはなく、強度の低下も確

認められなかった。またモルタルをエポキシ樹脂で接着した供試体の破断状況を確認すると、破断面は、エポキシ接着剤とモルタル部の界面ではなく、モルタル部分での材料破壊を起こしていることが分かる。これにより、エポキシ樹脂とモルタルの接合面は 200 万回疲労後も高い接着性能が維持されていることが確認できる。

表-2.3 疲労前と疲労後の破壊強度

	疲労前 (N)	200 万回疲労後 (N)
モルタルのみ	1476.7	1432.5
エポキシ接合	1456.6	1472.7



写真-2.4 エポキシ接合供試体の破断状況

#### 2.4 フィラー（改質材）混入によるエポキシ樹脂の特性

エポキシ樹脂は力学的特性に優れており、土木分野では接着剤や被覆材など多用途で利用されている。しかし接合部の主要材料として使用された事例は少なく、硬化収縮に伴う内部応力によりエポキシ樹脂自体にひび割れ等の破損、欠陥が及ぶ事も考えられる。この問題を抑制するには、フィラーを改質材として混入することが効果的であるという既往の研究に基づき<sup>7)</sup>、今回、エポキシ樹脂に粒度分布を調整したフィラーを混入し、混入率の違いによる硬化収縮、充填性能の確認を行った。

## 2.4.1 フィラーの物理特性および化学成分

試験に用いた樹脂はアルファ工業（株）社製のアルファテック 840S という製品である。これは、湿潤面接着や発熱抑制、高流動性、低収縮などの特徴を持つ。この樹脂に混合するフィラーの材料特性を把握するため、蛍光 X 線（XRF）、X 線回折装置（XRD）を用いて化学組成と鉱物組成を調べた。その結果を表-2.4 と図-2.9 に示す。

XRF の結果からフィラーの主成分は  $\text{SiO}_2$  であることが分かる。また、XRD のパターンから鉱物の定性を行うと、ほぼ結晶質の石英で構成されている事が分かる。

表-2.4 XRF 分析による  
フィラーの化学組成

元素	含有量 (mass%)
$\text{SiO}_2$	88.67
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7.57
$\text{CaO}$	1.55
$\text{K}_2\text{O}$	0.71
$\text{TiO}_2$	0.66
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.64
$\text{SO}_3$	0.10
$\text{SrO}$	0.003
$\text{BaO}$	0.002
$\text{MnO}$	0.001

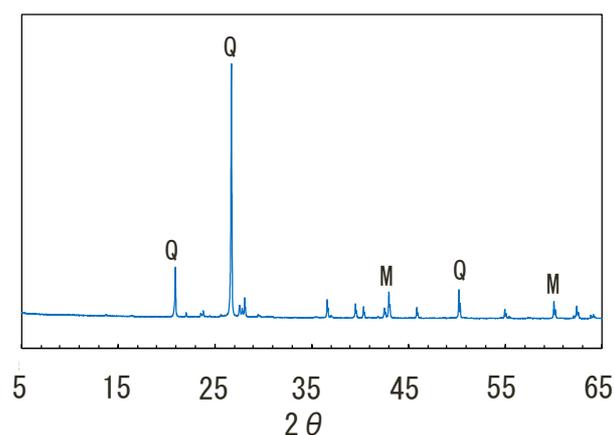


図-2.9 XRD 解析による鉱物組成

また、図-2.10 にフィラーの粒度分布を示す。図から、フィラーの粒径の大半は  $300\ \mu\text{m}$  ~  $600\ \mu\text{m}$  の細かいものであったが、 $75\ \mu\text{m}$  のふるいを通過するほどの微粒分はほとんど含まれていないことが分かった。このことから、フィラーを混入することでエポキシ樹脂の粘性がある程度増加すると考えられるが、微粒分による過度な粘性の増加は少ないと想定された。

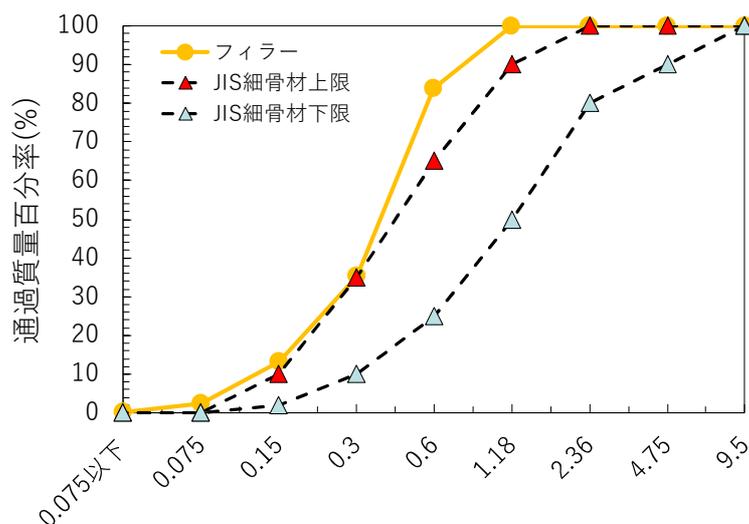


図-2.10 フィラーの粒度分布

## 2.4.2 接着強度

### 2.4.2.1 試験方法

フィラー混入率の違いによるエポキシ樹脂の接着力を調べるため、フィラー混入率 0%、25%、50%、60%（体積置換）のエポキシ樹脂を用いた供試体を 3 体ずつ製作し、簡易型引抜き試験機にて引抜き試験を行った。また、比較用として無収縮モルタルについても同様に試験を行った。試験の概要図を図-2.13 に、また試験前の供試体の状況を写真-2.5 に示す。

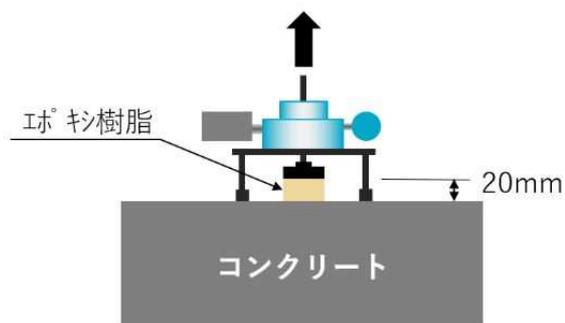


図-2.11 接着強度試験の概要

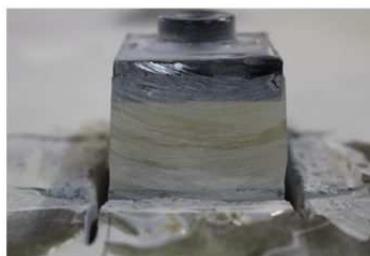


写真-2.5 供試体状況

供試体は、まず既設床版を模擬したプレキャストコンクリート版、幅 1000mm、長さ 2000 mm、厚さ 100mm にエポキシ樹脂を流しこむための紙製の枠を接着し、そこに高さが 20 mm となるよう引抜き試験用のアタッチメントをセットし、その枠の中にエポキシ樹脂を流し込んだ。プレキャストコンクリート版の配合を表-2.5 に示す。また供試体作製状況を写真-2.6、2.7 に示す。

表-2.5 プレキャストコンクリート版の配合

W/C (%)	単分量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C	P	S	G	AD
51.5	172	334	201	755	903	5.80

ここで、W:水(密度 1.0g/cm<sup>3</sup>), C:普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>)  
 P:炭酸カルシウム(密度 2.7g/cm<sup>3</sup>), S:砕砂(密度 2.6g/cm<sup>3</sup>), G:砕石(密度 2.61g/cm<sup>3</sup>), Ad:ポリカルボンサン系高性能減水剤(密度 1.065g/cm<sup>3</sup>)



写真-2.6 供試体の作製状況①

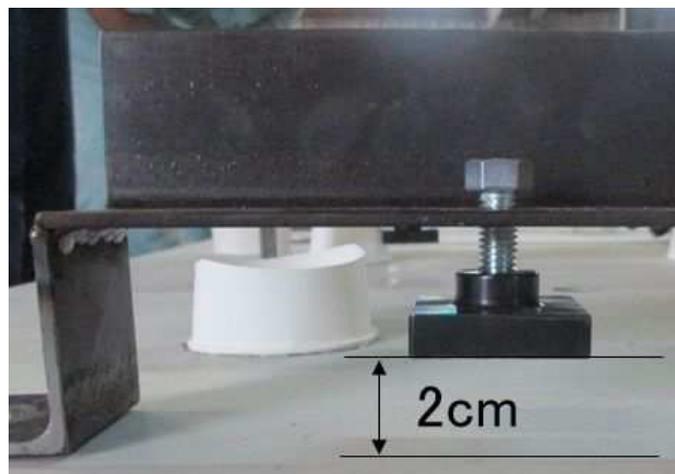


写真-2.7 供試体の作製状況②

引抜試験は、ファイラー混入率の違う4種類の供試体をそれぞれ3体準備し、7日間養生した後に、アタッチメントに沿って40×40mmの切り込みをプレキャストコンクリート版に入れ簡易引抜き試験機を用いて行った。試験の状況を写真-2.8に示す。

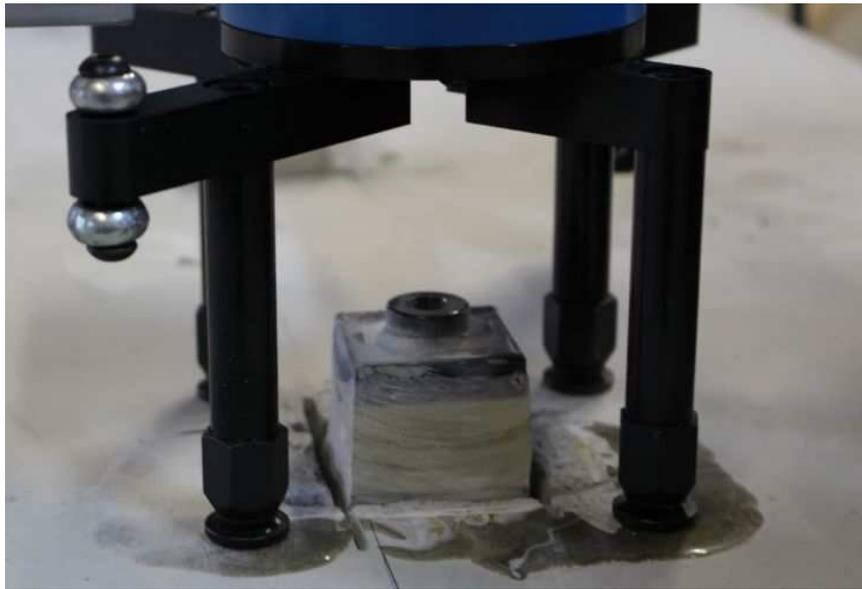


写真-2.8 引抜試験の状況

#### 2.4.2.2 試験結果

引抜試験の結果を図-2.12に示す。結果は3体の平均値である。また試験後の破断面の状況を写真-2.9に示す。これを見ると破壊はエポキシ樹脂とコンクリートとの接着面の近傍の、コンクリート部分で起きていることが分かる。いずれの供試体も同じように接着面近傍のコンクリート部分で破断が起きており、これはコンクリートの脆性的な凝集破壊であり、エポキシ樹脂の接着強度は、フィラーを混入しても、これらよりも高いことが確認できる。

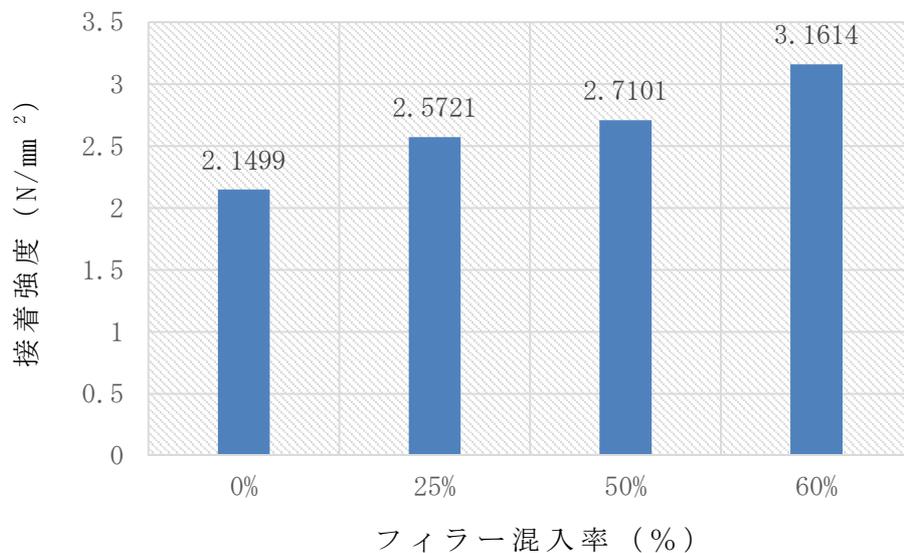


図-2.12 接着強度試験の結果



写真-2.9 引抜試験後の破断面の状況

また、フィラー混入率が高いほど接着力が高くなる原因としては、フィラー混入率の低い供試体はエポキシ樹脂の収縮量が大きく、図-2.13に示すように、引抜き試験機による引張力の他に、エポキシ樹脂自身の内部収縮力による引張力がコンクリート部分に働いたためであると考えられる。

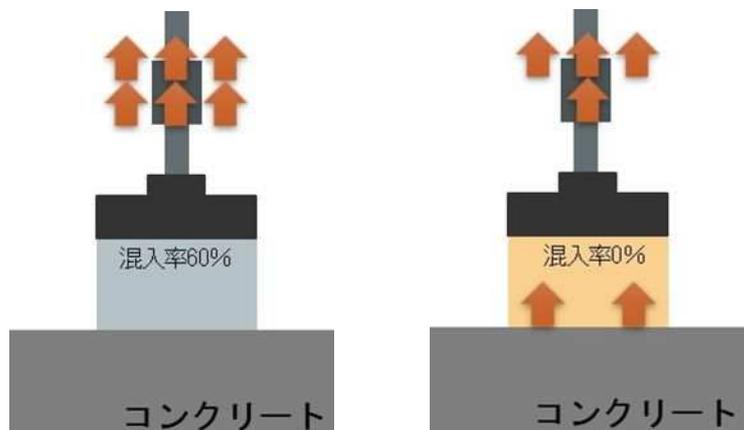


図-2.13 力の分散のイメージ図

また、無収縮モルタルを用いた供試体については、プレキャストコンクリート版に、アタッチメントに沿って40×40 mmの切り込みを入れる段階で、無収縮モルタルとコンクリート版の界面が剥がれてしまい、測定不可能であった。よって、無収縮モルタルの接着力は極めて脆弱であると考えられる。

これらをまとめると、エポキシ樹脂の接着力はコンクリートの引張強度よりも高く、またフィラー混入率の高い樹脂ほど引抜耐力は高いという結果であったが、それらは内部収縮が影響しており、フィラーの混入率が増えても、十分な接着力を有しているということが確認できた。

また無収縮モルタルの接着力は，コンクリートの引張強度よりも低く，接着力は期待できないと言える。

### 2.4.3 圧縮強度

#### 2.4.3.1 試験方法

フィラー混入率の違いによるエポキシ樹脂の圧縮強度を調べるため，写真-2.10 に示すように  $\phi 50 \times 50 \text{mm}$  の円柱供試体を用い，圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験については，フィラー混入率 0%と 50%の 2 種類の供試体を用い，それぞれ 4 体ずつ試験を行った。写真-2.10 は，左側がフィラー混入率 0%，右側がフィラー混入率 50%の供試体である。

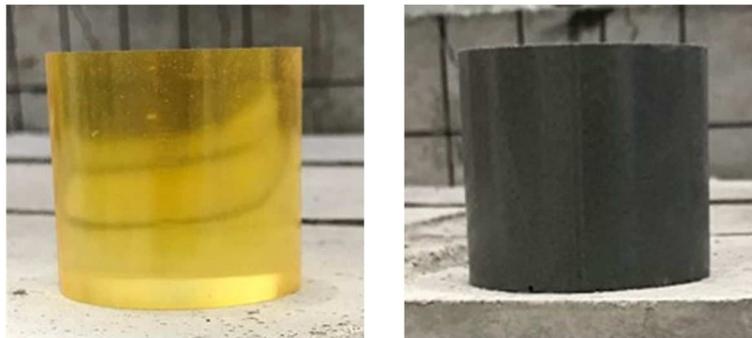


写真-2.10 供試体の状況（左：0%、右：50%）

#### 2.4.3.2 試験結果

圧縮強度試験の結果を図-2.14 に示す。フィラー混入率 0%，50%の樹脂の圧縮強度の平均値はそれぞれ， $63.0 \text{N/mm}^2$ ， $40.0 \text{N/mm}^2$ である。この結果より，フィラー混入率 50%の樹脂のほうが，圧縮強度が低くなることが分かる。

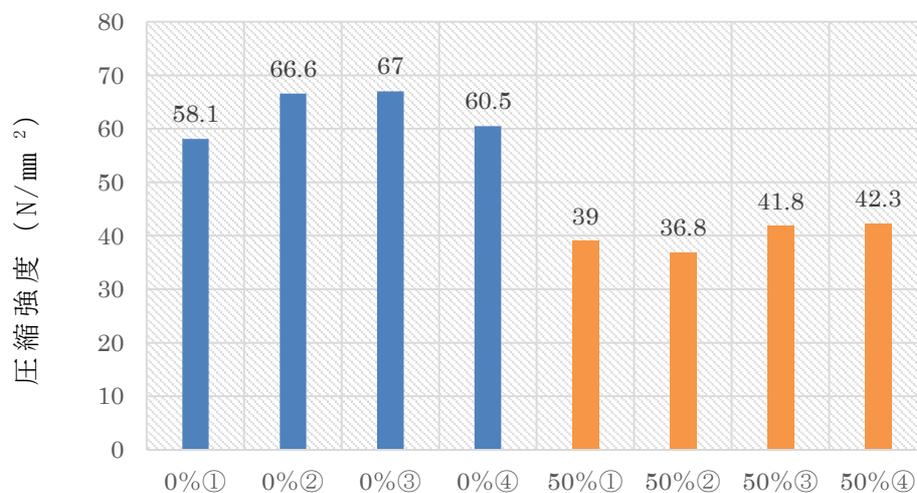


図-2.14 圧縮強度試験の結果

次に各供試体の応力ひずみ曲線を図-2.15, 2.16 に示す。

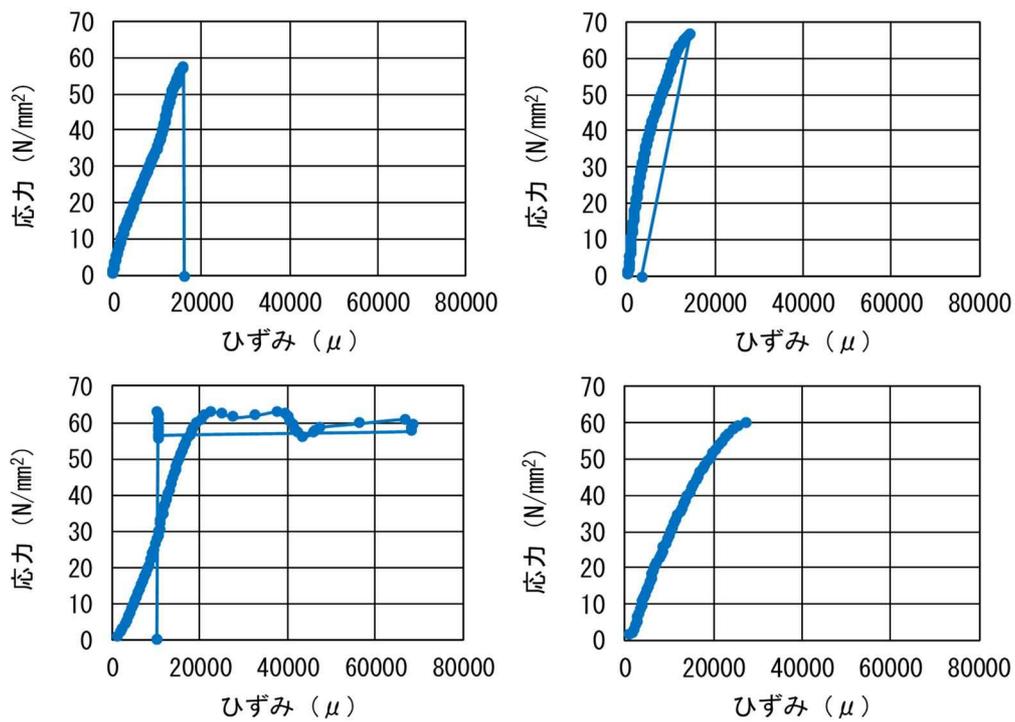


図-2.15 0%混入供試体の応力-ひずみ曲線  
(左上)①, (右上)②, (左下)③, (右下)④

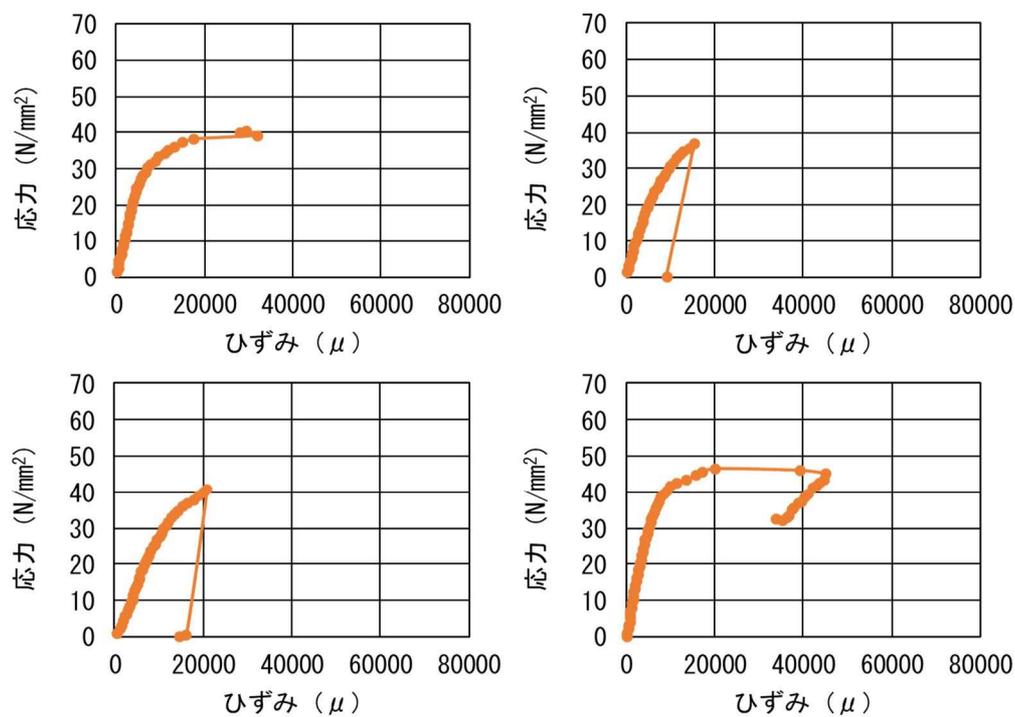


図-2.16 50%混入供試体の応力-ひずみ曲線  
(左上)①, (右上)②, (左下)③, (右下)④

図-2.15 を見ると、フィラー混入率 0%の樹脂は弾性体のまま応力を受け持ち応力が  $60\text{N/mm}^2$  になったあたりで、全ての供試体が破壊している。それに対し図-2.16 より、フィラー混入率 50%の樹脂は、応力  $30\sim 40\text{N/mm}^2$  あたりで弾性域から弾塑性域に移行し、その後破壊していることが確認できる。

フィラー混入率 0%の③の樹脂に関して、他の供試体とは異なる挙動が見られるが、これは写真-2.11 に示すように、試験を行う前から供試体自体に内部収縮によるひび割れが入っていたためであると考えられる。



写真-2.11 フィラー混入率 0%③の供試体

これらの結果をまとめると、エポキシ樹脂の圧縮強度はフィラー混入することで低下することが確認できた。また、フィラーを混入することで、弾性域ではなく、弾塑性域で供試体が破壊することが確認できた。

### 2.4.4 反応熱および硬化収縮

エポキシ樹脂は力学的特性に優れており、土木分野では接着剤や被覆材など多用途で利用されている。しかし接合部の主要材料として使用された事例は少なく、硬化収縮に伴う内部応力によりエポキシ樹脂自体にひび割れ等の破損、欠陥が及ぶ事も考えられる。この問題を抑制するには、フィラーを改質材として混入することが効果的であるという既往の研究に基づき<sup>1)</sup>、今回、エポキシ樹脂に粒度分布を調整したフィラーを混入し、混入率の違いによる硬化収縮の違いを確認した。

#### 2.4.4.1 試験方法

フィラー混入率の違いによる収縮の程度と反応熱を明確化するために、図-2.17 に示すように、KMP 埋込ゲージを用いてエポキシ樹脂の硬化時の収縮量とその時の反応熱を同時に測定した。エポキシ樹脂の厚さは  $20\text{mm}$  とし、高さ  $10\text{mm}$

の位置に KMP 埋込ゲージを固定した。容器にはラップを敷き，収縮や膨張による体積変化を拘束しないよう配慮した。試験体の種類はフィラー混入率を体積置換で 0%，25%，50%と変化させ，それぞれ 2 回ずつ測定を行った。混合・攪拌はハンドミキサーにて樹脂液（主剤・硬化剤）を 2 分間攪拌後，フィラーを加え，さらに 2 分間攪拌した。以下の試験に関しても全て同条件の混合・攪拌にて試験を行った。

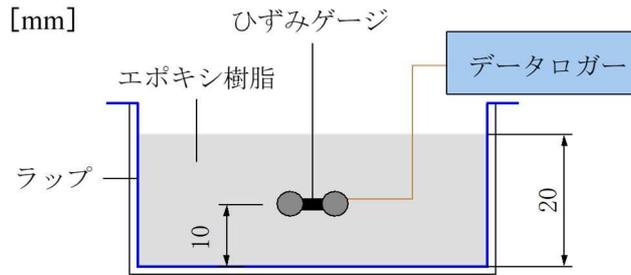


図-2.17 接着強度試験の概要

#### 2.4.4.2 試験結果

内部収縮量の時間変化を図-2.18 に，またその時の温度変化を図-2.19 に示す。図-2.18 よりフィラー混入率 0%時は硬化開始とともに著しく温度が上昇した。一方，フィラーを混入することで温度上昇を抑える効果が確認できる。エポキシ樹脂は硬化反応により発熱する。フィラーを混入することで，エポキシ樹脂の全体割合が減少することと，さらに反応熱をフィラーがある程度吸収または熱伝達を低減することにより，発熱が抑えられていると考えられる。

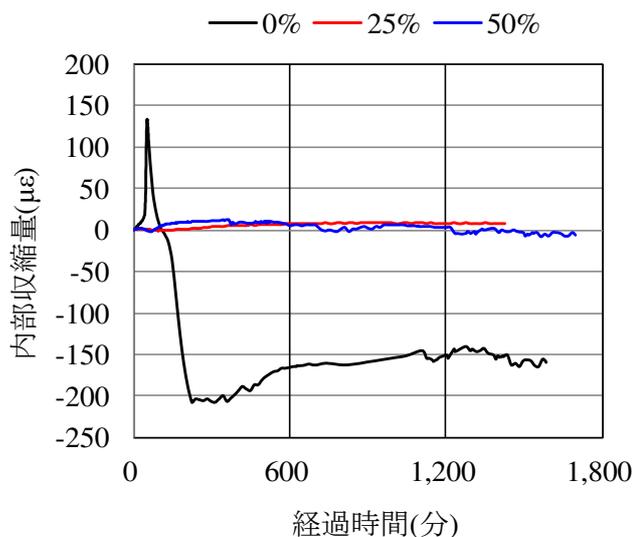


図-2.18 内部収縮量の時間変化

また図-2.18, 2.19 より, エポキシの温度上昇に伴い, いったんエポキシ樹脂が膨張し, その後温度が下がるにつれてエポキシ樹脂が収縮し徐々に安定していくことが分かる。硬化収縮の原因は内部応力(収縮力)の増大と考えられる。内部応力は硬化冷却時に増大するといわれており, その為, 発熱温度が高いほど, 収縮は大きくなると考えられる。それと比較してフィラー混入率 25%と 50%のエポキシ樹脂には著しい温度上昇や極端な内部収縮は見られない。これは発熱温度が低いため, 収縮量も小さくなったと考えられる。

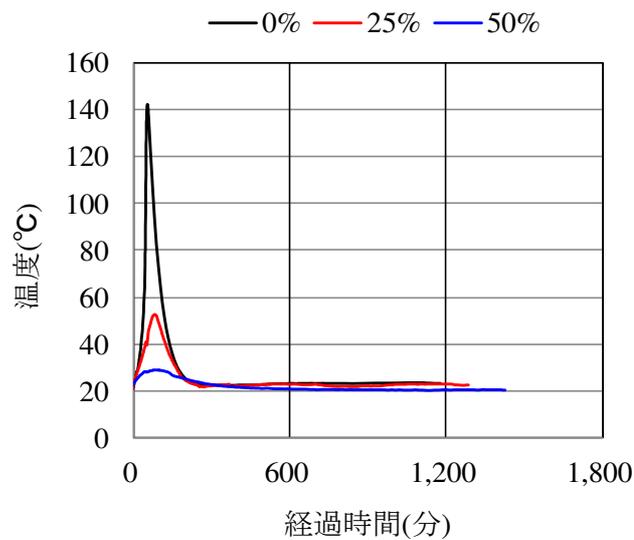


図-2.19 反応熱の時間変化

さらに, エポキシ樹脂の最高発熱温度と可使時間を表-2.6 に示す。

表-2.6 発熱温度と可使時間

フィラー混入率	最高発熱温度(°C)	可使時間(分)
0%	141.8	38.9
25%	52.8	58.8
50%	29.4	57.0

ここで, 可使時間の求め方 (JIS K 6833)

- (1) 急激な発熱ピークが認められる場合  
可使時間 = 最高発熱到達時間 × 0.7 (分)
- (2) 急激な発熱ピークが認められない場合  
可使時間 = 最高発熱到達時間 × 0.5 (分)

これらをまとめると、フィラー混入率 0%の樹脂は、著しい温度上昇、降下に伴う膨張、内部収縮が見られることや、可使時間が短いことから、現場での使用には適さないと考えられる。フィラー混入率を 25%, 50%と増やしていくことで、硬化収縮量、さらに反応温度を抑えることが出来き、さらに可使時間も長くなり、施工に必要なハンドリングタイムを確保できる事が確認できた。

## 2.4.5 充填性能

### 2.4.5.1 試験方法

プレキャスト製壁高欄の底板部を模擬した図-2.20 に示す供試体を作製し、フィラー混入率を 0%, 25%, 50%, 60%と変化させたエポキシ樹脂を注入ポンプにて充填し、完全に充填されるまでの時間、および充填状況を確認した。合せて攪拌直後のフロー値、および粘度もそれぞれ測定した。

供試体は、充填の状況が確認できるように、底板部を模擬した幅 200mm, 長さ 465 mm のコンクリートブロックに、実際の壁高欄施工時に使用するアンカー筋と同一位置にボルトを設置し、エポキシ樹脂の厚みが 20 mm になるように、アクリル板を設置したものを使用した（写真-2.12）。

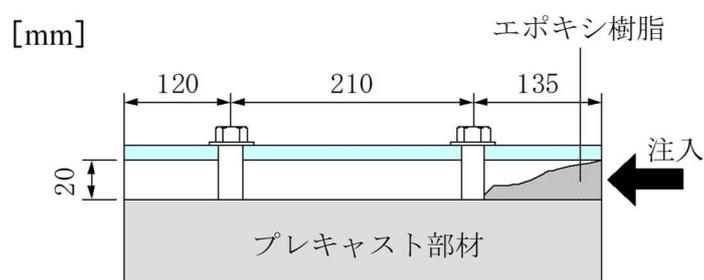


図-2.20 充填性能の供試体概要



写真-2.12 充填性能試験用の供試体状況

なお充填時間は、ポンプによりエポキシ樹脂を注入口から注入している最中

の時間を合計したものとし、ポンプを動かしていない時間は換算しないものとした。また充填の状況として、エポキシ樹脂が硬化した後に、表面の気泡部分の面積を測定した。また粘度測定は、TVB-10 形粘度計を用い行い、測定開始から60秒後の測定値を読み取った。測定状況を写真-2.13に示す。



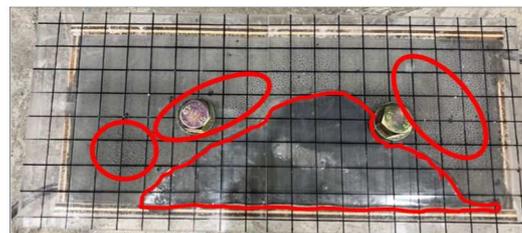
写真-2.13 粘度測定状況

#### 2.4.5.2 試験結果

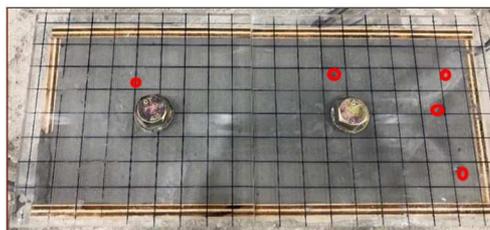
フィラーの混入量が多くなると、粘度の値は増加し、フロー値は減少した。充填時間を比較すると、25%混入が最も短く、次に50%混入の結果になった。しかし硬化後の空気量を確認すると、25%混入した供試体の上面に残留した空気（未接着部分）が最も多くなっていた。これは全て同一の方法で攪拌を行っているため、粘性が低い樹脂混合物は、より樹脂単体に近いたため、空気を巻き込んでしまったと考えられる。硬化後の供試体の状況を写真-2.14に示す。



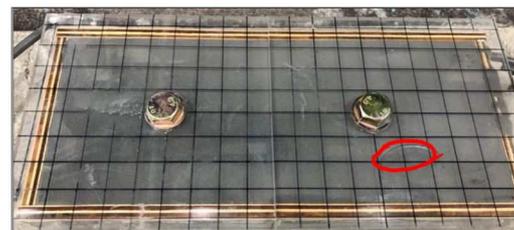
混入率0% (空気量：6.7%)



混入率25% (空気量：38.5%)



混入率50% (空気量：0.4%)



混入率60% (空気量：1.6%)

写真-2.14 硬化後の供試体の状況

## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

また、目視で確認された空気量を数値化するため硬化後のエポキシ樹脂の表面の空気量を測定した。硬化後のそれぞれの供試体の表面の気泡をプロットしたものを図-2.21に、プロットをもとに算出した、表面の面積率を図-2.22に示す。

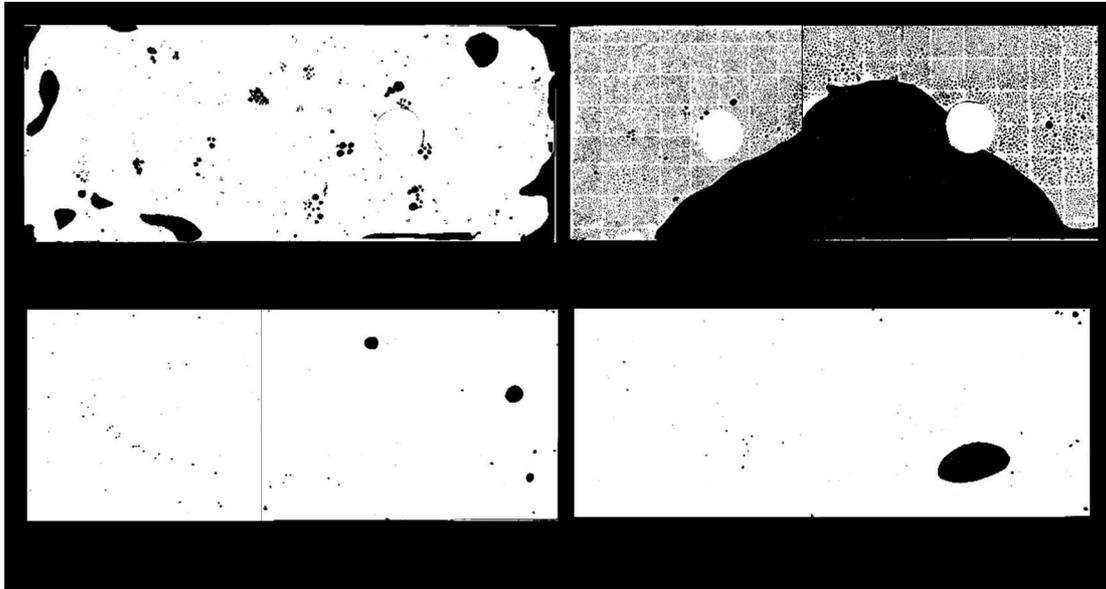


図-2.21 プロットによる硬化後の表面の気泡

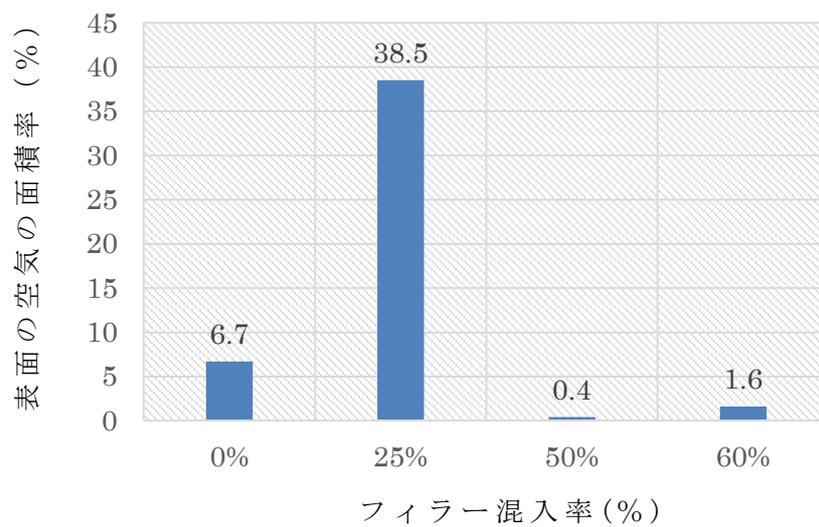


図-2.22 混入率の違いによる表面の空気の面積率

## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

図-2.22 より、フィラー混入率 25%のエポキシ樹脂の表面の空気量は 38.5%と最も多く、それとは反対にフィラー混入率 50%のエポキシ樹脂は、0.4%と最も小さい値となった。混入率が 0%のエポキシ樹脂では、硬化後の内部収縮により、アクリル板が変形しており、さらに部分的にエポキシ樹脂とアクリル板とが完全に剥がれている箇所も存在した。一方混入率 50%、60%の供試体は、硬化後の変形もなく、隅々まできれいに充填されていた。

次に粘度試験の結果を図-2.23 に示す。また、比較のため、一般的な物質の粘度一覧表を表-2.7 に示す。

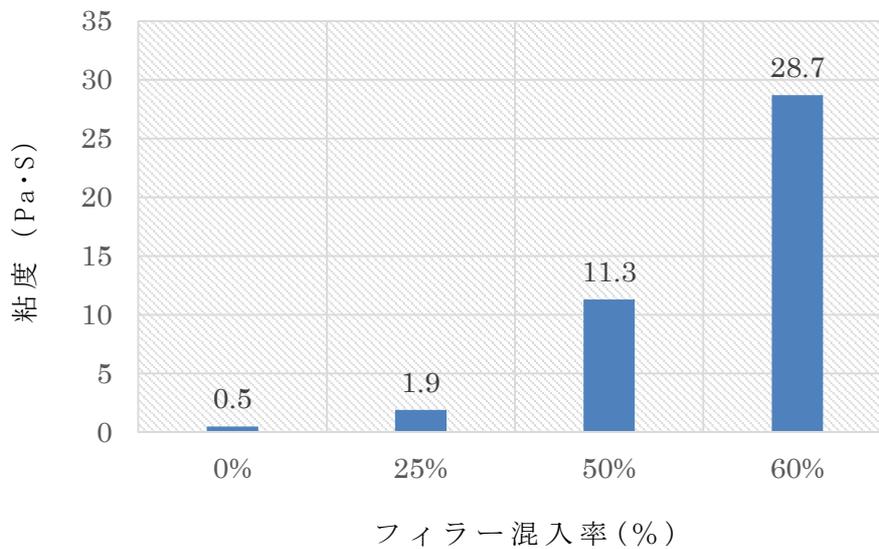


図-2.23 粘度測定結果

表-2.7 一般的な物質の粘度

物質名	粘度 (Pa S)
水	0.001
血液	0.004~0.015
オリーブオイル	0.1
コンデンスミルク	2.0
マヨネーズ	8.0
はちみつ	10.0
練ハミガキ	30.0

## 第2章 エポキシ樹脂の材料性能評価

図-2.23 より, フィラー混入率が高くなるほど, 粘度も高くなることが分かる。また, フィラー混入率が 0%および 25%とフィラー混入率が低い場合のエポキシ樹脂の粘度は極端に低く, 他の物質と比較するとコンデンスミルク以下の粘度であり, 充填しづらいということが分かる。それに対して, フィラー混入率 50%のエポキシ樹脂はある程度の粘度を持ち, 一般的な物質では, マヨネーズやはちみつに相当する粘度であることが分かる。さらに混入率を上げ 60%にすると, その粘性は 2 倍以上の値を示しており, 練ハミガキと同程度の粘度となることで, 充填作業が困難になったと考えられる。これらの試験結果をまとめたものを表-2.8 に示す。またフィラー混入率 50%のフロー値測定状況を写真-2.15 に示す。

表-2.8 混入率の違いによる試験結果

フィラー 混入率	フロー値 (mm)		粘度 (Pa·s)	空気量 面積率 (%)	充填 時間 (秒)
	縦	横			
0%	350	265	0.5	6.7	233
25%	265	260	1.9	38.5	108
50%	195	195	11.3	0.4	153
60%	170	170	28.7	1.6	234

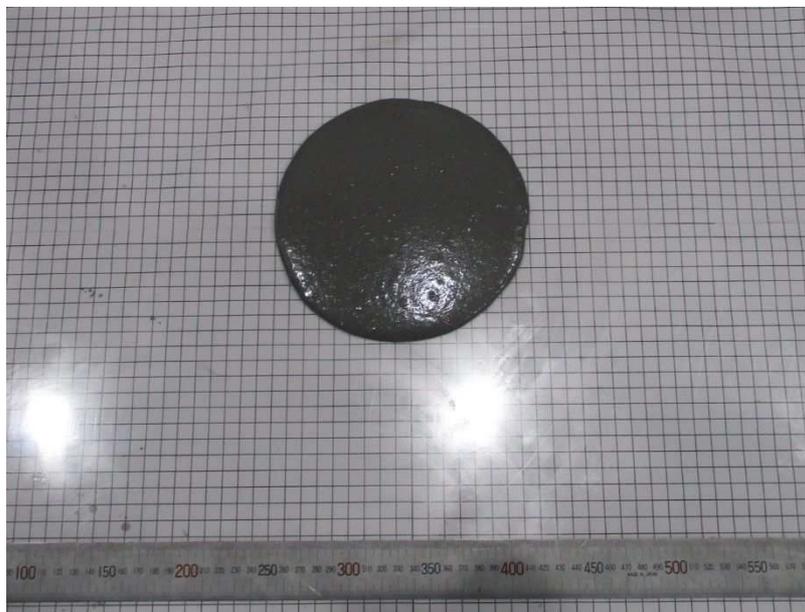


写真-2.15 フロー値測定状況

### 2.5 本章のまとめ

本章では、エポキシ樹脂の市場動向や力学的特性をまとめると共に、高温環境下での疲労特性を把握するため、200万回の疲労試験を実施し、さらに本研究のテーマである、アンカーとエポキシ樹脂を併用し、プレキャストコンクリートと既存構造物との一体化を図るために必要な性能を確保するため、樹脂に改質材としてフィラーを混入し、その効果や、その際の材料特性を把握するための、接着力試験、圧縮強度試験、内部収縮試験、充填性能試験および粘度試験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

#### 1) 高温環境下における疲労特性

温度 60℃、湿度 80% の環境下で、エポキシ樹脂（一般的にコンクリートの打継用として使用されているもの）とモルタルの接合面は 200 万回疲労後も破壊することなく、また動弾性係数にも変化がなかった。疲労後の供試体と疲労前の供試体との曲げ強度の結果より、200 万回疲労後も、エポキシ樹脂は高い接着性能が維持されていることが確認できた。

#### 2) 接着力試験

エポキシ樹脂の接着力は、フィラーを混入した場合においても、コンクリートの引張強度よりも高いことが確認できた。また、混入率が高くなるほど見かけの引抜耐力が上がっているが、これはエポキシ樹脂自体の硬化収縮による内部応力により、コンクリート表面に引張力が働いたためであると考えられる。それに対し無収縮モルタルとコンクリートとの接着力はとても低く、エポキシ樹脂のように、引抜耐力を負担させることはできない事が確認できた。

#### 3) 圧縮強度

エポキシ樹脂にフィラーを混入すると、圧縮強度は未混入のものに比べ約 36% 低下した。また、フィラー混入率 0% の供試体では、破壊形態は高分子材料特有の降伏を示さずに破壊する脆性型の破壊であるのに対し、フィラーを 50% 混入した供試体の破壊形態は、降伏後の塑性領域で破壊することを確認した。

#### 4) 内部収縮試験

フィラー混入率 0% の樹脂は、著しい温度上昇、降下に伴う膨張、内部収縮が見られることや、可使時間が他の樹脂に比べ 20 分程度短いことから、現場での使用には適さないと判断する。フィラー混入率 25%、50% の樹脂に関しては硬化収縮量、可使時間はほぼ同程度であったが、反応温度には約 25° の差が見られ、フィラー混入率の増加に伴い反応温度を抑えられることが分かった。

5) 充填性能試験および粘度試験

充填性能試験と粘度試験の結果を照らし合わせると、フィラー混入率 0%、25%のエポキシ樹脂は充填するには粘度が極端に低く、充填の際に型枠から漏れが発生してしまう可能性が高いと考えられる。またフィラー混入率 60%のエポキシ樹脂は粘度が著しく高くなり、油圧ポンプの圧力を最大にしても注入作業が困難で、注入時間が大幅に伸びてしまう結果となった。対して、フィラー混入率 50%のエポキシ樹脂は適度な粘性（充填時の漏れやポンプ注入作業の容易さ）があり、充填に関しても空気を巻込むことなく、隅々まで確実に充填されていた。

全ての結果をまとめたものを表-2.9 に示す。表に示す最大収縮量，最高発熱温度，可使時間，充填性能および粘度を評価ファクターとした場合，フィラー混入率 0%，25%，60%の樹脂はいずれも現場施工には不適合であると考えられる。よってフィラー混入率 50%の樹脂を使用することが最も望ましいと判断する。

接着力および圧縮強度に着目すると，接着力に関してはフィラー混入率 60%の樹脂のほうが高く，圧縮強度に関してはフィラー混入率 0%のほうが高いという結果が得られているが，どちらも構造自体の強度に大きな影響はなく，十分な性能を発揮できると考えられる。よって，本研究で使用するエポキシ樹脂のフィラー混入率を 50%と定める。

表-2.9 全ての結果のまとめ

検討項目	フィラー混入率 (%)							
	0		25		50		60	
接着力 (MPa)	2.15	△	2.57	△	2.71	○	3.16	◎
圧縮強度 (MPa)	63.0	◎	-		40.0	○	-	
最大収縮量 (μ)	207.0	×	8.0	△	1.0	◎	-	
最高発熱温度 (℃)	141.8	×	52.8	△	29.0	◎	-	
可使時間 (分)	38.9	×	58.8	○	57.0	○	-	
充填時間 (秒)	233	×	108	◎	153	○	234	×
空気量 (%)	6.7	△	38.5	×	0.4	◎	1.6	○
総合評価	×		△		◎		○	

<参考文献>

- 1) 大石直四郎, 館川裕: エポキシ樹脂, プラスチック材料講座 5, 1961
- 2) 和多田史朗: エポキシ樹脂, 製品の市場動向, 「工業材料」2015, 11月号
- 3) CMC リサーチ エポキシ樹脂・製品の市場動向  
<https://www.mlit.go.jp/common/001113550.pdf>
- 4) 斉藤弘志: エポキシ樹脂接着剤の土木分野への利用について, 「熱硬化性樹脂」Vol.10 No.4(1989)
- 5) 蘇迪, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則: 首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析, 構造工学論文集 Vol.59A (2013年3月)
- 6) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol24, No.1, 2002
- 7) Ferdous, W., Manalo, A., Aravinthan, T., Erp, G. V.: Properties of Epoxy Polymer Concrete Matrix: Effect of Resin-To-Filler Ratio and Determination of Optimal Mix for Composite Railway Sleepers, Construction and Building Materials, Vol.124, pp.287-300, July.2016

## 第 3 章

エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証



### 第3章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証

#### 3.1 概説

アンカーの引抜耐力は、使用するアンカーの径や定着長さ、さらには充填材の性能により変化する。そこで本章では、アンカーとエポキシ樹脂の併用による効果を検証するため、アンカー径と定着長さの条件を同一とし、エポキシ樹脂の接着面積や厚みなどの条件を変えた3種類の引抜試験を実施し、引抜耐力や破壊形態がどのように変化するかを確認した。

#### 3.2 あと施工アンカーについて

あと施工アンカーは、既設の構造物に新たに部材を接合する場合や、母材に付帯設備を取り付ける場合等に適用され、図-3.1に示すように、金属系アンカー、接着系アンカーおよびその他のアンカー類に分類されている。

その中で、本論文で研究対象とする接着系アンカーは、有機系アンカーであり、強固な固着力を保有し、引抜耐力は金属系アンカーよりも優れている。そのため耐震補強などの建築工事、機械設備の固定や、橋梁、港湾の土木工事など建設工事のあらゆる分野で使用されている。

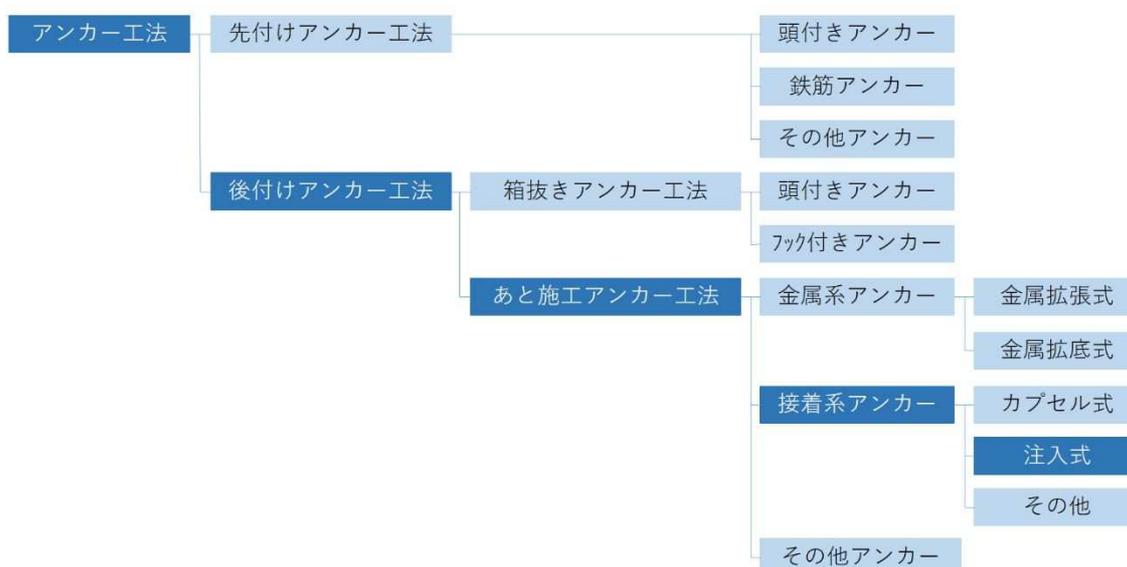


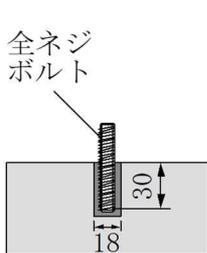
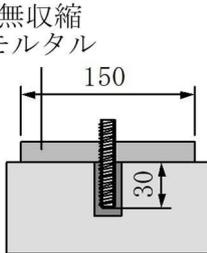
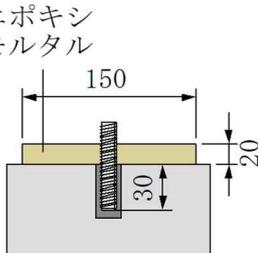
図-3.1 あと施工アンカーの分類<sup>1)2)</sup>

### 3.3 アンカーの引抜試験（その1）

#### 3.3.1 実験概要

本研究で提案する接合工法では、アンカーの埋込長さを十分に取れない場合を想定し、アンカーに要求される引抜耐力の一部をエポキシ樹脂の接着力に負担させることを狙いとしている。そこで、アンカーとエポキシ樹脂を併用することによる効果を確認するため、表-3.1に示す3つの条件で供試体を3体ずつ作製し、簡易引抜き試験機を用い引抜耐力を測定した（図-3.2）。

表-3.1 供試体の種類

供試体の種類	a アンカーのみ	b 無収縮 モルタル併用	c エポキシ モルタル併用
アンカー径	3/8 全ネジボルト		
定着長	30 mm		
充填材	セメント系充填材		
概要図	 <p>全ネジボルト</p>	 <p>無収縮モルタル</p>	 <p>エポキシモルタル</p>

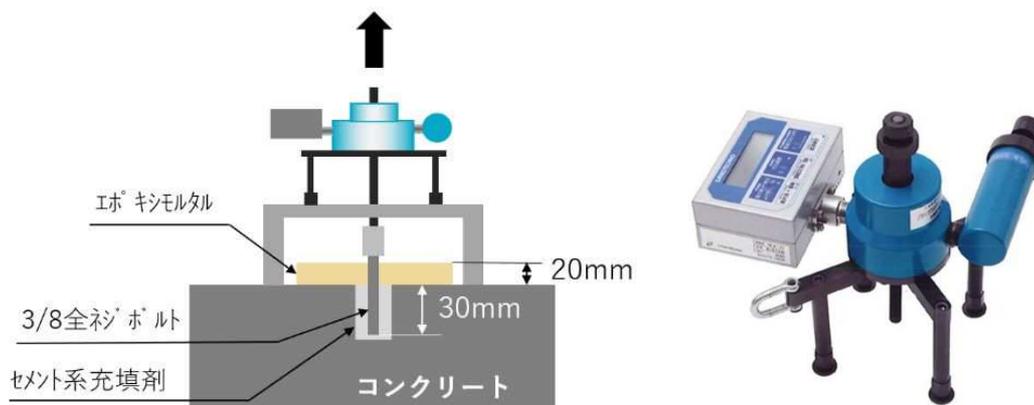


図-3.2 引抜き試験の方法（右）簡易引抜き試験機

### 3.3.2 実験供試体

実験は写真-3.1に示すように、1000×2000×100 (mm) のプレキャストコンクリート製の基礎版に、 $\phi 15.6$  mm、深さ 35 mm の穴を穿孔し、内部を綺麗に清掃した後、写真-3.2 のようにセメント系の充填材を注入した。次に、その穴に引抜き試験用の全ネジボルト (3/8) をセットした (写真-3.3)。供試体は全部で3種類、それぞれ3体製作した。



写真-3.1 引抜き試験用の穴の穿孔状況と試験材料



写真-3.2 充填材の注入状況

### 第3章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証

#### < 供試体 a >

供試体 a は穿孔部に、セメント系の充填剤を注入した後、写真-3.1 のように、全ネジボルトに座金とナットで、埋込深さが 30 mm になるよう調整し設置した。



写真-3.3 全ネジボルトの設置状況

#### < 供試体 b, c >

供試体 b, c は供試体 a と同一の方法で全ネジボルトを埋込み深さ 30 mm となるよう設置し、その後写真-3.4 のように、 $\phi 150$  mm、厚さ 20 mm で無収縮モルタル、エポキシモルタルを充填した。



写真-3.4 供試体 c の製作状況

### 3.3.3 実験結果および考察

試験結果を表-3.2及び図-3.3に示す。結果は3体の平均値である。アンカーの破壊モードには、アンカーボルトの降伏、および破断、コンクリートのコーン状破壊、アンカーボルトと樹脂との付着破壊があるが、今回の破壊形態は全てコンクリートのコーン破壊によるものであった。

表-3.2 引抜試験の結果

供試体	a	b	c
引抜耐力 (kN)	12.8	13.3	21.9

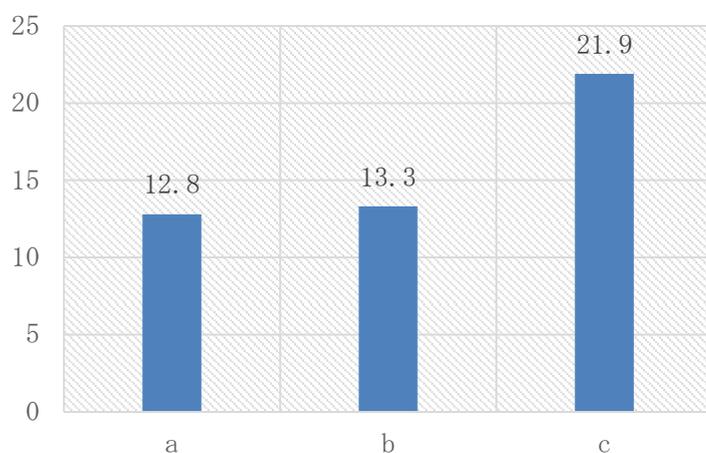


図-3.3 引抜試験の結果

引抜耐力を見ると、供試体 c が最も大きく、供試体 a が最も小さい。これは写真-3.5に示すように、アンカーのみの場合（供試体 a）よりも、アンカーとエポキシモルタルを併用した場合（供試体 c）の方がコーン破壊による円錐底面積、すなわち有効水平投影面積が大きくなっており、結果的にアンカーの最大引張荷重も大きくなったと考えられる。図-3.4にコーン破壊の概念図を示す。

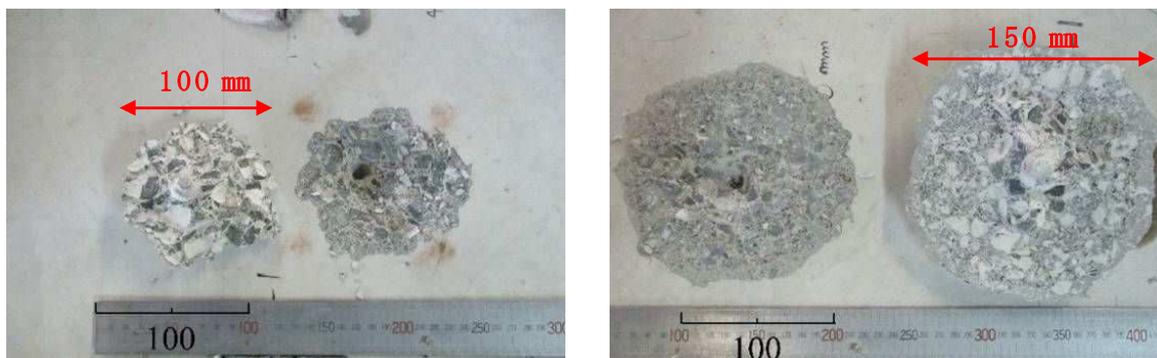


写真-3.5 コーン破壊の状況（左：供試体 a，右：供試体 c）

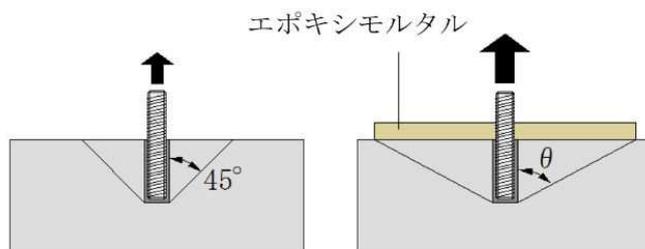


図-3.4 コーン破壊の概念図

これは参考文献<sup>3)</sup>における式(式 3.1)および式(式 3.2)から導かれるコーン破壊角と引抜耐力の関係，即ち破壊角の角度が広がると引抜耐力が向上するという結果と，定性的に一致する。

$$P_c(x) = \sigma_{cone} A_c(x) \quad (\text{式 3.1})$$

$$A_c(x) = \pi \left\{ (x + u_0) \tan \theta + \frac{D}{2} \right\}^2 - \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \quad (\text{式 3.2})$$

ここに， $x$ ：表面からアンカー先端までの深さ（mm）， $\theta$ ：コーン破壊角（°）， $P_c(x)$ ：アンカーの引抜耐力（N）， $\sigma_{cone}$ ：コンクリートのコーン破壊強度（N/mm<sup>2</sup>）， $A_c(x)$ ：有効水平投影面積（mm<sup>2</sup>）， $D$ ：アンカー径（mm）。

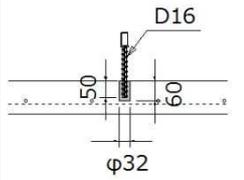
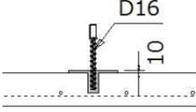
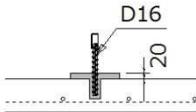
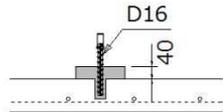
これに対し，アンカーと無収縮モルタルを併用した場合の引張耐力は，アンカーのみの場合とほぼ同等の結果であった。これは，無収縮モルタルとエポキシモルタルの付着強度の違いによるもので，アンカーと無収縮モルタルを併用した場合には引張試験の途中で接着力の低い無収縮モルタルが，コンクリート躯体から完全に剥離してしまうため，アンカーの引抜耐力向上に寄与しないためと考えられる。

### 3.4 アンカーの引抜試験（その2）

#### 3.4.1 実験概要

次に、D16のアンカー筋を使用し、エポキシモルタルの厚みを変えた場合に、引抜耐力、および破壊形態がどのように変化するかを確認するため、表-3.3に示す3つの条件で供試体を製作し、図-3.5に示すようにセンターホールジャッキを用いて引抜き試験を実施した。引抜試験の状況を写真-3.6に示す。

表-3.3 供試体の種類

供試体の種類	No.1	No.2	No.3	No.4
エポキシモルタル厚	0mm	10mm	20mm	40mm
エポキシモルタル径	Φ 200mm			
アンカー径	D16 異形鉄筋 (SD295)			
穿孔径, 深さ	φ 32mm, 深さ 60mm			
定着長	50 mm			
概要図				

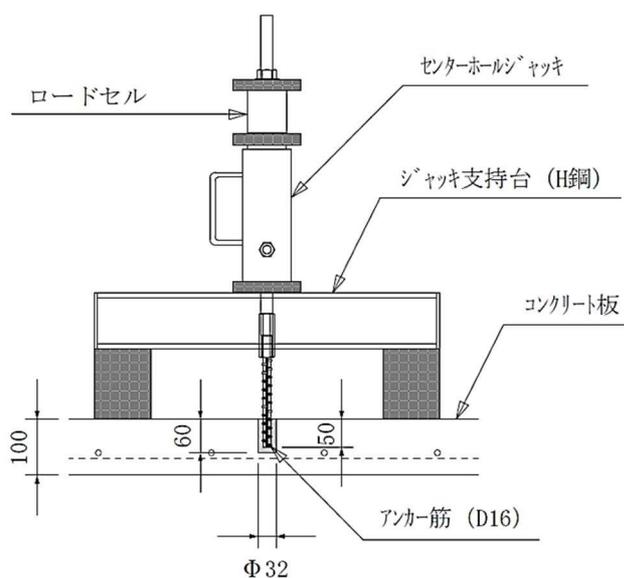


図-3.5 引抜試験方法



図-3.6 引抜試験の状況

### 3.4.2 実験供試体

実験は図-3.7 に示す 1000×2000×100 (mm) のプレキャストコンクリート製の基礎版に、ハンマードリルで  $\phi 32$  mm、深さ 60 mm の穿孔を行い、内部をワイヤブラシとブローアで綺麗に清掃した後、図-3.8 に示すように、アンカー筋の埋込み深さが 50 mm になるよう、専用の治具を用いて固定した。

No.1 の供試体はそのまま開口部にエポキシモルタルを充填し、No.2, No.3, No.4 の供試体は、 $\phi 200$  mm のボイド管をそれぞれの厚みに加工し、それを型枠代わりとして、その中にエポキシモルタルを充填した。供試体の製作状況を写真-3.7 に示す。またプレキャストコンクリート基礎版より、コア抜きで採取した供試体による圧縮強度の結果を表-3.4 に示す。

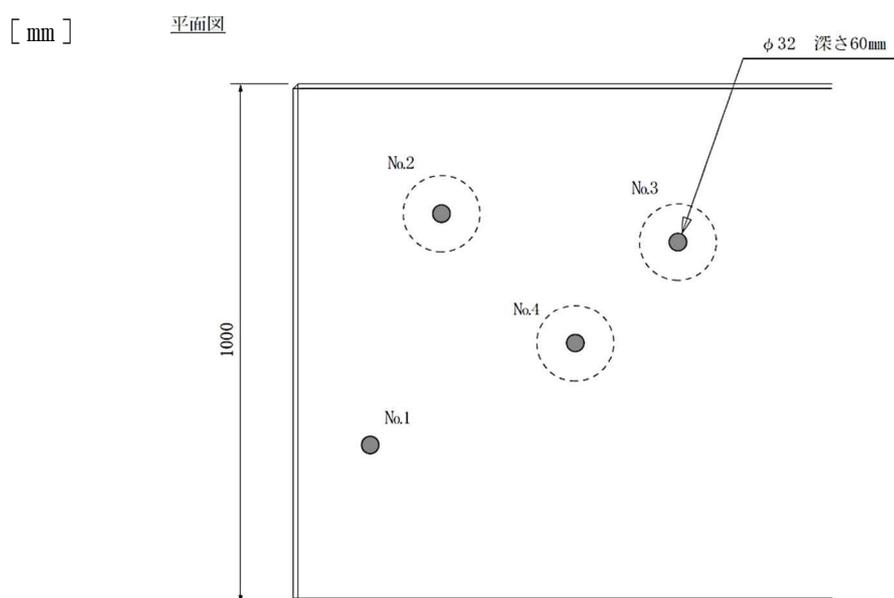


図-3.7 引抜試験供試体の概要

第3章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証

表-3.4 プレキャストコンクリート基礎版の圧縮強度

供試体	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>
No.1	62.3
No.2	61.2
No.3	62.6
No.4	59.3
平均	62.0

[ mm ]

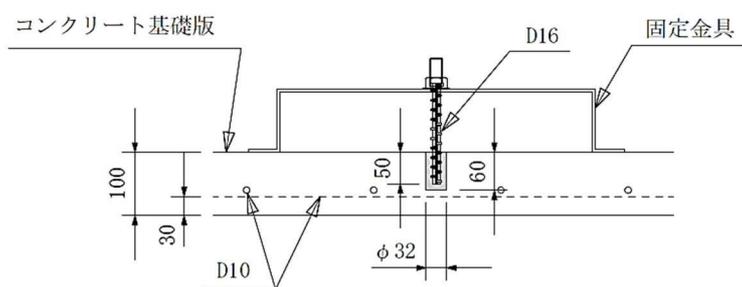


図-3.8 供試体の製作方法



写真-3.7 供試体の製作状況（アンカー筋設置前）



写真-3.8 エポキシモルタルの充填状況

### 3.4.2 実験結果および考察

試験結果を表-3.5 及び図-3.9 に示す。またアンカーの破壊形態を図-3.10 に示す。破壊形態を見ると、No.1 の供試体のみコーン破壊によるもので、その他は全てコンクリートのコーン破壊と鉄筋との付着破壊による複合破壊であった。引抜耐力はNo.1 が最も小さく、エポキシモルタルとアンカー筋との併用による供試体である、No.2～4 の供試体の方が、試験（その1）同様に耐力が高い結果となった。

表-3.5 引抜試験の結果

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
引抜耐力 (kN)	39.8	50.5	53.5	52.3
破壊形態	A	C2	C2	C2

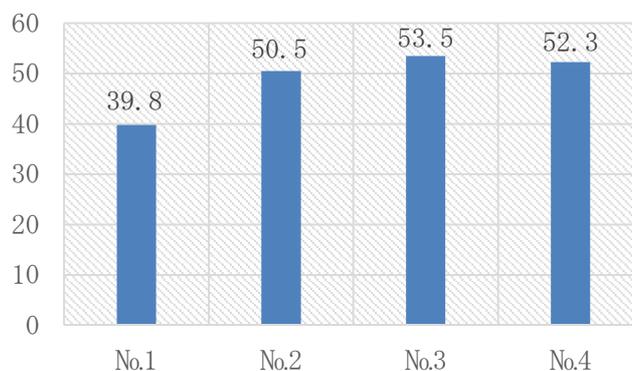


図-3.9 引抜試験の結果

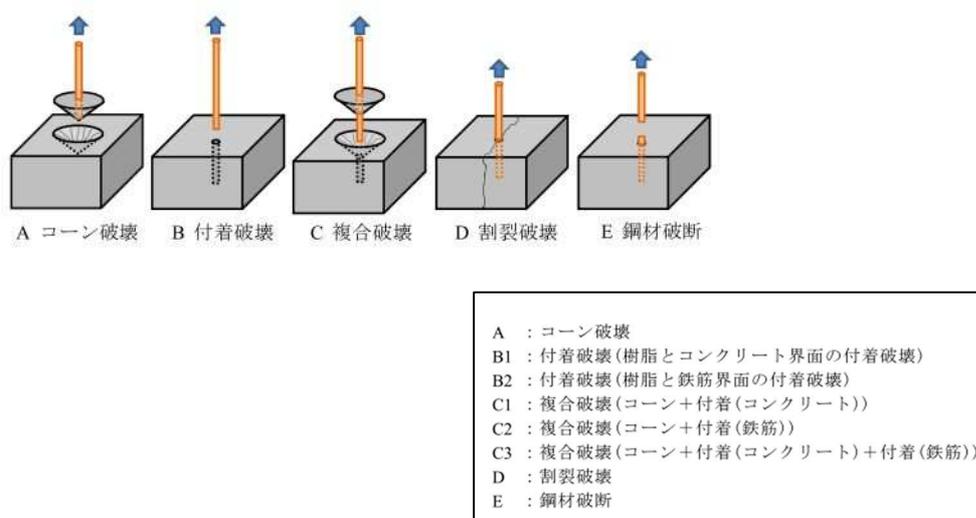


図-3.10 アンカーの破壊形態<sup>4)</sup>

各供試体の破壊状況を表-3.6 に示す。引抜耐力はエポキシモルタルの厚みが増加するにつれ、高くなることが確認できる。さらにコンクリートのコーン破壊部の体積が徐々に大きくなっていることも確認できる。これはNo.2 の供試体よりもNo.4 の供試体の方が、エポキシモルタルが厚く、アンカーが引張られる際に、エポキシモルタル中心部に生じる変形量が、抑えられることによるものと考えられる。

表-3.6 引抜耐力とコンクリートのコーン破壊状況

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
引抜耐力 (kN)	39.8	50.5	53.5	52.3
破壊状況				

鉄道構造物における、あと施工アンカーの引抜耐力の算定式を式(式 3.3)に示す。

$$P_1 = 0.53\pi \phi(D + 5.5\phi)\sigma_c^{1/3} + 0.36\pi D(L - 4\phi)\sigma_c^{2/3} \quad (\text{式 3.3})$$

### 第3章 エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証

$P_1$  : 引抜耐力 (N),  $\phi$  : アンカー径 (mm),  $D$  : 穿孔径 (mm),  $\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $L$  : 定着長 (mm)。

この式より, No. 1 供試体の試験結果を比較すると,  $P_1=38.0$  (kN) となり, 実験値の 39.8 (kN) と非常に近似となる (表-3.7)。つまり (式 3.3) は第 1 項がコン破壊耐力を, 第 2 項が付着破壊耐力を表しており, それらを累加した形となっているが, 今回の試験結果は, これらにさらにエポキシモルタルとコンクリートとの付着力が累加された結果であることを示唆している。

第 2 項は定着長が  $4\phi$  (=64mm) より短い場合はマイナスとなるため, 第 2 項は 0 で計算した。また算定式は安全率 3 を見込んでいるため, 引抜耐力は計算式 (式 3.3) を 3 倍した値となっている。

表-3.7 供試体 No.1 の算定式による計算結果

アンカー径	穿孔径	母材強度	定着長	引抜耐力
$\phi$ (mm)	$\phi$ (mm)	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	P (kN)
16	32	62	50	38.0

### 3.5 アンカーの引抜試験（その3）

#### 3.5.1 実験概要

次に、D19のアンカー筋を使用し、エポキシモルタルの大きさを変えた場合に、引抜耐力、および破壊形態がどのように変化するかを確認するため、表-3.8に示す4つの条件で供試体を製作し、図-3.11に示すようにセンターホールジャッキを用いて引抜き試験を実施した。試験の状況を写真-3.9に示す。

表-3.8 供試体の種類

供試体の種類	No.1	No.2	No.3	No.4
エポキシモルタル厚	0 mm	20 mm	20 mm	20 mm
エポキシモルタル径	Φ 0 mm	Φ 300 mm	Φ 400 mm	Φ 400 mm
アンカー径	D19 異形鉄筋 (SD295)			
穿孔径	φ 32 mm	φ 32 mm	φ 32 mm	φ 32 mm
穿孔深さ	90 mm	90 mm	90 mm	110 mm
定着長	80 mm	80 mm	80 mm	100 mm
概要図				

[ mm ]

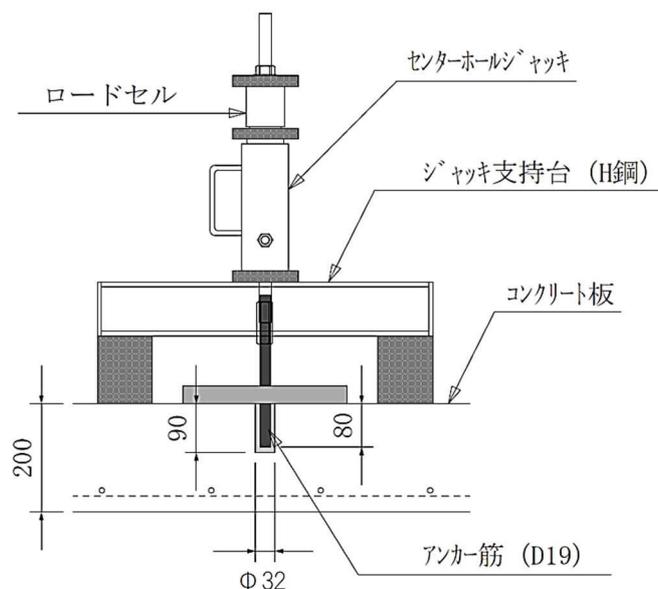


図-3.11 引抜試験方法



写真-3.9 引抜試験の状況

また，引抜試験時のエポキシモルタルの変位量を測定するため，図-3.12 に示すように，穿孔径の外側を0とし，そこから25 mm，100 mmの位置に変位計を設置し，引抜耐力とエポキシモルタルの変位量の間関係を調べた。

[mm]

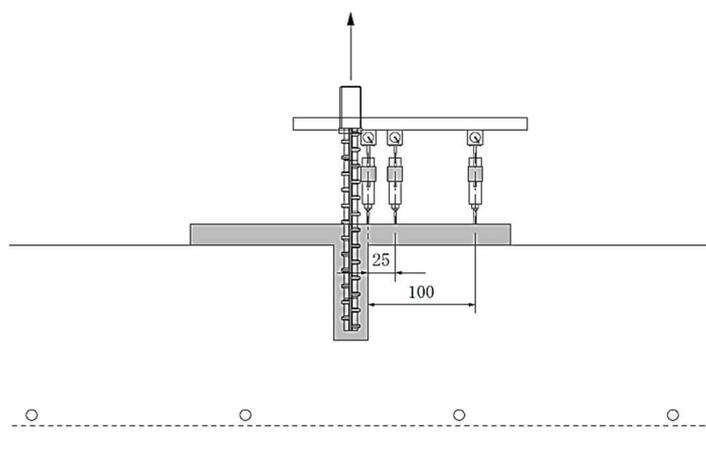


図-3.12 変位計の設置状況

### 3.5.2 実験供試体

実験は図-3.13 に示すように 1000×1000×200 (mm) のプレキャストコンクリート版に，ハンマードリルでφ32 mm，深さ90 mm，110 mmの穿孔を行い，内部をワイヤーブラシとブローアで綺麗に清掃した後，アンカー筋の埋込み深さが80 mm，100 mmになるよう，専用の治具を用いて固定した。

No.1 の供試体はそのまま開口部にエポキシモルタルを充填し，No.2，No.3，No.4 の供試体は，φ300 mm，φ400 mmのボイド管を20 mmの厚みに加工し，それを型枠

代わりとして，その中にエポキシモルタルを充填した。供試体の状況を写真-3.10 に示す。

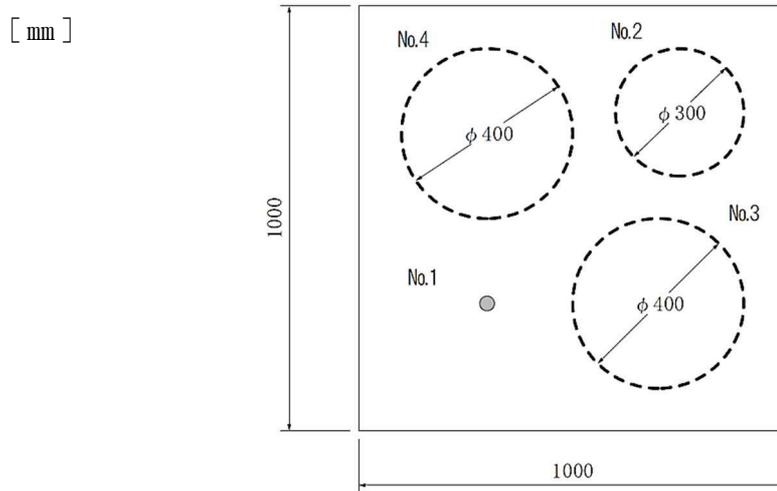


図-3.13 供試体製作の概要図



写真-3.10 供試体の製作状況

### 3.5.3 実験結果および考察

試験結果を表-3.9 及び図-3.14 に示す。破壊形態を見ると，全ての供試体がコーン破壊と付着破壊の複合破壊となっており，その内No.1とNo.2の供試体では，鉄筋とエポキシモルタル境界での付着破壊であり，No.3とNo.4ではエポキシモルタルとコンクリート界面での付着破壊であった。引抜耐力はNo.1が最も小さく，エポキシモルタルとアンカー筋との併用による供試体である，No.2，No.3，No.4の供試体の方が，試験（その1），試験（その2）同様に耐力が高い結果となった。

表-3.9 引抜試験の結果

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
引抜耐力 (kN)	47.1	95.5	110.5	123.1
破壊形態	C2	C2	C1	C1

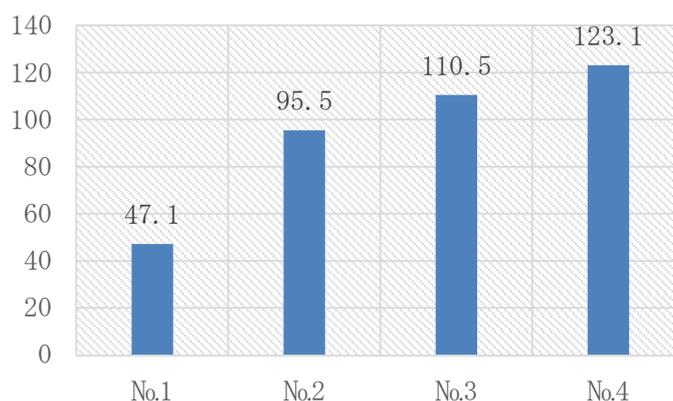


図-3.14 引抜試験の結果

各供試体の破壊状況を表-3.10に示す。試験（その1）、試験（その2）同様に引抜耐力はエポキシモルタルを併用することで、アンカーのみの場合に比べ高くなっていることが確認できる。さらにエポキシモルタルの面積が大きい程、アンカーの定着長が長くなる程、引抜耐力は高くなることが分かる。

表-3.10 引抜耐力とコンクリートのコーン破壊状況

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4
引抜耐力 (kN)	47.1	95.5	110.5	123.1
破壊状況				

これらの結果も、試験（その2）で述べたように、（式3.3）の第1項のコーン破壊耐力と第2項の付着破壊耐力にさらにエポキシモルタルとコンクリートとの付着力が累加されていることを示唆している。

次に、引抜試験時のエポキシモルタルの変位量の測定結果を図-3.15 に示す。これを見るとエポキシモルタルは、アンカー筋近傍のみが大きく変形していることが確認できる。これはエポキシモルタルの弾性係数が、鋼材やコンクリートに比べ低いことが原因であり（表-3.11）、エポキシモルタルが穿孔部周辺のみ大きく変形したことで、コーン破壊時の破壊部の体積が小さくなったと考えられる。供試体（No.2）のコーン破壊状況を写真-3.11 に示す。

本工法での使用方法は、エポキシモルタルの上部にプレキャストコンクリート製品が設置されるため、エポキシモルタル自体の変形はさらに抑制されることになり、アンカー筋とエポキシモルタルの併用の効果は、十分に得られるものと考えられる。

表-3.11 使用材料の一般的な弾性係数

使用材料	鉄筋	コンクリート	エポキシモルタル
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	205000	28000	4000

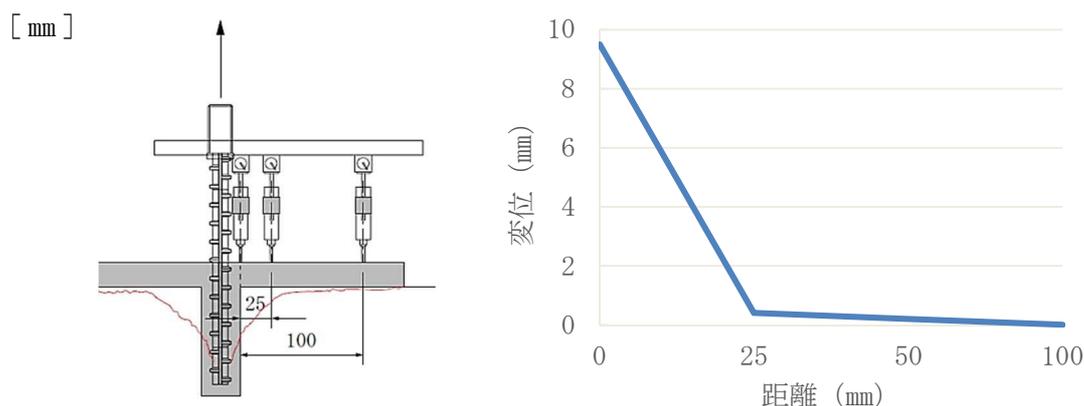


図-3.15 供試体（No.2）のエポキシモルタルの変位量



写真-3.11 供試体（No.2）のコーン破壊状況

### 3.6 本章のまとめ

本章では、アンカーとエポキシ樹脂の併用による効果を検証するため、アンカー径や定着長さ、エポキシ樹脂の接着面積や厚みなどの条件を変えた3種類の引抜試験を実施し、以下の結論を得た。

試験（その1）では、簡易引抜き試験機を用いて、3/8の全ネジボルトをアンカー材とし、a)アンカーのみ、b)アンカー+無収縮モルタル、c)アンカー+エポキシモルタルの3種類で引抜試験を実施し、アンカーとエポキシモルタルを併用することで、コンクリートのコーン破壊時の有効水平投影面積を拡大させることが可能となり、アンカーのみの場合と比較して、埋め込み長さやアンカー径が同一条件であっても、引抜耐力が向上（約2倍）することが確認できた。

試験（その2）では、アンカー筋D16、定着長さ50mmとし、アンカーのみの供試体とアンカーとエポキシ樹脂併用の供試体を作成し、エポキシ樹脂の厚みを変化させた場合に、引抜耐力がどのように変化するかを確認した。その結果、試験（その1）同様に、アンカーとエポキシモルタル併用により、引抜耐力が向上することと、厚みを増やすことで、エポキシモルタルの変形が抑えられ、コーン破壊部分のコンクリートの体積が増え、結果引抜耐力が増加することが確認できた。

試験（その3）では、アンカー筋D19、定着長を80mmとし、アンカーのみの供試体とアンカーとエポキシ樹脂併用の供試体を作成し、エポキシ樹脂の接着面積を変化させた場合に、引抜耐力がどのように変化するかを確認した。その結果試験（その1）、および試験（その2）同様に、アンカーとエポキシモルタル併用により、引抜耐力が向上すること、また接着面積を増やすことで、エポキシ樹脂とコンクリートとの付着力が増加し、コーン破壊部分のコンクリートの体積が増え、結果引抜耐力が増加することが確認できた。

本章では、アンカー材とエポキシモルタルを併用することでコンクリートのコーン破壊による引抜耐力が向上することが確認できた。これらの結果はアンカーの埋め込み深さを長く取れない場合、また本数を多く取れない場合などにおいて、必要耐力を確保するために有効な手段である可能性を示唆している。今後これらの結果を解析結果と照合するなどして、より信頼性の高い技術として確立すべく、さらなる検証を進めたいと考える。

<参考文献>

- 1) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針，令和元年5月
- 2) 安藤重裕：無機系注入式あと施工アンカー材の接着特性に関する実験的研究，平成29年3月
- 3) 前野裕文，後藤芳顯，小畑 誠，松浦 聖：引き抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究，土木学会論文集，Vol.17，No.441/I-18，pp.185-192，1992.1
- 4) 笠裕一郎，田所敏弥，岡本 大，古谷卓稔：耐荷機構に基づくあと施工アンカーの引抜耐力に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，2015
- 5) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説(第4編 各種アンカーボルト設計指針)，2010

## 第 4 章

### 模擬供試体による接合部の構造性能評価



## 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

### 4.1 概説

本章では、実構造物の壁高欄の取換えを想定し、プレキャスト部材と既設床版を模擬した供試体を製作し、それらを実際の施工と同様の方法で接合させ、静的曲げ載荷試験により接合部の構造性能を確認した。さらに道路橋梁構造物では、自動車通行による繰返し荷重が原因とされる疲労による劣化も報告されている。そのため同形状の供試体により、衝突荷重換算値による200万回の繰返し載荷試験を実施し、エポキシ樹脂の疲労耐久性も合わせて確認した。

### 4.2 静的載荷試験

#### 4.2.1 実験概要

アンカーとエポキシ樹脂を併用して、プレキャスト壁高欄と既設床版を接合した場合の構造物の力学的挙動を把握するため、プレキャスト部材と既設床版を模擬した同一寸法のブロックを製作し、それらを図-4.1に示す実際の施工と同様の方法で接合させた供試体を用いて静的曲げ載荷試験を行い、接合部の構造性能を確認した。

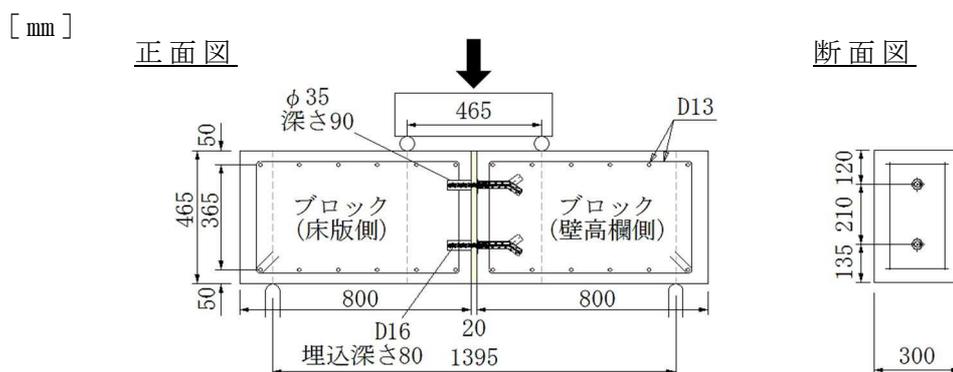


図-4.1 供試体の形状

#### 4.2.2 実験供試体

供試体に用いた鉄筋、インサート（プレキャスト壁高欄側）、アンカー筋（床版側）をそれぞれ写真-4.1, 4.2, 4.3に示す。供試体は、床版部を模擬したブロックにアンカー用の開口部（ $\phi 35\text{mm}$ 、深さ  $90\text{mm}$ ）を設け、そこに写真-4.4のように壁高欄の底板部を模擬したブロックにあらかじめねじ込まれているアンカー筋（SD345, D16, 長さ  $100\text{mm}$ ）を挿入し、それぞれのブロックの間に  $20\text{mm}$  の隙間が出来るよう固定し、その隙間およびアンカー挿入部に図-4.2に示す方法で、エポキシモルタルを注入した。なおコンクリート面はどちらも型枠面とし、乾燥した状態で充填作業を行った<sup>1)</sup>。

第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価



写真-4.1 供試体に用いた鉄筋 (D13)



写真-4.2 供試体に用いたインサート (プレキャスト壁高欄側)



写真-4.3 供試体に用いたアンカー筋 (床版側 D16)

#### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価



写真-4.4 供試体の接合状況（左：穿孔部の状況，右：接合状況）

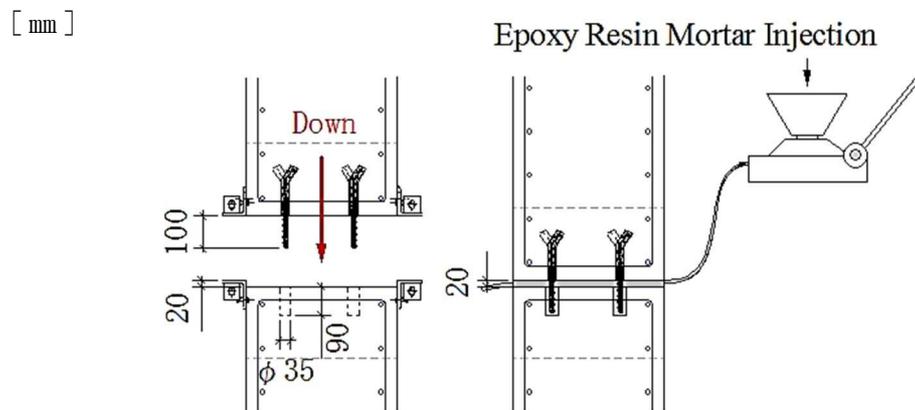


図-4.2 エポキシモルタルの充填方法

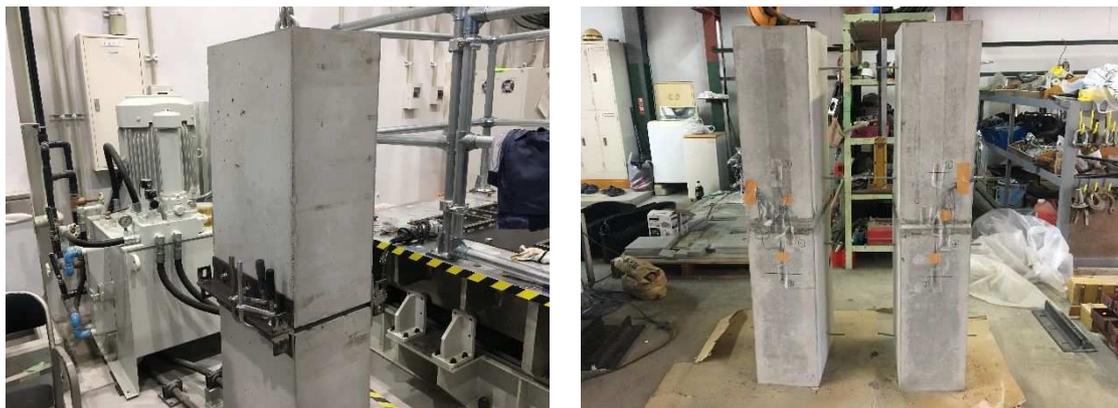


写真-4.5 エポキシモルタルの充填状況（左：充填前，右：充填後）

それぞれのブロックの大きさは、長さ 800mm×幅 300mm×厚さ 465mm で、アンカーの位置や径、長さ、および接合部の幅は実際のプレキャスト製壁高欄の設計に基づいたものである（表-4.1）。比較用として、隙間充填部分に無収縮モルタルを使用した供試体と、アンカーを使用せず（開口部も設けない）エポキシモル

#### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

タルのみで接合した供試体を作成し，同様に静的載荷試験を行った。表-4.2 に供試体の種類を示す。

表-4.1 アンカー定着部の各部の寸法

	寸法 (mm)
アンカー径	D16
アンカー定着長	80
穿孔径 $\phi$	35
穿孔深さ	90
エポキシモルタル厚み (隙間間隔)	20

表-4.2 供試体の種類

	アンカー	エポキシモルタル	無収縮モルタル
供試体 A	○	○	—
供試体 B	○	—	○
供試体 C	—	○	—

供試体の使用材料を表-4.3 に，配合を表-4.4 に示す。また材齢 14 日での円柱供試体による圧縮強度の平均値は 41.6MPa であった。

表-4.3 供試体の使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.15
石灰石微粉末 (P)	炭酸カルシウム 密度 2.71
細骨材 (S)	密度 2.66, 粗粒率 2.70
粗骨材 (G)	密度 2.63, 粗粒率 6.60
混和剤 (AD)	高性能 AE 減水剤 密度 1.065

表-4.4 供試体の配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C	P	S	G	AD
51.5	172	334	201	755	903	5.80

#### 4.2.3 試験方法

試験方法は図-4.1に示すように、支持スパン 1395mm の供試体に対し、載荷スパンを 465mm とする 2 点静的載荷で行った。載荷は写真-4.6, 4.7 に示すように大型 2 軸試験機を用いて行い、供試体が破壊するまで単調載荷し、破壊までの供試体接合部のひずみ、アンカーのひずみ、破壊後の供試体状況を確認した。



写真-4.6 静的載荷試験の状況（その1）



写真-4.7 静的載荷試験の状況（その2）

#### 4.2.4 実験結果および考察

供試体の破壊荷重の結果を図-4.3に示す。供試体 A と供試体 B では，破壊荷重は A の方が大きく，これまでの実験同様にエポキシモルタル併用の効果が確認できる。破壊の状況を写真-4.8，写真-4.9に示す。それぞれ左側が側面，右側が正面から撮影した写真である。

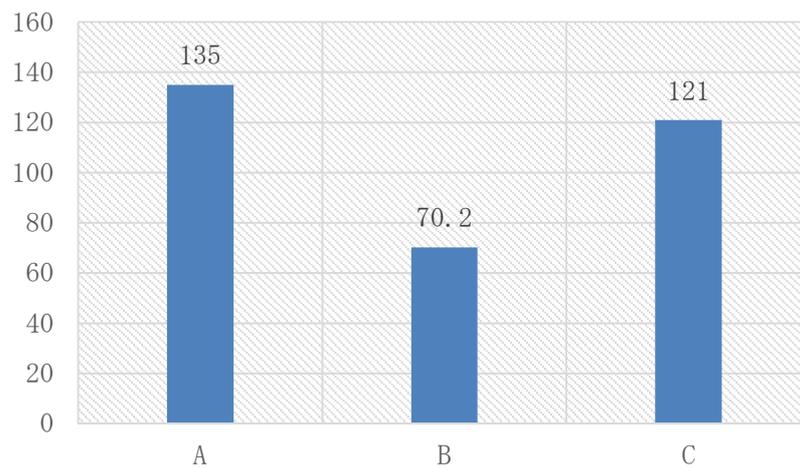


図-4.3 静的載荷試験の結果

これらの写真を見ると，第3章の「3.3 アンカーの引抜試験（その1）」の引抜試験による効果検証の結果と同様に，供試体 A の方がコーン破壊の円錐の角度が緩やかになっており，それに起因して引抜耐力が大きくなったと考えられる。



写真-4.8 供試体 A の破壊状況



写真-4.9 供試体 B の破壊状況

また供試体 C の破壊状況を写真-4.10 に示す。供試体 C の破壊形態は、最大荷重到達直後のエポキシモルタルとコンクリートとの接着面近傍における、コンクリートの脆性的な凝集破壊であり、制御破壊の観点より、アンカーとの併用が望ましいと考えられる。



写真-4.10 供試体 C の破壊状況

#### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

次に，図-4.4 の赤い円で示した位置に設置した変位計による，供試体 A および B についての挙動を図-4.5 に示す。

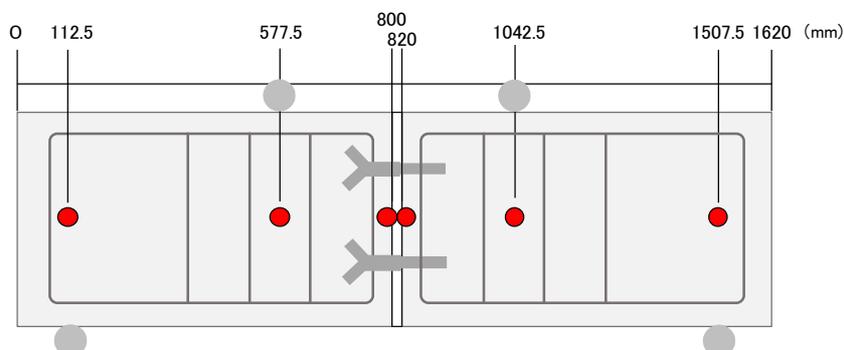


図-4.4 静的載荷試験時の変位量の測定位置

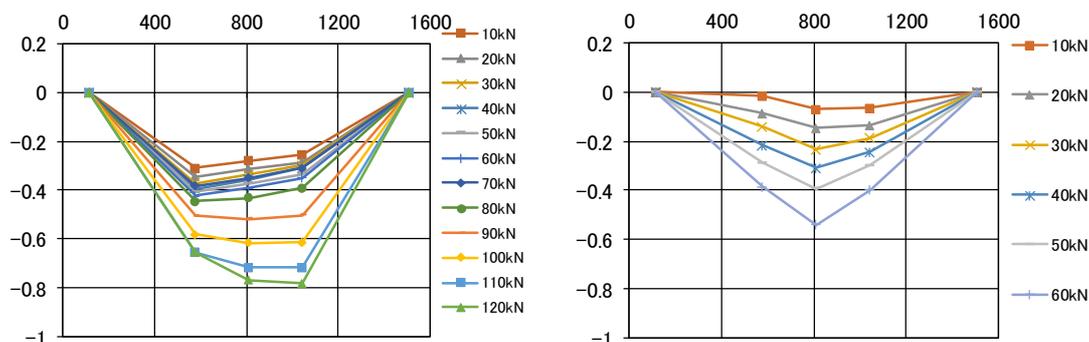


図-4.5 静的載荷時の供試体の挙動（左：供試体 A，右：供試体 B）

供試体 A・Bともに荷重の増加に伴い変位量も増加する傾向にあるが，荷重 60kN までの変位量を比較すると，供試体 A よりも供試体 B のほうが，変位量が大きいたことが確認できる。また，供試体 A は接合部を含む載荷点間の変位量が比較的等しく変化するのに対し，供試体 B は載荷点の変位量に比べ，接合部である中心の変位量が大きくなっていることが分かる。これはエポキシモルタルと無収縮モルタルの，コンクリートとの付着力の違いに起因していると考えられ，供試体 A は接合部とコンクリートブロックが完全に一体となって挙動しているのに対し，無収縮モルタルは，コンクリートとの付着力が低く，コンクリートと無収縮モルタルが界面破壊を起こし，中心部のたわみが大きくなったと考えられる。

#### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

図-4.4 に供試体 A の荷重を載荷した際の隙間充填部のひずみ（エポキシモルタル）と荷重の関係を，図-4.7 に供試体 B の隙間充填部のひずみ（無収縮モルタル）と荷重の関係を示す。またその時の接合部のゲージの位置を図-4.8 に示す。

供試体 B に関しては，無収縮モルタルとの接着が十分でなく，載荷初期より界面に目開きが生じている状況であった。このことから，接合面のひずみが発生しなかったと推察される。それに対し供試体 A では，上面と側面上は圧縮側，側面中，側面下，下面は引張側にひずみ量が計測されており，エポキシモルタルとプレキャスト部材が完全に一体化し，接合部に応力伝達がなされていることが確認できる。また，荷重が 80kN 程度までは概ね線形であり，弾性域にあると推察される。

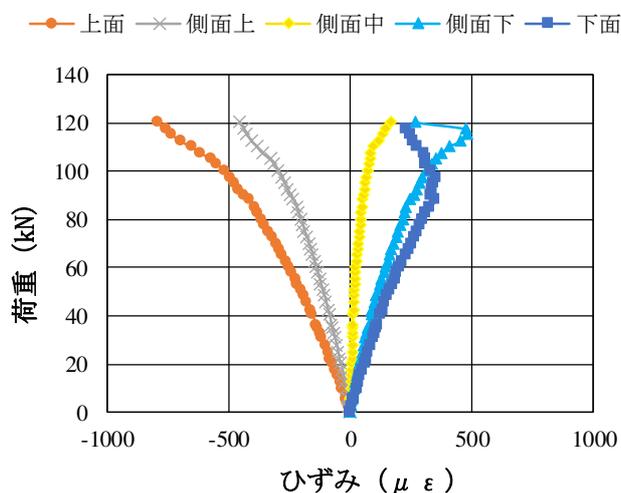


図-4.6 供試体 A の静的載荷試験の結果

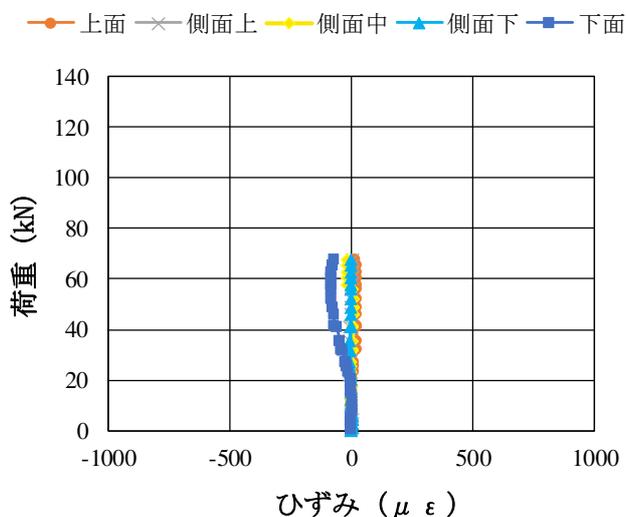


図-4.7 供試体 B の静的載荷試験の結果

[ mm ]

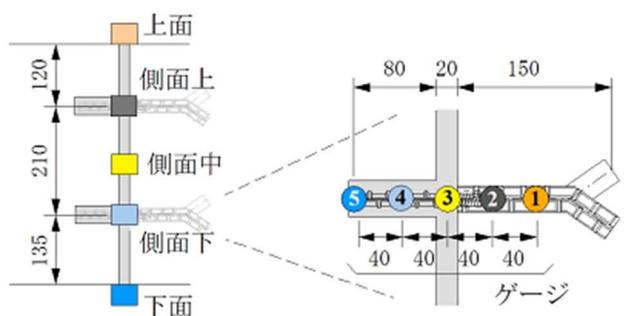


図-4.8 左) 接合部のゲージ位置と右) 引張アンカーのゲージ位置

次に内部の引張側のアンカーについて，荷重とひずみの関係を図-4.9 および図-4.10 に示す。また引張アンカーに貼り付けたゲージの位置を図-4.8 に示す。

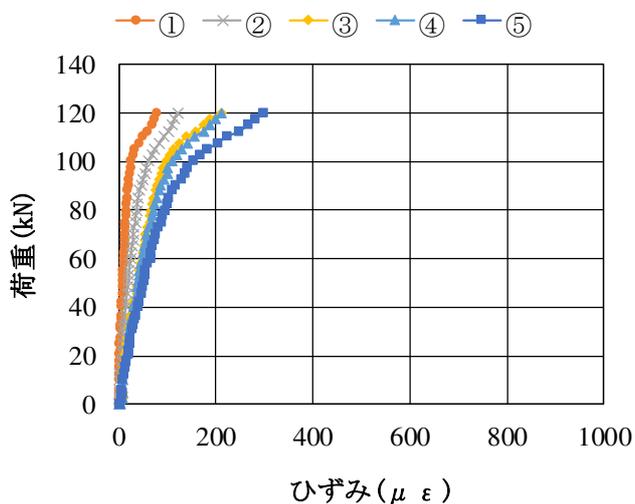


図-4.9 供試体 A のアンカーの荷重－ひずみ

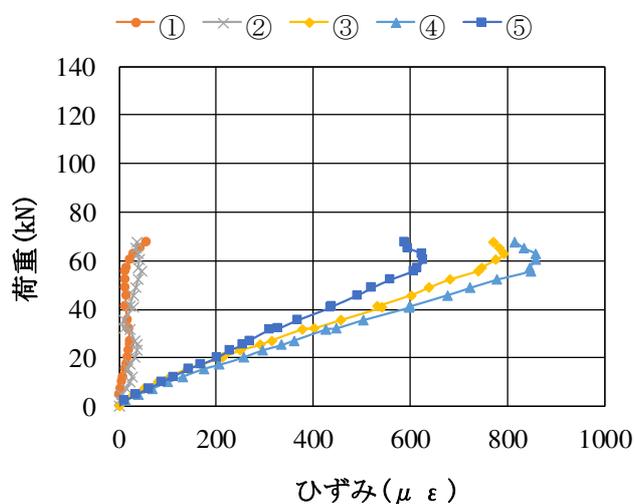


図-4.10 供試体 B のアンカーの荷重－ひずみ

図-4.9より、供試体Aの引張側のアンカーのひずみは100kNあたりまでは比較的小さな値を示しているが、100kNを超えたあたりからひずみの傾きが大きくなっていることが分かる。これは図-4.6の結果の、100kNを超えたあたりで接合部の下面のひずみが減少している時期と合致しており、エポキシモルタルとコンクリート界面に付着切れが生じたと同時に、アンカーが荷重を負担しはじめた結果であると考えられる。

これに対し図-4.10から分かるように、供試体Bでは荷重直後から、アンカーにひずみが生じており、ひずみが $800\mu\epsilon$ を超えた直後に、コンクリートのコーン破壊耐力が限界に達し、破壊に至ったと考えられる。いずれにしても、破壊荷重は、供試体Aの方が供試体Bに比べ2倍程度大きく、エポキシ接着による効果とともに、高い一体性を保持していることを確認した。

### 4.3 200万回の疲労耐久性試験

#### 4.3.1 実験概要

本試験では4.2 静的荷重試験で用いた供試体Aと同様の供試体を製作し、繰返し荷重による疲労試験を行った。試験は片振り荷重方法で行い、下限荷重を静的荷重試験の破壊荷重に対し、応力比が0.1とした値(13.5kN)、上限荷重を静的荷重試験の結果により算出した衝突荷重換算値<sup>2)3)</sup>(53.2kN)とし、200万回の繰返し荷重を行った。なお荷重速度は、蘇迪らによる既往の研究<sup>4)</sup>における走行車両による交通振動計測の結果(平均値:3.2Hz)より、3Hzとした。

研究測定は、試験開始前及び荷重回数が、5万、50万、100万、200万回に達した時点で荷重をその都度停止し、上限荷重まで静的荷重を行った。その際、接合部のひずみや変位、ひび割れの有無などを確認した。また、200万回荷重後には、供試体が破壊するまで静的荷重を行い、耐荷力について無疲労試験体と比較を行った。

#### 4.3.2 実験供試体

試験に用いた供試体は、4.2 静的荷重試験に用いた供試体Aと同一の供試体で実施した。

#### 4.3.3 試験方法

繰返し曲げ荷重試験の条件を表-4.5に、試験の概要を図-4.11に示す。試験は大型2軸試験機を用い、片振り荷重方法で行った。下限荷重を静的荷重試験の破壊荷重に対し、応力比で0.1とした値(13.5kN)、上限荷重を静的荷重試験の結果により算出した衝突荷重換算値(53.2kN)とし、荷重速度3Hzで200万回の繰返し荷重を行なった。測定は、試験開始前及び荷重回数が5万、50万、100万、

## 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

200万回に達した時点で荷重をその都度停止し、上限荷重の53.2kNまで静的荷重を行った。その際、接合部のひずみや変位、ひび割れの有無などを確認した。また、200万回荷重後には、供試体が破壊するまで静的荷重を行い、耐荷力等について無疲労試験体と比較した。試験の状況を写真-4.11に示す。

表-4.5 疲労試験の条件

上限荷重 (kN)	53.2
下限荷重 (kN)	13.5
荷重速度 (Hz)	3.0
上限回数	200万回
計測時期	1,5万, 50万, 100万, 200万回



図-4.11 繰返し荷重試験の概要



写真-4.11 繰返し荷重試験の状況

### 4.3.4 試験結果および考察

繰返し荷重による疲労試験を行なった結果、200万回の繰返し荷重で供試体が破壊することは無かった。またひび割れの発生も確認されなかった。200万回疲

#### 第4章 模擬供試体による接合部の構造性能評価

労後の静的载荷による供試体の破壊荷重は 102.5kN であり，無疲労試験体と比較し強度の低下率は 24%であった。無疲労試験体と疲労後の試験体の破断側面を写真-4.12 に示す。



写真-4.12 左) 無疲労試験体の破壊状況，右) 疲労後の試験体の破壊状況

左側が無疲労試験体，右側が 200 万回疲労後の試験体の破断状況を側面から撮影した写真である。これらの写真を見てみると，疲労試験体の方は無疲労試験体の破断側面と比較して，コーン破壊時のコンクリート断面が小さくなっていることが確認できる。これは繰返し载荷により，アンカー近傍のコンクリートに，残留応力による内部亀裂が発生し，これが繰返し载荷を受けることで成長し破壊に至った，コンクリートの疲労破壊によるものと推測される。

続いて，図-4.12 に設置した変位計の位置を示し，図-4.13 に繰返し载荷の途中で行った，静的载荷の荷重と変位の関係を示す。

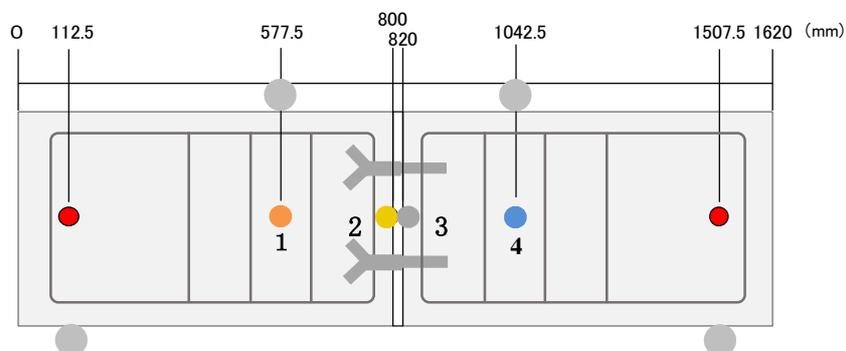


図-4.12 変位計の設置位置

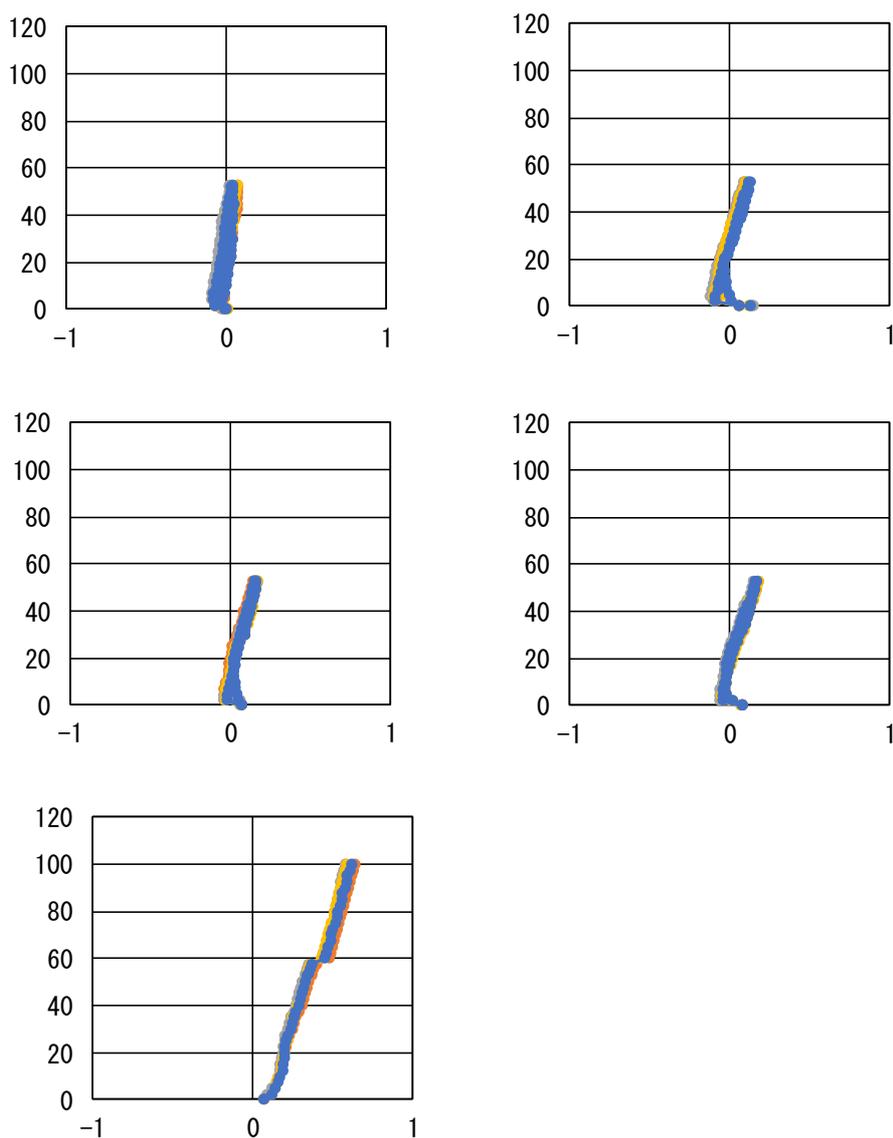


図-4.13 荷重と変位の関係

(左上：初期，右上：5万回後，左中：50万回後，  
右中：100万回後，左下：200万回後)

これらの図から，荷重に対する変位はどれも 1mm 以下ととても小さく，繰返し載荷を重ねてもその変位が大幅に増大することは無かった。しかし，繰返し載荷 100 万回後と 200 万回後の図を比較してみると，200 万回後のグラフの方が，傾きが若干大きくなっていることが確認できる。このことから，繰返し載荷を続けることにより，供試体の耐荷力はおくわずかであるが低下する傾向にあると考えられる。

続いて繰返し回数ごとに上限荷重値まで静的載荷を行った際の，試験体接合部の荷重と，残留ひずみを 0 としたひずみの関係を図-4.14 に示す。これを見る

と、接合部のエポキシモルタルは荷重を繰返し受けた状態においても、圧縮側，引張側ともに初期値とほぼ同一の直線上を動いることが分かり，弾性内での挙動を疲労の影響を受けずに繰り返していることが確認できる。これらの結果より，本工法で使用するエポキシモルタルは耐疲労特性に優れた材料であると言える。

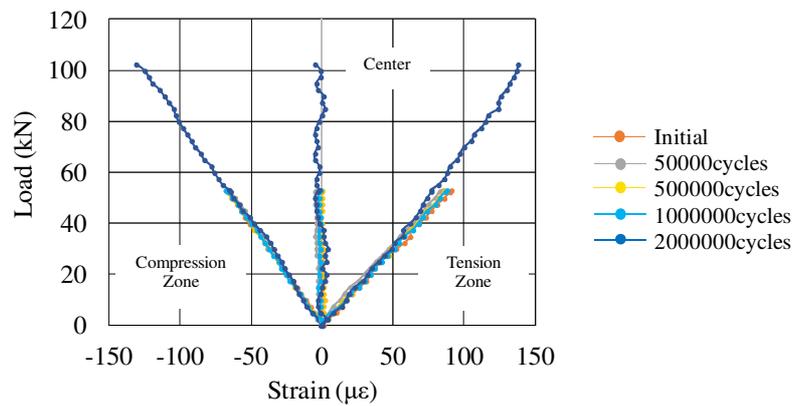


図-4.14 接合部の荷重とひずみの関係

### 4.4 本章のまとめ

実構造物を模擬した供試体を製作し、静的載荷試験、及び繰返し載荷による疲労試験を行った。その結果得られた知見は以下の通りである。

#### 1) 静的載荷試験

静的載荷試験で提案する工法の構造性能を確認した。3種類の供試体を用いて、比較を行ったが、エポキシ樹脂とアンカーを併用した場合には、破壊荷重が他の供試体と比較して高いという結果が得られた。応力伝達については、100kNあたりまではエポキシ樹脂の接合部が、100kN以降はアンカーも応力を受け持ち、最終的にコーン破壊に至ることが確認できた。また破壊の状況を確認すると、第3章の「3.3 アンカーの引抜試験（その1）」の引抜試験による効果検証の結果と同様に、コーン破壊の円錐の角度が緩やかになっており、併用による効果が模擬供試体においても確認できた。

無収縮モルタルとアンカーを併用した場合には、接合部に充填した無収縮モルタルは応力をほぼ受け持たず、アンカーのみが荷重に対する応力を受け持ち、最終的にコーン破壊に至ることが確認できた。これはコンクリートと無収縮モルタルの付着力が脆弱であるためであり、本工法でのアンカーの応力負担を接着力で補う目的としては、使用は現段階では難しいと言える。

エポキシ樹脂のみの場合については、最大荷重到達直後のエポキシモルタルとコンクリートとの接着面近傍における、コンクリートの脆性的な凝集破壊であり、制御破壊の観点より、アンカーとの併用が望ましいと考えられる。

#### 2) 200万回の疲労耐久性試験

200万回の繰返し載荷による疲労試験を行い構造性能の評価を行ったが、繰返し載荷で供試体が破壊することはなく、高い疲労耐久性を示した。200万回の繰返し載荷後に行った静的載荷試験による供試体の破壊荷重は、無疲労試験体と比較して24%低下したが、繰返し載荷後の荷重と変位の関係、また接合部のエポキシモルタルのひずみが無疲労状態と変化していないことから、低下した原因はアンカー近傍のコンクリートの疲労亀裂の進展により、最終耐力が減少したためと考えられる。これらの結果より、本工法で使用するエポキシモルタルは、繰返し荷重に対し、高い疲労耐久性を持つ材料であると言える。

<参考文献>

- 1) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針，令和元年5月
- 2) 日本道路協会：車両用防護柵標準仕様・同解説，平成16年3月
- 3) 建設土木研究所道路部交通安全研究室，日本道路公団試験研究所他：高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書，平成10年6月
- 4) 蘇迪，三輪陽彦，藤野陽三，長山智則：首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析，構造工学論文集 Vol.59A（2013年3月）

## 第 5 章

### 実構造物での施工性評価



## 第5章 実構造物での施工性評価

### 5.1 概説

第2章から第4章では、プレキャストコンクリートと既存構造物との新しい一体化の方法として、アンカーとエポキシ樹脂の併用による新しい工法を提案し、その実用化に向け、基礎的な実験を行い、その有効性を確認した。

この章では、プレキャスト壁高欄の設計手法について、車両用防護柵標準仕様・同解説、H16, 3（日本道路協会）<sup>1)</sup>に基づき、主要な設計事項を述べると共に、第4章までに行った基礎的研究をもとに、アンカーとエポキシ樹脂併用による新しい接合構造の実用化に向け、実構造物と同一の大きさの壁高欄供試体を作成し、橋梁部を模擬した基礎部を建設し、その基礎部にプレキャスト製壁高欄を設置する施工実験を実施し、施工性の評価を行った。

### 5.2 プレキャスト壁高欄の設計

#### 5.2.1 壁高欄の設計指針

壁高欄の設計方法に関しては、車両用防護柵標準仕様・同解説（平成16年3月）<sup>1)</sup>等に記載されているが、これは高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書（平成10年6月）<sup>2)</sup>内の衝突実験の結果からもとめられている。設計要件としては、(1) 衝突荷重の算定、(2) 安定計算（転倒、滑動、支持）、(3) 躯体の応力計算の3つがある。以下にそれぞれについて詳細を述べる。

#### (1) 衝突荷重の算定

高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書（平成10年6月）<sup>2)</sup>「7.3 衝突荷重の算定」より、車両荷台による衝撃荷重を十分受け持つ高さを有するコンクリート製防護柵への衝撃荷重は、(式5.1)で示される荷重算定式で算定するとされている。

$$F_t = \kappa_f \cdot \frac{2 \cdot (1 + e_v)}{L_w \cdot \sin \theta} \cdot \left( \frac{m}{m_r} \right)^2 \cdot E_y \cdot a \quad (\text{式5.1})$$

ここに

$F_t$  : 衝突荷重 (kN)

$E_y$  : 防護柵直角方向の衝撃度 (kJ)

$$: E_y = 1/2 \times m \times v^2 \sin^2 \theta$$

$\kappa_f$  : 補正比例係数

$$: \kappa_f = 0.1$$

$\theta$  : 衝突角度 (度)

$$: \theta = 15 \text{度}$$

$L_w$  : 車軸間隔 (前後輪間隔 : m)

$$: L_w = 6.455 \text{m}$$

$m$  : 車両全質量 (t)

$$: m = 25 \text{t}$$

第5章 実構造物での施工性評価

- $m_r$  : 後輪軸質量 ( t ) :  $m_r = 18.5 \text{ t}$   
 $v$  : 衝突速度 ( m/sec )  
 $e_v$  : 車両の反発係数 :  $e_v = 0.2$   
 $a$  : 斜面透減率 :  $a = (K_t)^2 \times b \leq 1.0$   
 $K_t$  : 角度低減率 :  $K_t = \sin^2 \alpha$   
 $\alpha$  :  $\alpha = \tan^{-1}(\sin \theta / \tan \beta)$   
 $\beta$  : 斜面角度 : 単スロープ10度, Fタイプ6度  
 $b$  : 実験係数 : 単スロープ=1.7, Fタイプ=1.1

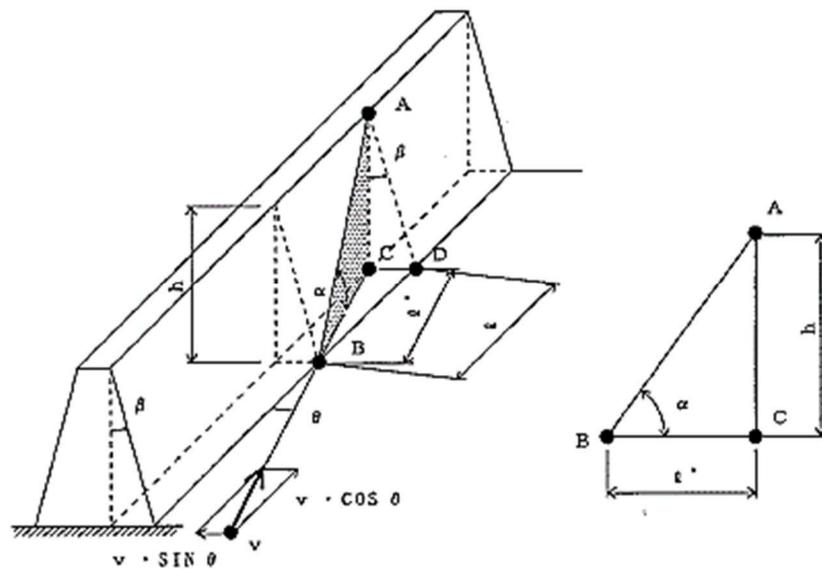


図-5.1 衝突面が角度  $\beta$  の斜面の場合

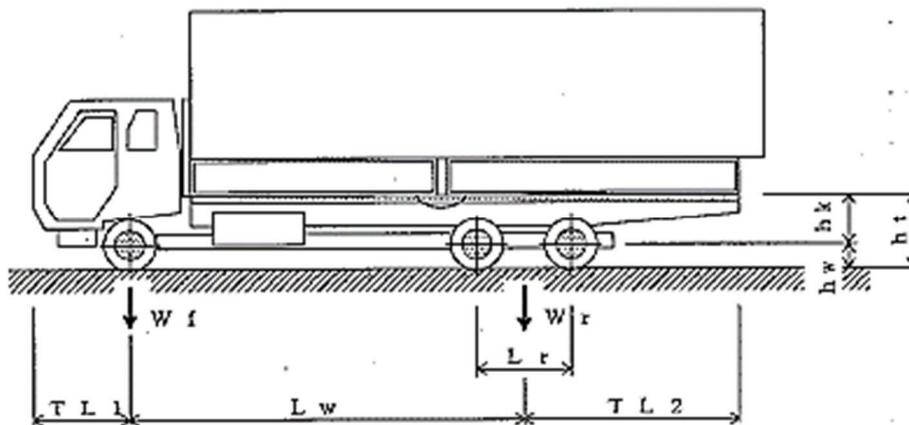


図-5.2 25 t 車のモデル構造緒元

(2) 安定計算

高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書（平成10年6月）<sup>2)</sup>「7.3 衝突荷重の算定」より，壁高欄の安定計算は、転倒・滑動・支持について行うものとされている。

<転倒に対する検討>

転倒および地盤反力の検討に用いる等分布荷重： $Q_a$

$$Q_a = F_t / L_a \quad (\text{式5.2})$$

ただし、 $L_a$ =転倒に対する有効延長 $\leq 50$ m

転倒モーメント： $M_a$

$$M_a = Q_a \times H = Q_a \times (h_1 + h_2) \quad (\text{式5.3})$$

ただし、 $H$ =底版から荷重作用点までの距離

$h_1$ =接地面から荷重作用点までの距離 $\leq 1.0$ m， $h_2$ =埋込み深さ

抵抗モーメント： $M_r$

$$M_r = m_c \times g \times D / 2 \quad (\text{式5.4})$$

ただし、 $m_c$ =剛性防護柵の単位長さ質量

$D$ =剛性防護柵の底版幅

安全率： $F_s$

$$F_s = M_r / M_a > 1.0 \quad (\text{式5.5})$$

<滑動に対する検討>

転倒および地盤反力の検討に用いる等分布荷重： $Q_b$

$$Q_b = F_t / L_b \quad (\text{式5.6})$$

ただし、 $L_b$ =滑動に対する有効延長=10m

滑動力： $P_a$

$$P_a = Q_b \quad (\text{式5.7})$$

抵抗力： $P_r$

$$P_r = P_{r1} + P_{r2} \quad (\text{式5.8})$$

ただし、 $P_{r1}$ =摩擦による抵抗力  $m_c \times g \times \mu$

$\mu$  =摩擦係数=0.55

$P_{r2}$ =舗装、地盤による抵抗力 (9.8kN/m)

安全率： $F_s$

$$F_s = P_r / P_a > 1.0 \quad (\text{式5.9})$$

<地盤反力に対する検討>

偏心位置： $e$

$$e = M_a / (m_c \times g) \quad (\text{式5.10})$$

地盤反力の作用位置： $x$

$$x = D/2 - e \quad (\text{式5.11})$$

ただし、 $3 \times x < D$ なら三角形分布

地盤反力： $q_1, q_2$

$$q_1 = m_c \times g / D \times (1 + 6 \cdot e / D) \quad (\text{式5.12})$$

$$q_2 = m_c \times g / D \times (1 - 6 \cdot e / D) \quad (\text{式5.13})$$

ただし、三角形分布であれば

$$q_1 = 2 \cdot m_c \times g / (3 \cdot x) \quad (\text{式5.14})$$

5.2.2 設計の基本方針

プレキャスト壁高欄の設計については、NEXCO の設計要領第二集 橋梁保全編<sup>3)</sup>「6章 支承及び付属物 5. 防護柵」、および構造物施工管理要領<sup>4)</sup>のプレキャスト壁高欄の項に準拠して行った。設計上定められた基本的な事項について、同設計要領に示される図表を準用して示す。また鉄筋コンクリート製の防護柵については、車両の衝突実験結果より衝突緩和や誘導性に有効となる図-5.3に示すフロリダ型とすることとなっているため、プレキャスト製壁高欄もフロリダ型とした。

[ mm ]

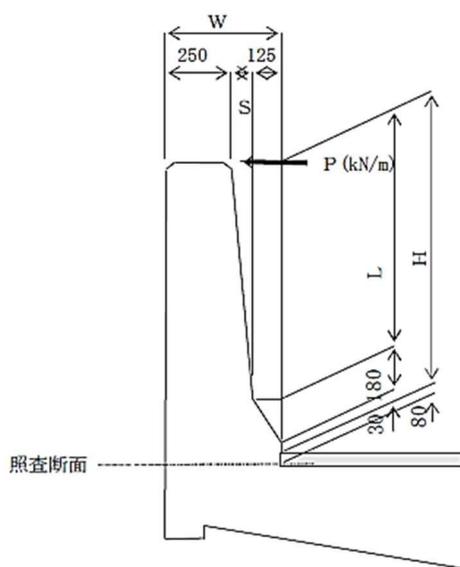


図-5.3 鉄筋コンクリート製防護柵の形状

表-5.1 防護柵種別と寸法および荷重

種別	H (mm)	L (mm)	W (mm)	S (mm)	衝突荷重 F (kN)	天端線荷重 F (kN/m)
SS	1100	890	465	90	135	45
SA	1000	790	455	80	88	32
SB	900	690	445	70	58	22
SC	900	690	445	70	35	13

※上記衝突荷重は式5.1より算出された数値

### 5.3 プレキャスト壁高欄の接合部の要求性能

プレキャスト壁高欄の接合部の要求性は、図-5.4、表-5.2に示す、構造物施工管理要領<sup>4)</sup>の6-3-5項の接合部の性能照査に規定する性能を満足するものでなくてはならない。

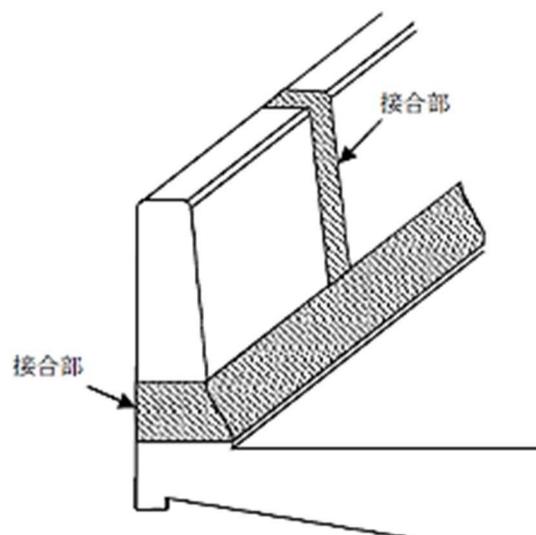


図-5.4 プレキャスト壁高欄の接合部の性能照査対象部位の一例

表-5.2 プレキャスト壁高欄の接合部の性能照査項目

衝突条件	項目	規格値
「設計荷重相当」の衝撃を与えた場合	外観変状	①有害なひび割れが発生しないこと ②構成部材が飛散しないこと
	構成部材のひずみ	壁高欄及び接合部に残留ひずみが発生しないこと
「場所打ち壁高欄における耐力相当」の衝撃を与えた場合	外観変状	①壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートに剥離が生じないこと ②接合部の引張部材に破断や抜けが生じないこと

## 5.4 プレキャスト壁高欄と床版部との接合方法

### 5.4.1 プレキャスト壁高欄と床版部の接合箇所

床版とプレキャスト壁高欄の接合箇所については、構造安全性、耐久性、現場作業の省力化を考慮し、図-5.5に示す位置とした。図-5.5の左側は車両用防護柵標準仕様・同解説<sup>1)</sup>(平成16年3月)に記載のプレキャスト壁高欄の一例であり、右側が本研究で新たに提案した工法の取付位置である。これにより、接合部における水の侵入が防止される事で、アンカー筋の腐食が抑えられるとともに、衝突荷重により接合部にかかる応力が図-5.6に示すように抑えられることで、構造安全性も確保できる。

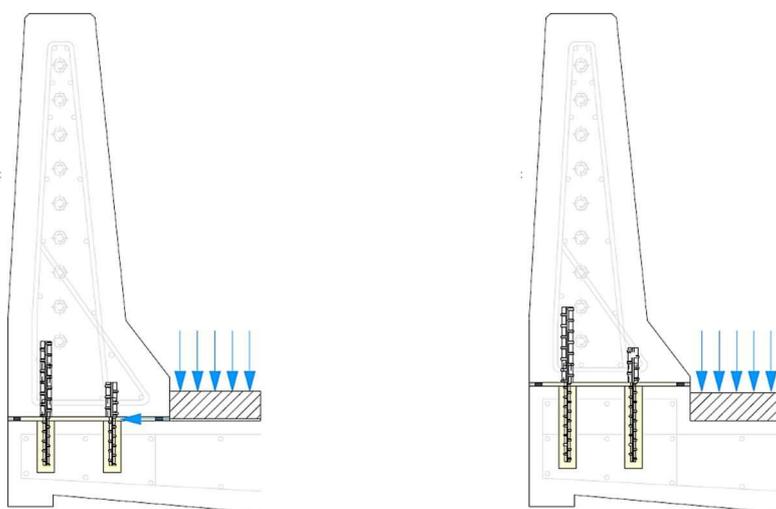


図-5.4 プレキャスト壁高欄の接合位置

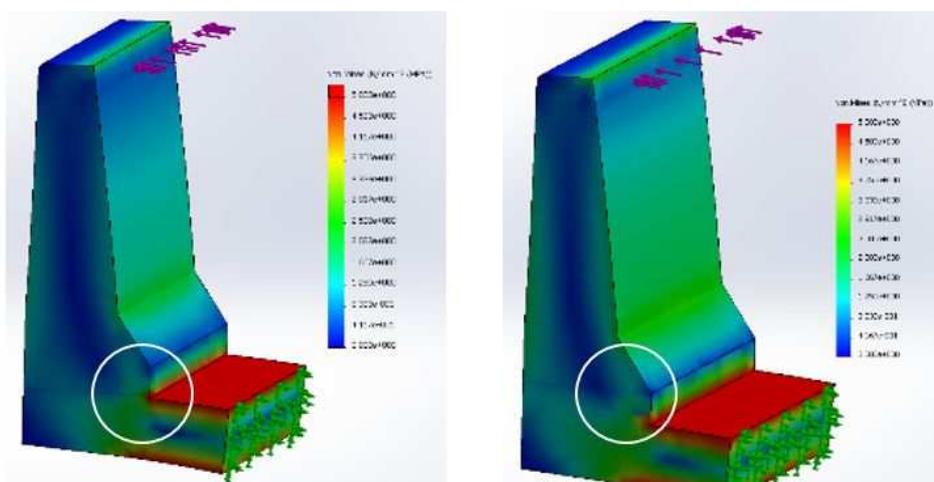


図-5.6 プレキャスト壁高欄の接合位置

(FEM解析：左側は接合部が床版上面の場合、右側は本研究の提案工法)

また実際に壁高欄のみを交換する場合には、コンクリートカッターで、既存の壁高欄を切断し、撤去する必要があるが、壁高欄を橋梁延長方向に、水平に切断する場合、地覆部分を床版の天端と同一面でカットすることは不可能であり、どうしても一度切断後に、再度綺麗に削り取る作業が必要となる。

しかし本研究で提案する新たな工法の接合箇所であれば、一回のカッター作業による切断が可能となり、大幅な作業の省力化に繋がる。

#### 5.4.2 プレキャスト壁高欄と床版部の接合構造

床版とプレキャスト壁高欄との接合は、床版側にアンカー筋を挿入する開口部（φ50mm）を設け、プレキャスト壁高欄側に配置されるアンカー筋をその開口部に挿入し、床版とプレキャスト壁高欄の隙間10mm、および開口部とアンカー筋の隙間にエポキシモルタルを充填し、形成することを基本としている。エポキシモルタル充填時の漏れを防止するため、図-5.7に示すようにバックアップ材を貼り、その外側はバックアップ材が表面に露出しないようモルタルで仕上げた。

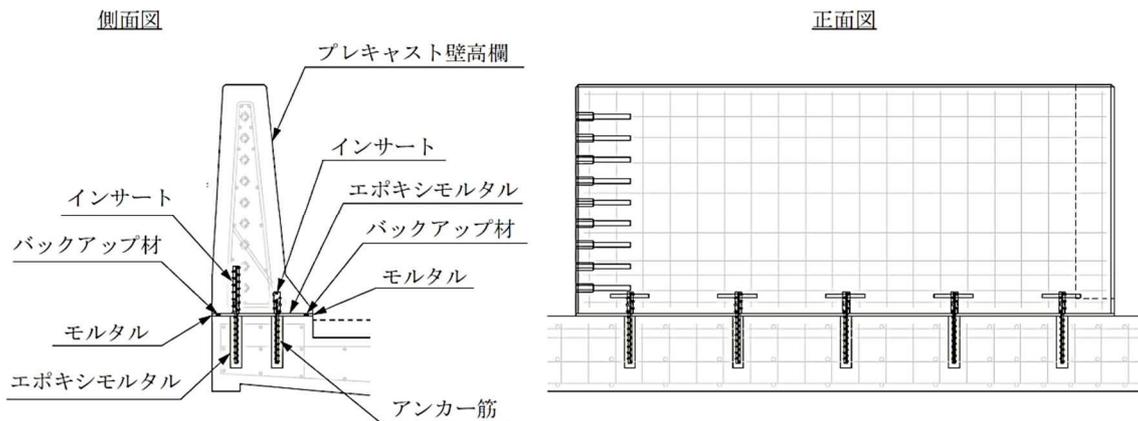


図-5.7 プレキャスト壁高欄と床版との接合断面

#### 5.4.3 プレキャスト壁高欄同士の横連結部の接合構造

プレキャスト壁高欄同士の横連結部の接合構造を図-5.8に示す。横連結部は片方の製品からアンカー筋（D22）を100mm間隔で9本設置し、もう片方には縦スリット部を設け、製品を上から落とし込む方法で施工することとした。製品の接合部にはバックアップ材としてスポンジパッキンを貼り、エポキシモルタル充填時の漏れを防止した。横連結部の製品同士の隙間は10mmとし、床版部との接合部同様にモルタルで仕上げた。

[mm]

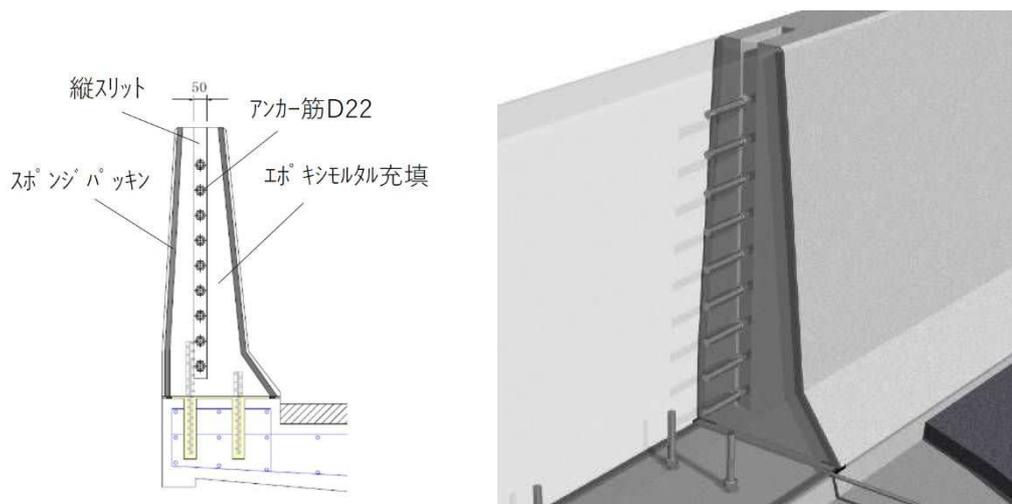


図-5.8 プレキャスト壁高欄同士の横連結部の概要

## 5.5 供試体の作製

### 5.5.1 型枠の製作

プレキャストコンクリート製品に用いられる型枠は、何度も転用して用いられ、さらにコンクリートの締固めによる振動や蒸気養生による熱応力などを繰り返し受けるため、そりやねじれなどの変形が生じないように、十分な強度、剛性を有した鋼製型枠が一般的に使用されている。よって、今回施工実験に用いた試作型枠も鋼製型枠とした。実際の型枠を写真-5.1, 5.2に示す。



写真-5.1 プレキャスト壁高欄の鋼製型枠①



写真-5.1 プレキャスト壁高欄の鋼製型枠②

また型枠は、プレキャスト壁高欄の表面に気泡などが発生しないよう、コンクリート打設面が、底版側になるよう製作し、さらに脱型時や運搬時、さらに施工時に角欠け等を生じさせないために、製品の角の部分には、写真-5.3のようにC9の面取りを施した。



写真-5.3 プレキャスト壁高欄の面取り状況

5.5.2 鉄筋ユニットの組立て

プレキャスト壁高欄の配筋図を図-5.9に示す。設計要領第二集「橋梁保全」<sup>3)</sup>の5-5項(プレキャスト壁高欄)では、プレキャスト壁高欄のかぶりは場所打壁高欄と同等のかぶりを確保するという記載があり、70mmとした。場所打ち壁高欄の参考配筋図を図-5.10に示す。

[ mm ]

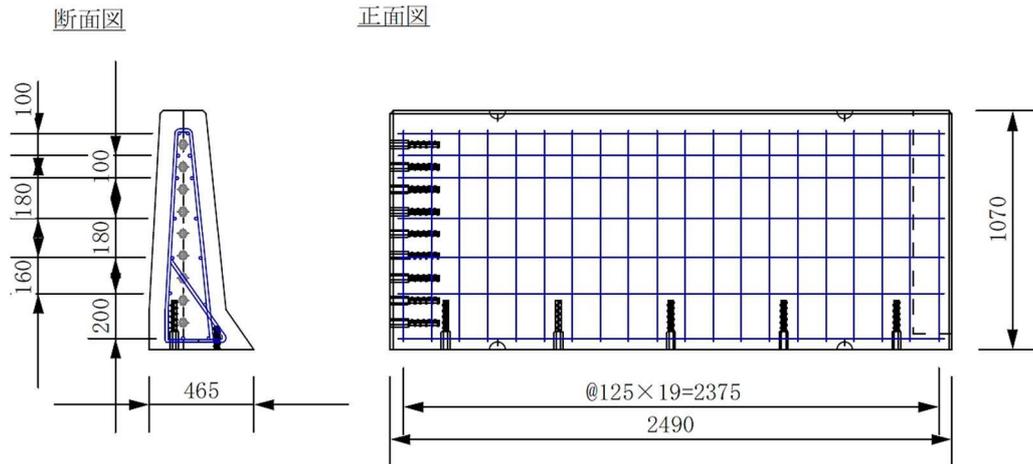


図-5.9 プレキャスト壁高欄の配筋図

[ mm ]

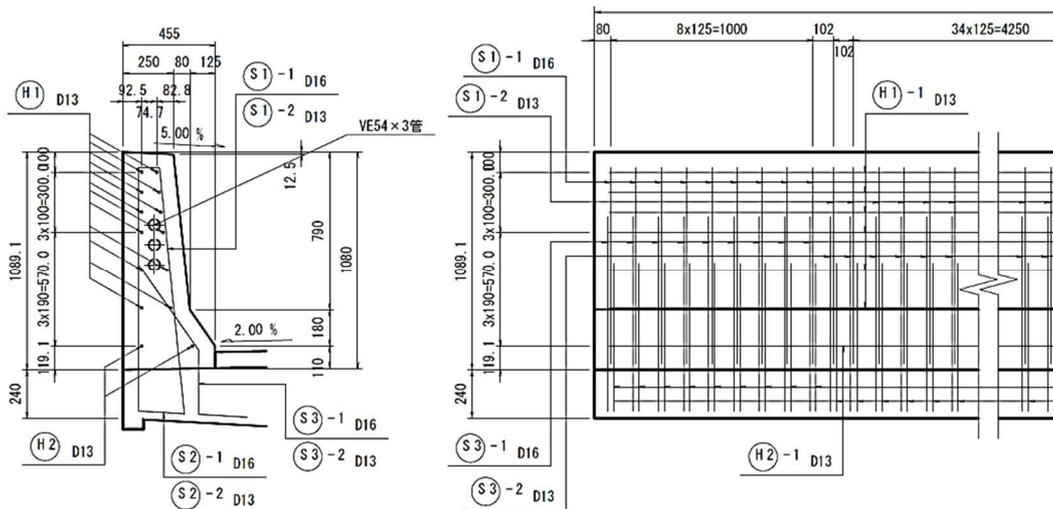


図-5.10 場所打ち壁高欄の配筋図の一例

鉄筋は、図-5.9の配筋図に記された、径及び本数を用いて、型枠設置時に変形が生じないように、結束用焼きなまし鉄線により堅固に組み立てた。鉄筋の組立て状況を写真-5.4に示す。



写真-5.4 プレキャスト壁高欄の配筋の状況

### 5.5.3 型枠の組立ておよび鉄筋セット

事前に組み立てた鉄筋ユニットを所定の位置にセットする。所定のかぶり(70mm)を確保するために、写真-5.5のようにモルタル製スペーサを側面、及び底面に設置した。



写真-5.5 鉄筋のセット状況

## 第5章 実構造物での施工性評価

側型枠には、写真-5.6のようにインサートを取り付ける。横連結用の縦スリットは写真-5.7のように、発砲スチロールを型枠に貼付け製作した。

また接合部は、洗出し仕上げとするため、脱型用の油を塗布した後、擬結遅延剤を塗布した（写真-5.8）。



写真-5.6 横連結用のインサートのセット状況



写真-5.7 横連結用のスリット部の発砲セット状況



写真-5.8 連結部分に凝結遅延剤を塗布している状況

また、底版部のアンカー筋用のインサートは、図-5.9に示すように、かぶりを70mm以上確保する必要があるため、定着長を長く取ることが出来ない。そのため、今回使用したインサートは、異形鉄筋（D32）に丸穴（ $\phi 16\text{mm}$ ）を開け、そこにD13の鉄筋（長さ150mm）を結束線で固定したものを使用した。使用したインサートを写真-5.9に、型枠への設置状況を写真-5.10に示す。



写真-5.9 アンカー筋用のインサート（製品前側）

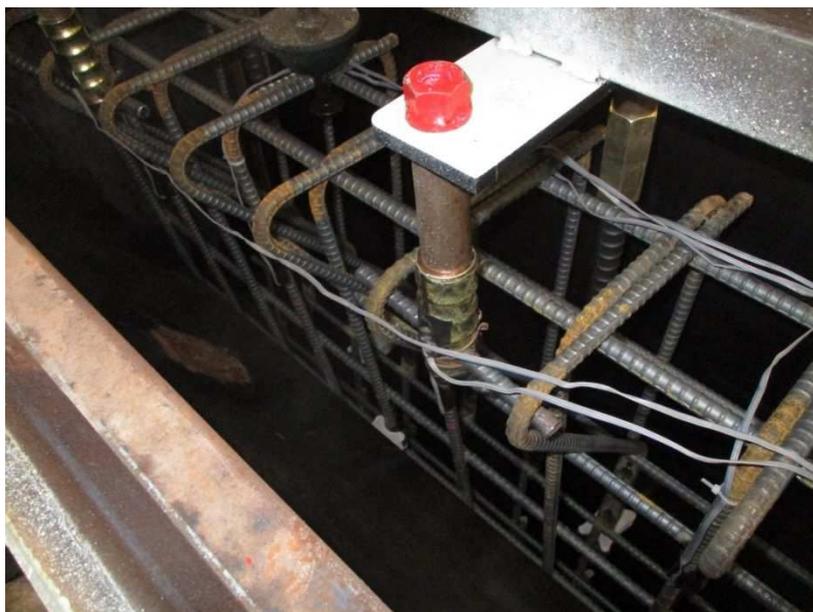


写真-5.10 インサートの型枠セット状況

#### 5.5.4 コンクリートの打込み

コンクリートの打込みは、鉄筋や付属物の移動、及び材料分離が生じないように留意して行った。その状況を写真-5.11に示す。またコンクリートは実際の製造を考慮し、高流動コンクリートとし、設計基準強度は $40\text{N/mm}^2$ 以上とした。コンクリートの示方配合を表-5.3に示す。

表-5.3 プレキャスト壁高欄の示方配合

W/C (%)	S/a (%)	単位質量： $\text{kg/m}^3$						
		水 W	セメント C	混和材 P	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G	AD
43.7	41.5	165	378	186	611	65	953	7.1

ここで、W:水(密度  $1.0\text{g/cm}^3$ )、C:普通ポルトランドセメント(密度  $3.15\text{g/cm}^3$ )、P:炭酸カルシウム(密度  $2.70\text{g/cm}^3$ )、S1:南九州市砕砂(密度  $2.60\text{g/cm}^3$ )、S2:いちき串木野市砕砂(密度  $2.58\text{g/cm}^3$ )、G:いちき串木野市砕石(密度  $2.61\text{g/cm}^3$ )、Ad:ポリカルボンサン系高性能減水剤(密度  $1.065\text{g/cm}^3$ )



写真-5.11 コンクリートの打設状況

また、コンクリートの打込み終了後は、十分な湿度と水和反応に必要な温度が確保できるよう、ブルーシートで覆い養生を行った。同一養生で製作した円柱供試体による、材齢14日の圧縮強度の試験結果を、表-5.4に示す。

表-5.4 供試体の圧縮強度

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No.1	46.7
No.1	49.2
No.1	44.2
平均値	46.7

#### 5.5.5 製品の脱型および接合面の処理

製品の型枠からの取外し（脱型）は、製品に有害なひび割れや変形、欠けなどが生じないように、慎重に行った。製品底面（打設面）には吊り用のインサートを入れ、そこに専用の治具を装着し、写真-5.12のように型枠から外した。

またプレキャスト壁高欄の両面小口面、及び底版部は現場施工となるエポキシモルタルの付着が良好になるよう、写真-5.13のように粗面仕上げとした。コンクリート打設前に型枠面に擬結遅延剤を塗布し、脱型後高圧水で洗い出し作業を実施した。



写真-5.12 型枠からの取外し作業状況



写真-5.13 小口面の粗面仕上げ状況

### 5.6 プレキャスト壁高欄の施工

施工は図-5.11 に示すように、製品単独での施工が2基、横連結部が2基の2箇所、計6基で実施した。プレキャスト壁高欄の製品長は2500mm、また施工は1パーティ平均5人/日で行った。

[mm]

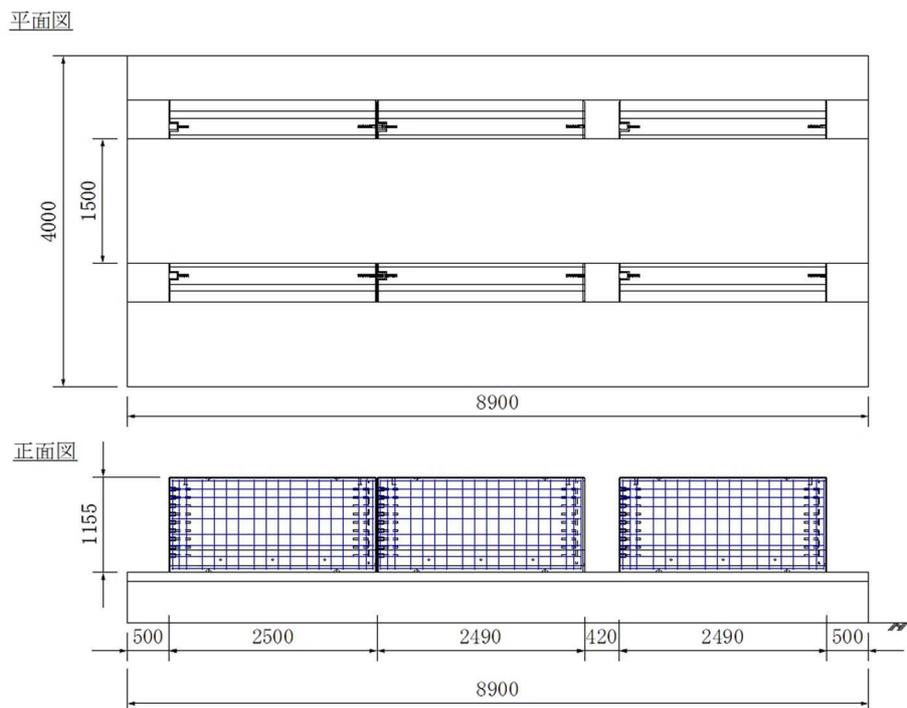


図-5.11 プレキャスト壁高欄の試験施工の概要図

次に、プレキャスト壁高欄の施工のフローを図-5.12 に示す。今回の試験では、接合部の構造安全性を評価するため、既存壁高欄の撤去作業は行わず、床版部と地覆部を模擬した基礎コンクリートに、あらかじめアンカー用の穿孔部（ $\phi 50$ mm、深さ240mm）を設けた基礎部も製作し実験を行った。



図-5.12 プレキャスト壁高欄の施工フロー

<ステップ 1>

既設壁高欄の撤去

今回の試験施工では、既設の壁高欄を撤去する代わりに、地覆部を残した状態で、カッターで切断した場合を想定し、図-5.13 に示すように橋梁部床版を模擬した試験体を建設した。基礎コンクリート部の建設状況を写真-5.14、5.15 に示す。

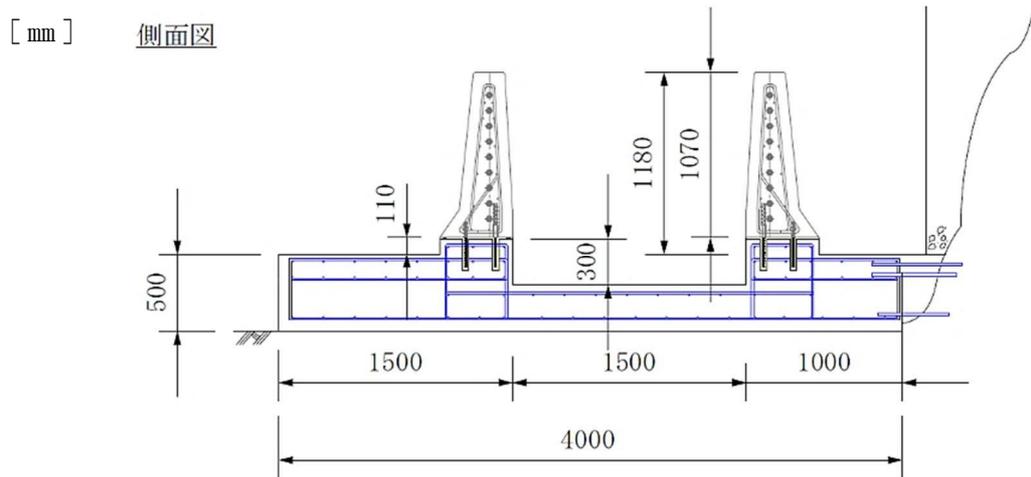


図-5.13 橋梁部床版部分の模擬試験体図



写真-5.14 基礎地覆部の製作状況（配筋）



写真-5.15 基礎地覆部の製作状況（生コン打設）

<ステップ 2>

墨出し，アンカー穿孔

次に，アンカー筋を挿入する開口部（ $\phi 50$  mm，深さ 240 mm）をコアドリルで開ける。今回はあらかじめコンクリートを打設する前に，ボイド管（ $\phi 50$  mm）を開口部になる箇所に設置し，その後コンクリートを打設し，硬化後ボイド管を取り外した。橋梁床版部を模擬した基礎の完成状況を写真-5.16 に示す。



写真-5.16 基礎地覆部の製作状況（完了）

<ステップ 3>

バックアップ材，スペーサ設置

接合部にエポキシモルタルを充填する隙間を設けるためのスペーサと，エポキシモルタルを充填するための注入口と排出口を写真-5.17 のように設置した。コンクリートとの接着には 2 液性の速乾型のエポキシ接着剤を用いた。



写真-5.17 スペーサおよび注入，排出口設置状況

次にエポキシモルタルを充填する際に充填漏れを防ぐための，バックアップ材を写真-5.18，5.19 のように貼り付けた。充填時の漏れ防止の効果を確認するために，表-5.5 に示す 2 種類のバックアップ材を本実験では使用した。

表-5.5 バックアップ材の種類

種類	厚さ (mm)	硬度
エラストイト (瀝青質目地板)	20	—
スポンジゴム	20	30

エラストイトは，コンクリートのひび割れを防止するために入れる板状のアスファルト系の伸縮目地材であり，擁壁やダムなどの大型構造物にも使用され，一般的に耐久性，耐腐食性に優れる材料であるため，今回使用した。

一方スポンジゴムは，形状や硬度を自由に調整できるため，コンクリートペースト漏れ防止など，幅広くバックアップ材等として使われている。今回実験に使

## 第5章 実構造物での施工性評価

用した材料は、厚さ、幅がそれぞれ 20 mm、長さ 1000 mmに加工され、施工しやすいよう片面にシールが貼られたものを使用した。それぞれの設置状況を写真-5.18, 5.19 に示す。



写真-5.18 バックアップ材としてエラストイトを貼付



写真-5.19 バックアップ材としてスポンジゴムを貼付

<ステップ 4>

プレキャスト壁高欄設置

次にプレキャスト壁高欄の据付作業を行う。据付作業を行う前に、事前に製品同士を延長方向に連結する側面部には、底版部に使用したスポンジゴムのバックアップ材を写真-5.20のように貼り付けた。もう片方にはインサート部に横連結用のアンカー筋（D22長さ150mm）を取り付けた（写真-5.21）。



写真-5.20 側面部のバックアップ材の貼付け状況



写真-5.21 側面部のアンカー筋（D22）の取付け状況

製品の上部には製品が垂直に吊り上げられるように、重心位置に吊り上げ用の治具を取り付けるためのインサートを設置した。吊上げの状況を写真-5.22に示す。



写真-5.22 製品の吊上げ状況

クレーンで吊上げている状態で、底面側のインサートにアンカー筋（D22，長さ220mm）を取付た（写真-5.23）。



写真-5.23 底版部のアンカー筋の取付状況

製品の落とし込み設置では、床版側に配置したアンカー筋を挿入する穿孔部とプレキャスト壁高欄側に配置したアンカー筋が接触しないよう、写真-5.24に示すように慎重に誘導した。



写真-5.24 落とし込み設置状況

## 第5章 実構造物での施工性評価

完全にプレキャスト壁高欄を落とし込んだ状況を写真-5.25に示す。これを見るとスペーサがエポキシモルタル充填部の隙間を確保するための機能をはたしており、また20mmのバックアップ材（スポンジパッキン）が完全に潰れていることが確認できる。しかし、エラストイトの方はプレキャスト壁高欄を設置しても、ほとんど潰れず、スペーサが隙間確保の役目を果たさず、また設計上の10mmの隙間ではなく、20mmの隙間が空いてしまった。



写真-5.25 落とし込み設置完了

横連結部は、アンカー筋の干渉を避けるためには、橋軸方向の移動に制約があるのため、製品のアンカー筋側を、製品の溝側に落とし込む方法で設置した。設置の状況を写真-5.26に示す。



写真-5.26 横連結部の設置状況

<ステップ 5>

エポキシモルタルの充填作業

プレキャスト壁高欄が所要の性能を発揮するためには、本研究で提案する新しい工法において、アンカー筋が収まる開口部（ $\phi 50 \text{ mm}$ ）やプレキャスト壁高欄の底版部と地覆側の隙間、また壁高欄同士の横連結部の隙間に、エポキシモルタルが確実に充填され、しっかりと定着されることが不可欠である。これらの隙間に充填されるエポキシモルタルは、第4章までに基礎的研究を行ってきたファイラー50%混入のものを採用した。

充填作業は2.5m毎に注入口と排出口を設け、スクイーズ式の電動ポンプ（写真-5.27）を使用し行った。エポキシモルタルの充填作業は、0.7 $\text{l}$ /分程度の速度で充填し、床版部との接合面（延長2.5m）は約20分で終了した。途中、エラストイトをバックアップ材として使用している部分から、漏れが発生した。これはエラストイトが非常に硬く、床版部表面や、プレキャスト壁高欄の底版部の微少な凹凸に追随できず、隙間ができてしまったためと考えられる。一方スポンジゴムをバックアップ材として使用した方は漏れることはなかった。

充填作業の状況を写真-5.28に、施工完了時の状況を写真-5.29に示す。



写真-5.27 充填作業に使用したスクイーズ式ポンプ



写真-5.28 エポキシモルタル充填作業状況

<ステップ 6>

仕上げ，完成

最後に通りなどを確認し，吊り孔等をモルタル詰めして施工完了とした。



写真-5.29 施工完了

### 5.7 本章のまとめ

本章では、アンカーとエポキシ樹脂併用による新しい接合構造の実用化に向け、実構造物と同一の大きさの壁高欄供試体を作成し、橋梁部を模擬した基礎部を建設し、その基礎部にプレキャスト製壁高欄を設置する施工実験を実施し、以下の結果が得られた。

#### 1) 開口部の大きさ

プレキャスト壁高欄の底版部のアンカー筋は D22 で、穿孔する開口部は  $\phi 50$  mm である。アンカー筋の中心が、穿孔部の中心にある場合、最大左右に 14 mm の隙間があり（図-5.14）、今回の施工試験では、その隙間部分で、製品の寸法誤差、施工誤差、さらには、横連結部の製品同士の引き寄せも可能であることが確認できた。

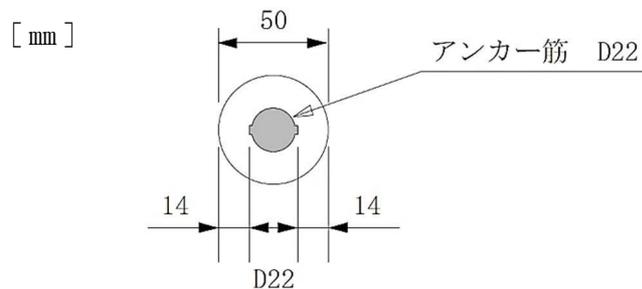


図-5.14 アンカー筋挿入部の隙間の状況

#### 2) バックアップ材

エポキシモルタルを充填する際のバックアップ材として、今回の施工試験では耐久性もありコンクリートの伸縮目地材として一般的に使用されているエラストイトと、モルタル漏れを防止するために使用されるスポンジゴムの2種類で比較を実施したが、エラストイトは非常に硬く、コンクリートの微少な凹凸を吸収することができず漏れが発生した。一方スポンジゴムは、寸法や硬度も自由に調節することが可能で、さらに追従性にも優れているため、コンクリート表面の凹凸を吸収し漏れの発生はなかった。よって本工法においては、バックアップ材としてスポンジゴムを使用することとする。

#### 3) エポキシモルタルの充填作業

エポキシモルタルは、充填材として一般的に使われている無収縮モルタルなどと比べ粘性が高い材料である。そのため、ポンプ注入する場合にも時間がかかることが予想された。1箇所あたりの施工に要した充填時間と、充填したエポキシモルタルの量を表-5.6に示す。これを見ると、エラストイトをバックアップ材として使用した供試体の方が、スポンジゴムをバックアップ材として使用し

## 第5章 実構造物での施工性評価

た供試体よりも、充填量、充填時間ともに増加していることが分かる。これは、エラストイトが固く、スペーサの厚みまで潰れなかったため、結果的にプレキャスト壁高欄と床版部との隙間の空間が大きくなったためであり、その分を考慮すると、全ての供試体で必要充填量は確実に充填されていることが確認できる。また充填時間も平均すると0.7~0.8分/分であった。

表-5.6 充填時間と充填量

供試体	バックアップ材	充填時間 (分)	充填量 (ℓ)
No.1	エラストイト	29	20.5
No.2		31	21.0
No.3		28	20.0
No.4	スポンジゴム	22	15.5
No.5		20	16.0
No.6		22	15.5

ここで、設計充填量は

- アンカー挿入部：φ50×240mm-D22×220 (mm)

$$\pi \times 25^2 \times 240 - \pi \times 11^2 \times 220 \times (10 \text{箇所}) \approx 3.87\ell$$

- プレキャスト壁高欄と床版部の隙間：400×2400×10 (mm)

$$400 \times 2400 \times 12 = 11.5\ell$$

- 合計：約15.4ℓ

### 4) 現場作業の省力化の評価

実構造物での試験施工における、全工程の作業時間を表-5.7に示す。

表-5.7 プレキャスト壁高欄設置の作業工程および作業時間

作業工程	作業時間 (分)	
	1基あたり	6基
ステップ°2 (墨出し)	8	48
ステップ°3 (バックアップ材, スペーサ取付)	10	60
ステップ°4 (プレキャスト壁高欄設置)	12	80
ステップ°4 (モルタル詰め)	30	180
ステップ°5 (エポキシモルタル充填底版部)	20	220
ステップ°5 (エポキシモルタル充填縦溝)	15	
ステップ°6 (仕上げ)	20	120
合計	115 (2h)	708 (12h)

※1 パーティ平均7人/日

## 第5章 実構造物での施工性評価

次に床版取替工事の一般的な橋長を考慮し、橋長 150m（壁高欄は橋梁の両側に施工するものとし、壁高欄施工延長 300mとする）を対象に、場所打ち壁高欄の標準的な施工工程（表-5.8）と、プレキャスト壁高欄の標準的な施工工程（表-5.9）の比較を行った。なお、今回の比較は床版部の施工が終了した時点から、壁高欄の施工を開始することを条件としている。

表-5.8 場所打ち壁高欄の作業工程<sup>5)</sup>

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
鉄筋組	■	■					■	■	■								
型枠組		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
生コン							■						■				
養生								■	■	■	■			■	■	■	■
脱型											■						■

※1 パーティ平均 10 人/日，2 パーティで施工

10 人×17 日間×2 パーティ≒延べ 340 人工

表-5.9 プレキャスト壁高欄の作業工程

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ステップ° 2	■				■												
ステップ° 3	■					■											
ステップ° 4		■	■				■	■									
ステップ° 5			■	■	■			■	■	■							
ステップ° 6					■	■				■							

※1 パーティ平均 7 人/日，2 パーティで施工

7 人×10 日間×2 パーティ≒延べ 140 人工

表-5.8 および 5.9 より、プレキャスト壁高欄の施工工程は場所打ち壁高欄に比べ 40%の工期の短縮に繋がり、また述べ人工は 60%削減できることが確認できた。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：車両用防護柵標準仕様・同解説，平成16年3月
- 2) 建設土木研究所道路部交通安全研究室，日本道路公団試験研究所他：高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書，平成10年6月
- 3) 高速道路総合技術研究所：設計要領第二集「橋梁保全編」，平成28年8月
- 4) 高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領，令和元年7月
- 5) DAK式プレキャスト壁高欄工法研究会：DAK式プレキャスト壁高欄「設計・施工ガイドライン」，平成29年3月

## 第 6 章

### 実構造物における接合構造の性能評価



## 第6章 実構造物における接合構造の性能評価

### 6.1 概説

第5章では実構造物における施工性評価を実施した。その際製作した供試体を使用し、本章ではプレキャスト壁高欄の接合構造の一体性の性能照査を実施するため、実車衝突荷重の結果より静的載荷に換算された衝突荷重による静的載荷試験と、設計要領第2集 橋梁保全編（令和元年7月）<sup>1)</sup>により算出した衝撃度を重錘により衝突角度90°で衝突させる衝突実験を行った。

### 6.2 静的載荷試験の実験概要

プレキャスト壁高欄の接合構造の性能試験には、静的載荷試験による試験方法は明記されていない。そのため本試験では、「高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書」<sup>2)</sup>と藤岡らの研究報告<sup>3)</sup>を参考に□200×200 mmの鋼製の載荷板を設置し、載荷能力250kN、および350kNの油圧ジャッキにより、実車衝突荷重の結果より静的載荷に換算された衝突荷重を水平方向に載荷した。なお載荷板とプレキャスト壁高欄の間には、製品の水平方向に均等に荷重が伝わるよう、プレキャスト壁高欄の全面勾配に合わせた硬度70のゴム板を設置し、油圧ジャッキは反力壁に専用の治具を取付け固定した。試験の概要を図-6.1に、載荷部の状況を写真-6.1に示す。

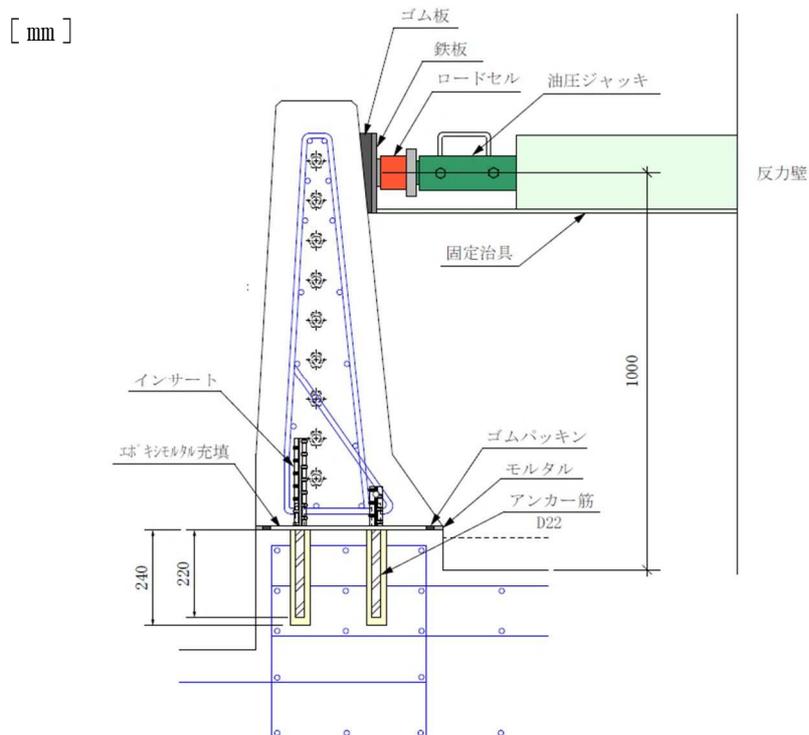


図-6.1 静的載荷試験の載荷部分の詳細図



写真-6.1 静的載荷試験の載荷部の状況

### 6.2.1 試験方法

静的載荷試験は全部で3種類実施した(表-6.1)。試験の概要を図-6.2に、試験の状況を写真-6.2, 6.3に示す。また試験は冬場の施工を考慮し、気温が比較的低い12月にエポキシモルタルを充填し、さらに充填後6日間養生した後に行った。その間の鹿児島県(鹿児島市)の気温の変化を表-6.2に示す。

表-6.1 静的載荷試験の種類

	載荷位置	橋軸方向の長さ
試験①	製品中央部	2500 mm
試験②	製品端部	2500+2500 mm
試験③	接合部近傍	2500+2500 mm

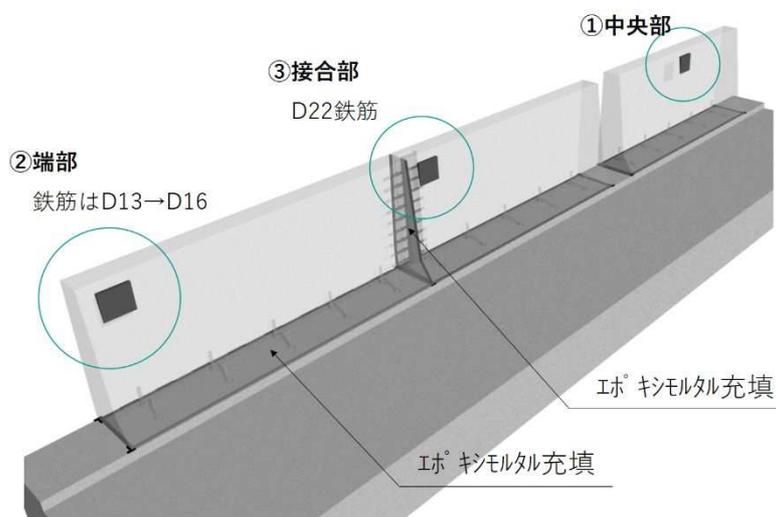


図-6.2 静的載荷試験の試験概要



写真-6.2 静的載荷試験の試験状況（正面側）



写真-6.3 静的載荷試験の試験状況（背面側）

表-6.2 エポキシモルタル養生時の鹿児島市の気温の変化

日付	12/6	12/7	12/8	12/9	12/10	12/11
最高気温(℃)	9.9	11.4	14.7	16.6	18.1	17.7
最低気温(℃)	7.9	5.4	3.2	5.3	6.3	9.9

<試験①>

試験①では、製品長さ2.5mの供試体の中央に荷重を載荷し、その際のアンカー筋やエポキシモルタルの挙動と床版部との接合構造の耐荷力を確認した。さらに静的載荷における外観変状を観察し、プレキャスト壁高欄の変位やひび割れ発生位置、寸法を記録し、さらに構成部材のひずみを計測した。試験①でのひずみと変位の測定位置を図-6.3に、載荷方法を図-6.4に示す。

また床版部とプレキャスト壁高欄の接合部の目地開きを確認するため、写真-6.4のように、 $\pi$ ゲージを供試体端部と中央部のそれぞれ正面側、裏側の全6箇所

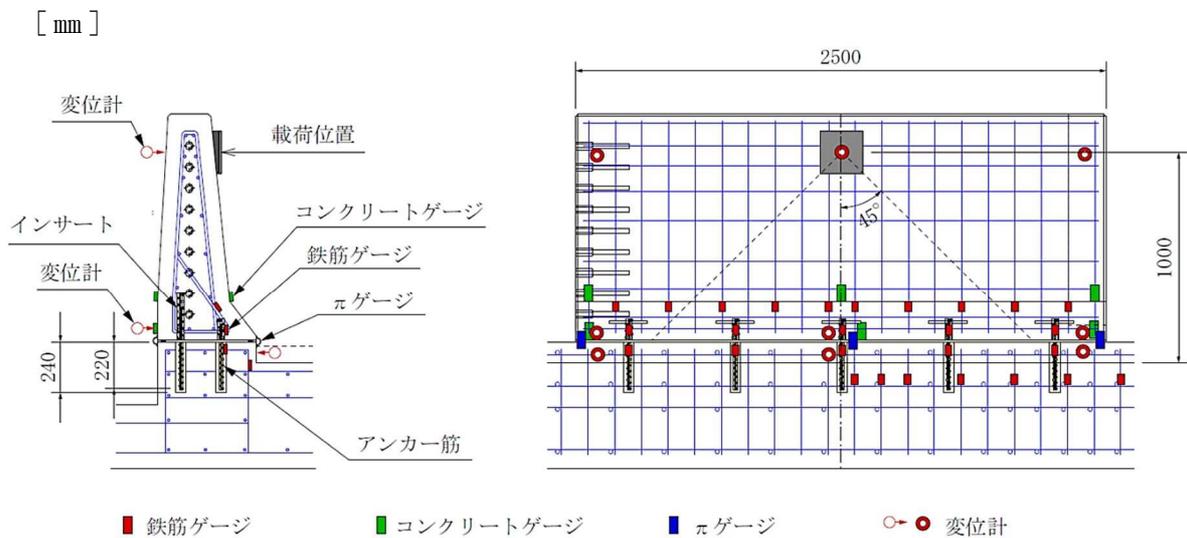


図-6.3 試験①の計測項目および測定位置

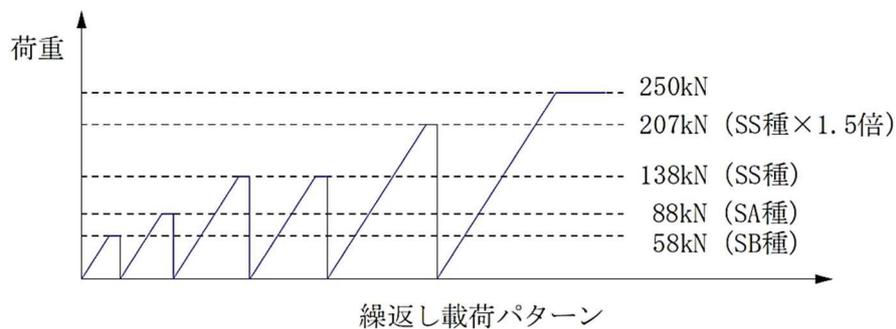


図-6.4 静的載荷試験の載荷方法



写真-6.4  $\epsilon$  ゲージの設置状況

< 試験② >

試験②では、プレキャスト壁高欄端部に荷重を載荷し、端部における変形性能とアンカーとエポキシが負担する有効幅を確認し、さらに試験①と同じように外観変状や構成部材のひずみを計測した。試験②でのひずみと変位の測定位置を図-6.5に、載荷方法を図-6.6に示す。

さらに、設計要領第二集 [橋梁建設編] より、端部 1m の範囲の鉄筋は主筋の径を 1 ランク上げることが記載されており、本試験の供試体も主筋を D16 としている。端部供試体の配筋図を図-6.7に示す。

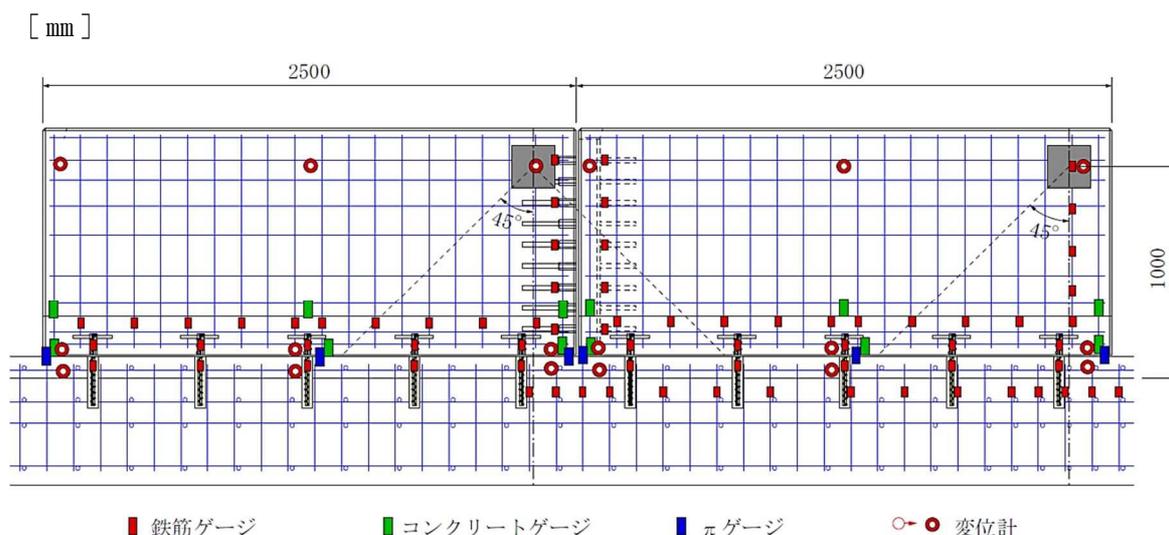


図-6.5 試験②, ③の計測項目および測定位置

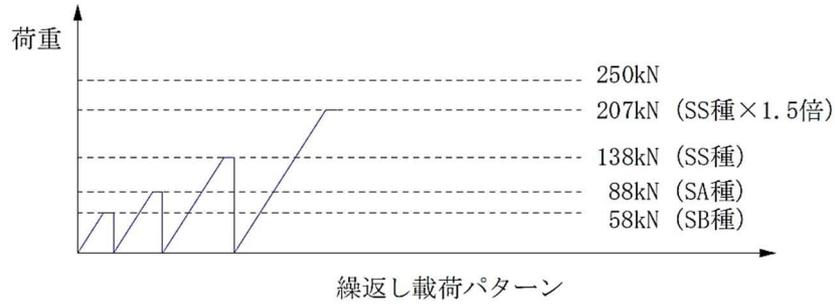


図-6.6 静的荷载試験の荷载方法

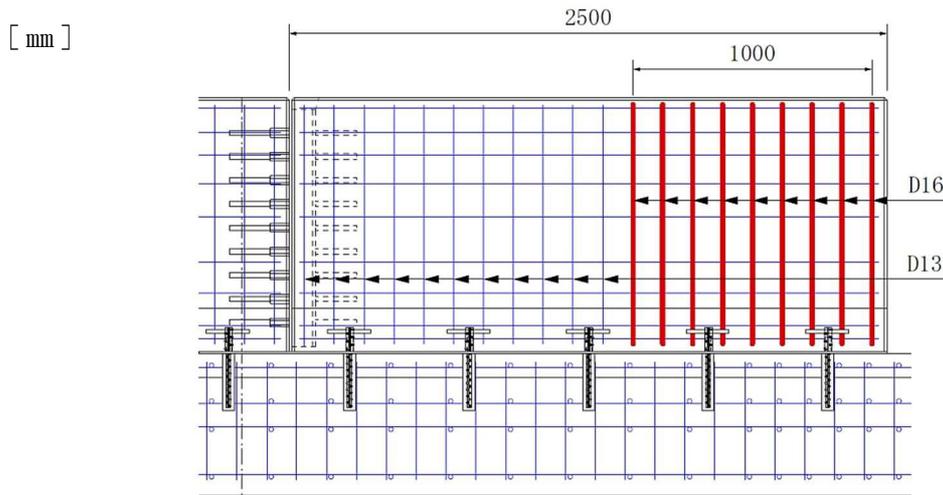


図-6.7 端部供試体の配筋図

< 試験③ >

試験③では、プレキャスト壁高欄同士の接合目地近傍に荷重を載荷し、橋軸方向に配置したアンカーとエポキシモルタルによる接合構造の一体性の評価を行った。さらにひび割れ以降の挙動を確認するため、350kNの油圧ジャッキを使用し、過載荷時における破壊性状を確認した。試験③でのひずみと変位の測定位置を図-6.5に、荷载方法を図-6.8に示す。

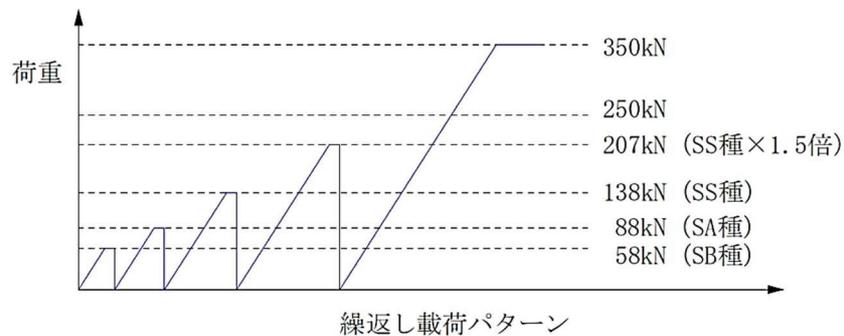


図-6.8 静的荷载試験の荷载方法

### 6.3 試験結果および考察

#### < 試験① >

試験①における静的載荷時のプレキャスト壁高欄の荷重-変位の関係を図-6.9に示す。その際の変位計の設置状況を写真-6.5に示す。これを見ると、載荷位置の背面側に設置した②の変位計の変位量が最も大きくなっていることが分かる。しかしSS種の衝突荷重（138kN）での水平変位量は0.28mmと小さく、またその他の変位計の測定結果も、最大で0.42mmと十分に小さい値であった。

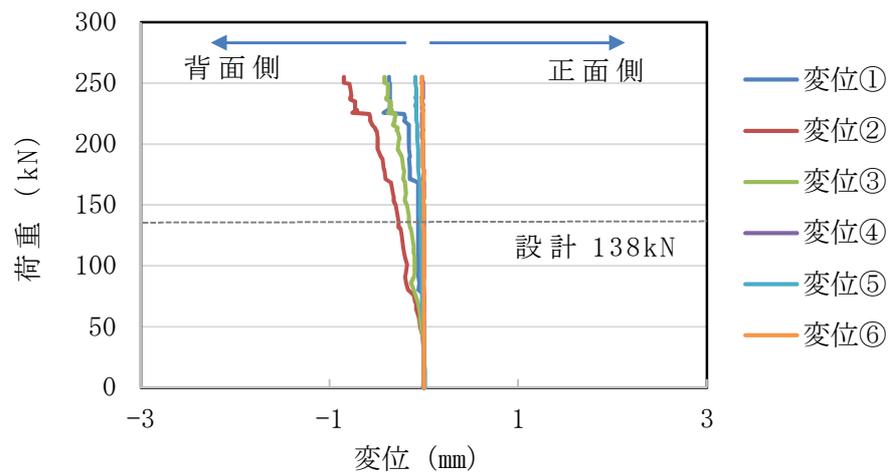


図-6.9 試験①での荷重-変位の関係



写真-6.5 変位計の設置状況

最初のひび割れは、SS種の衝突荷重のさらに1.6倍の約225kNの荷重を載荷した際に、プレキャスト壁高欄本体のフロリダ型形状特有の折れ点部分に、水平方向に発生した。その際、 $\pi$ ゲージにより確認した接合部の目地開きの最大値は0.023mmと非常に小さい値であった。その後250kNまで載荷を行ったが、供試体

のひび割れは水平方向に延びたが，他の部分でのひび割れは確認されなかった。ひび割れ展開図を図-6.10に示す。

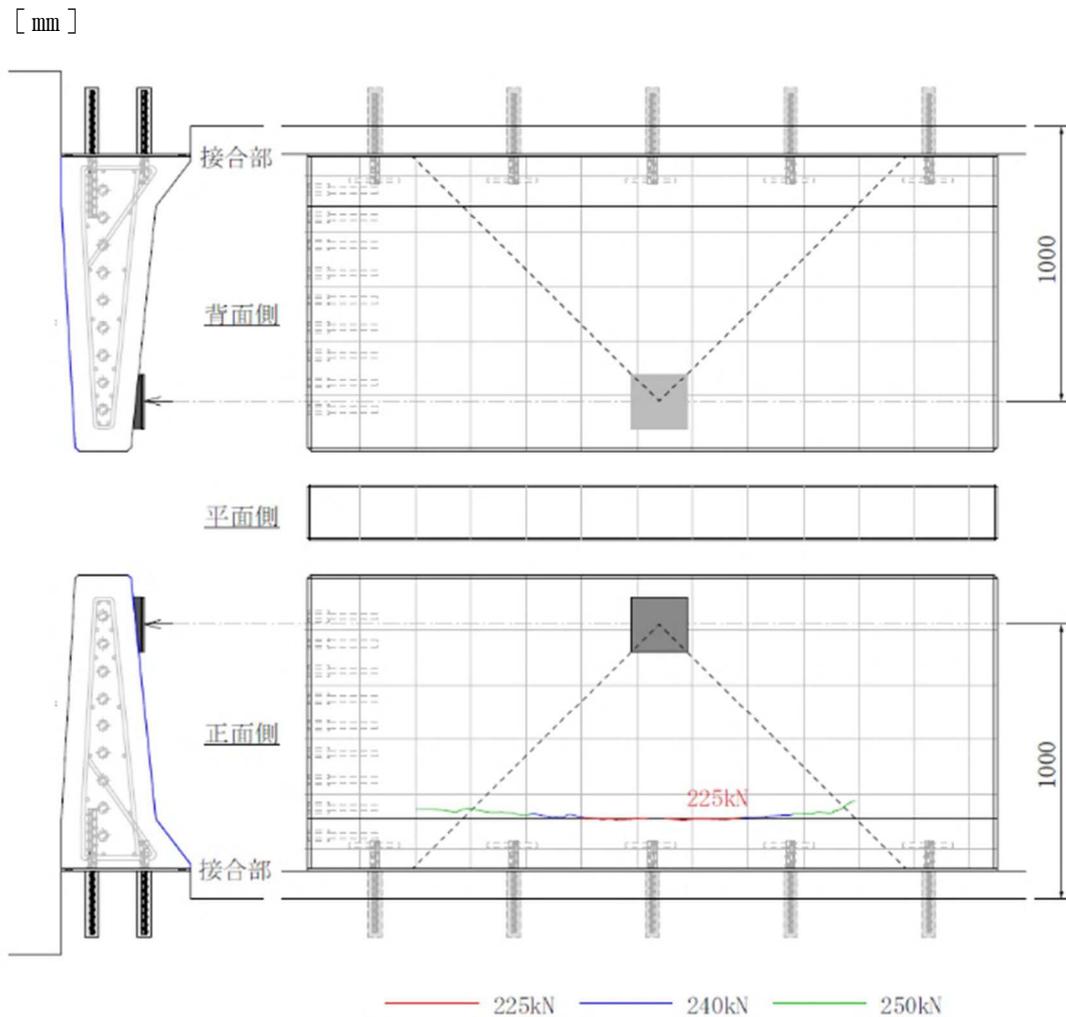


図-6.10 供試体のひび割れ展開図

次にプレキャスト壁高欄本体の主筋およびインサート，アンカー筋，地覆部の鉄筋の荷重-ひずみの関係を図-6.11，6.12，6.13，6.14に示す。またそれぞれのゲージ位置を図-6.15に示す。これらを見ると，どのひずみも載荷位置により近い製品中央部がもっとも大きく，端部方向に行くにしたがって低くなっていることが分かる。これらは全て同じ挙動を示しており，供試体全体で静的荷重に抵抗していることが分かる。また最大荷重（250kN）時に最も鉄筋のひずみが大きな値を示した位置は，床版の地覆部分の鉄筋で，これは第3章でのFEM解析による結果とも合致している。

またひび割れ発生時の約225kNの載荷時に，プレキャスト壁高欄の内部鉄筋，および地覆部の鉄筋ひずみが増加していることが分かる。これらの結果より，ひ

び割れ発生によってプレキャスト壁高欄の内部鉄筋に生じた引張力は、接合部を介して地覆鉄筋に伝達されており、接合構造の一体性が保持されていることが分かる。

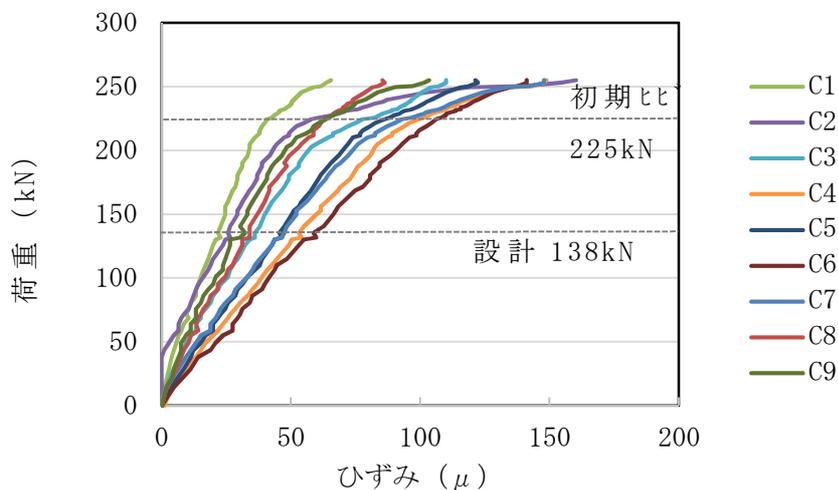


図-6.11 壁高欄内部鉄筋の荷重-ひずみの関係

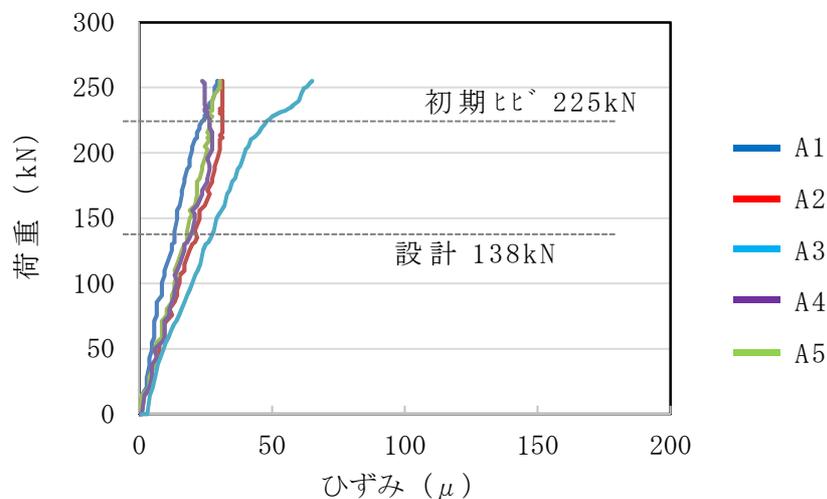


図-6.12 壁高欄内部インサートの荷重-ひずみの関係

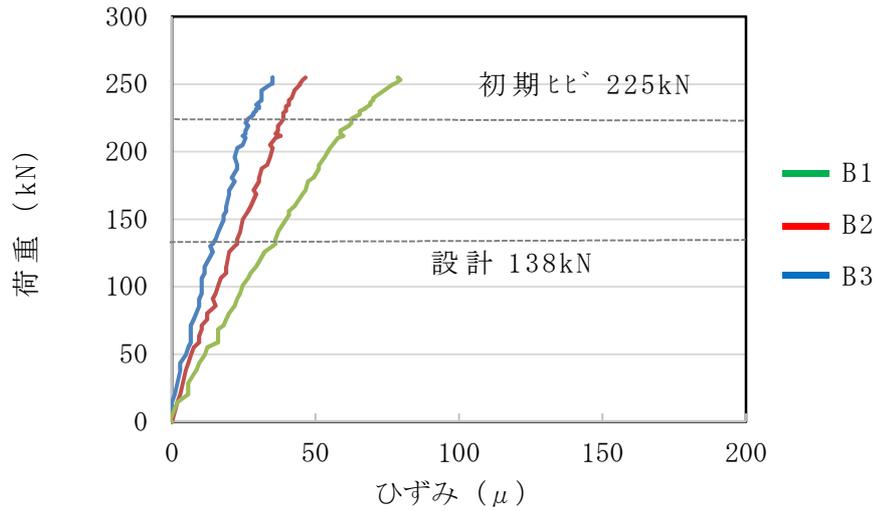


図-6.13 アンカー筋の荷重-ひずみの関係

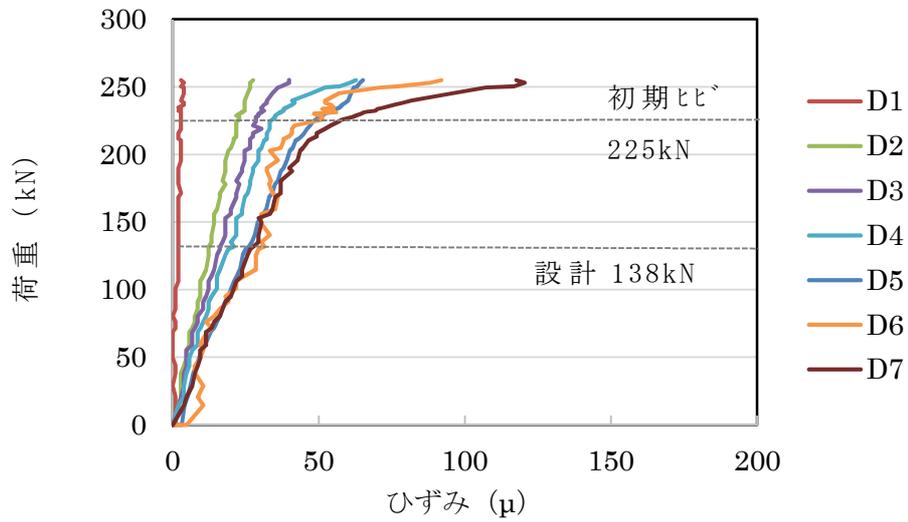


図-6.14 地覆部鉄筋の荷重-ひずみの関係

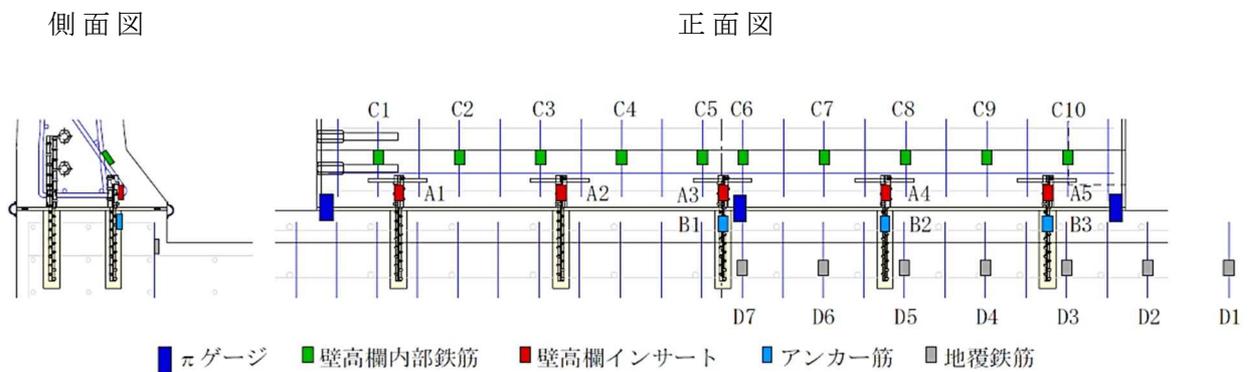


図-6.15 ひずみゲージの配置図（接合部近傍）

< 試験② >

試験②での最初のひび割れは 79.3kN の荷重を載荷した際に、試験①同様にプレキャスト壁高欄本体のフロリダ型形状特有の折れ点部分に水平方向に発生した。その際の、鉛直下部の接合部の目地開きの数値は 0.016 mm であった。その後設計荷重の 138kN まで載荷を行ったが、供試体のひび割れは壁高欄端部が水平および鉛直方向に変形するような、斜め 45 度方向の方向に延び、さらに 120kN 載荷時に載荷位置の真裏の背面側にも押抜きによるせん断ひび割れが発生した。ひび割れ展開図を図-6.16 に示す。

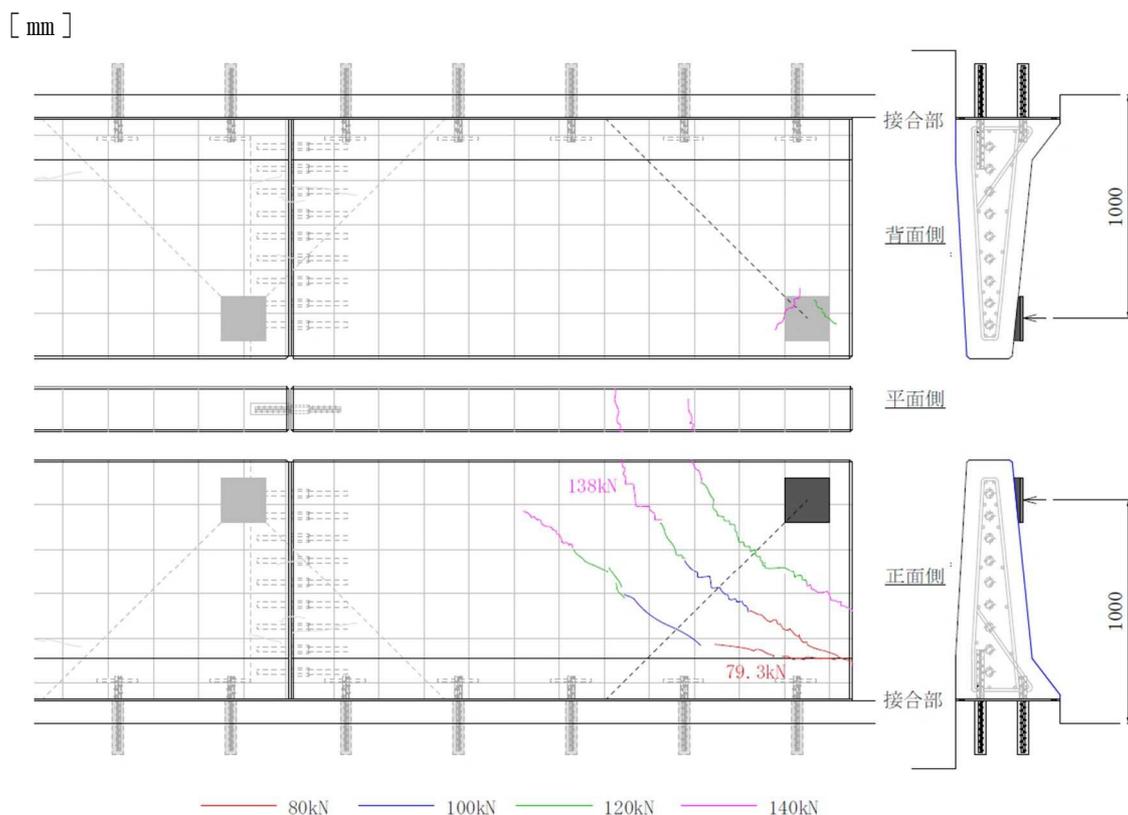


図-6.16 試験②の供試体のひび割れ展開図

次に静的載荷時のプレキャスト壁高欄の荷重-変位の関係を図-6.17 に示す。変位計の設置位置を図-6.18 に、設置状況を写真-6.6 に示す。これを見ると、試験①同様に正面側載荷位置（端部）の背面側に設置した①の変位計の変位量が、載荷荷重 110kN を過ぎたあたりから大きくなっていることが分かる。またその最大変位量は SS 種の衝突荷重換算値である 138kN の載荷時で、2.52 mm であった。また次に変位量が大きな値を示しているのは、①の変位計から水平方向に約 1200 mm 離して設置した②の変位計であり、その次に変位量が大きな箇所は①の変位計から鉛直下部の接合部に設置した⑥の変位計であった。それ以外の変位計の値は、最大でも 0.2 mm 以下と小さく接合部の剛性は保持されていた。

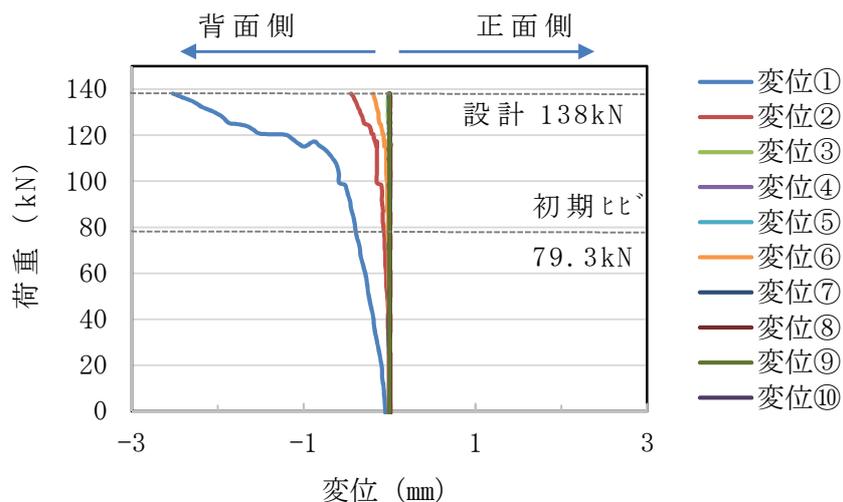


図-6.17 試験②での荷重-変位の関係

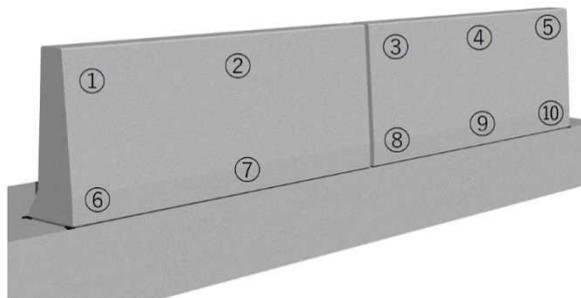


図-6.18 変位計の設置位置 (背面側)



写真-6.6 変位計の設置状況

プレキャスト壁高欄本体の主筋および載荷位置鉛直方向の鉄筋，インサート，アンカー筋，地覆部の鉄筋の荷重-ひずみの関係を図-6.19，6.20，6.21，6.22，

6.23 に示す。またそれぞれのゲージ位置を図-6.24 に示す。これらを見ると、試験①と同様に、どのひずみも載荷位置により近い、製品端部がもっとも大きく、中央方向に行くにしたがって低くなっていることが分かる。これらは地覆部の鉄筋を除くと同じ挙動を示しており、プレキャスト壁高欄本体と接合部のみで静的荷重に抵抗していることが分かる。また地覆部の鉄筋のひずみは設計荷重の 138kN の載荷時でも、最大で  $66.3\mu$  と小さいが、これは試験①の結果より、地覆部の鉄筋のひずみが大きくなるのは、225kN を過ぎたあたりであったことから、静的荷重に対してこの時点では、地覆部の鉄筋には引張応力がほとんど発生していないためであると考えられる。

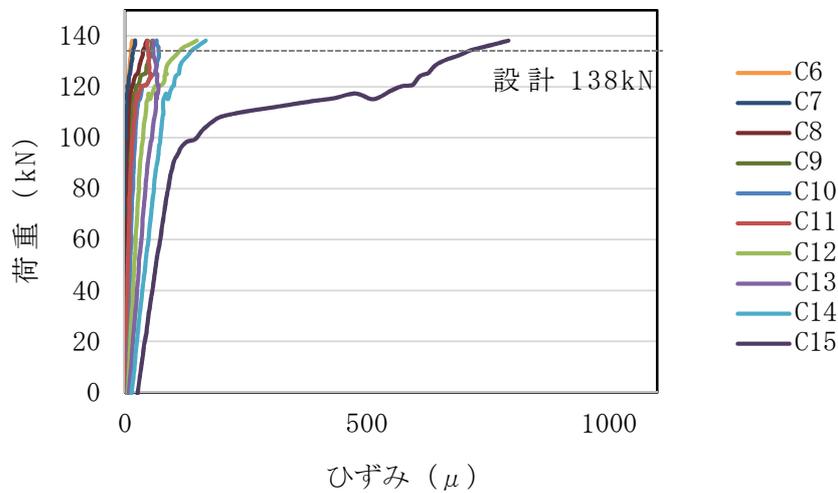


図-6.19 壁高欄内部鉄筋（水平方向）の荷重-ひずみの関係

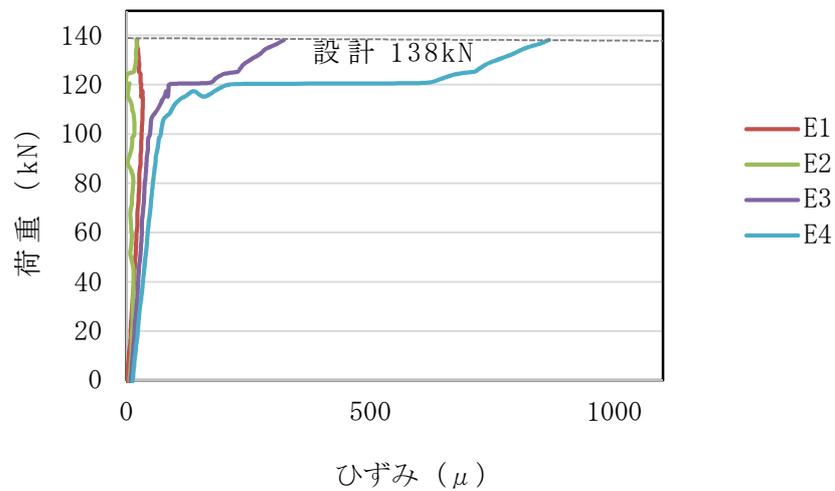


図-6.20 壁高欄内部鉄筋（鉛直方向）の荷重-ひずみの関係

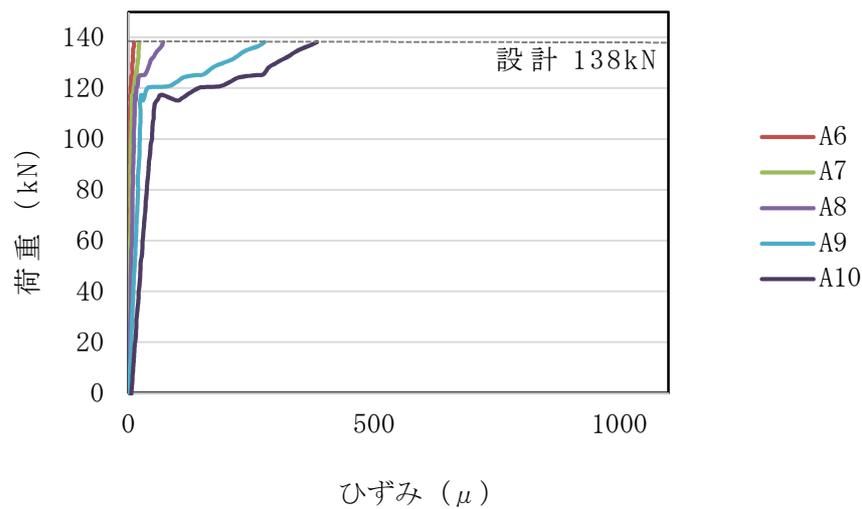


図-6.21 壁高欄内部インサートの荷重-ひずみの関係

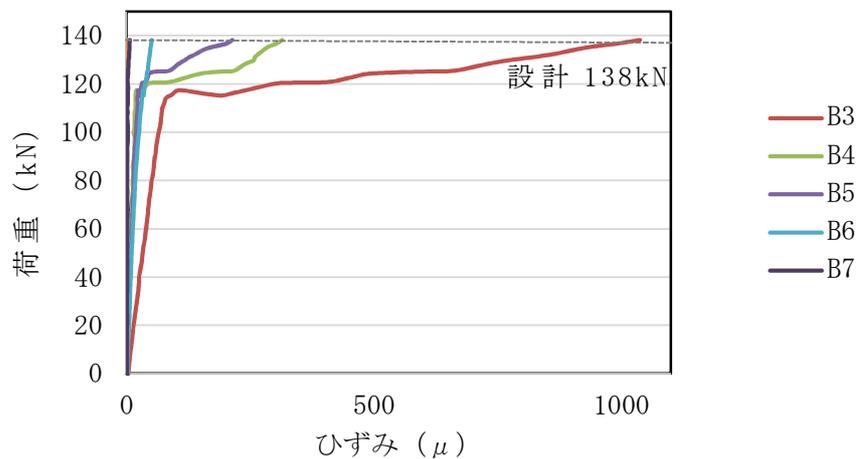


図-6.22 アンカーの荷重-ひずみの関係

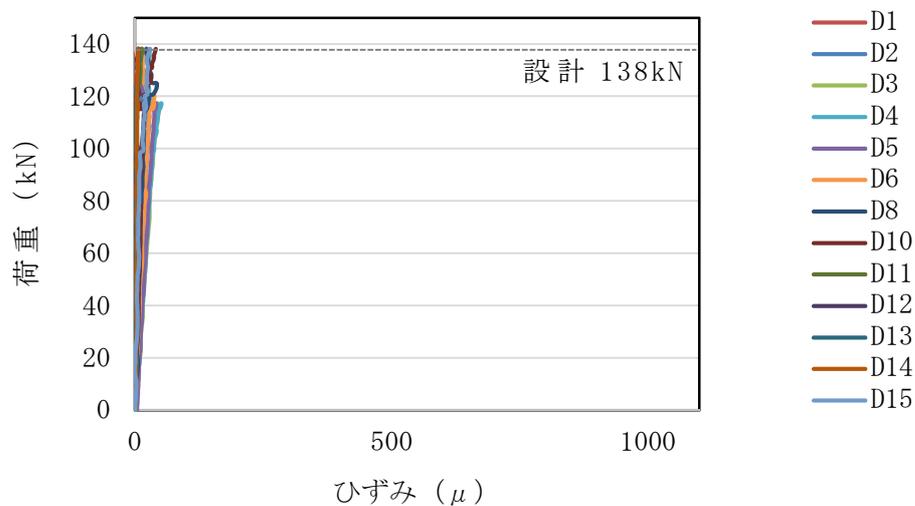


図-6.23 地覆部鉄筋の荷重-ひずみの関係

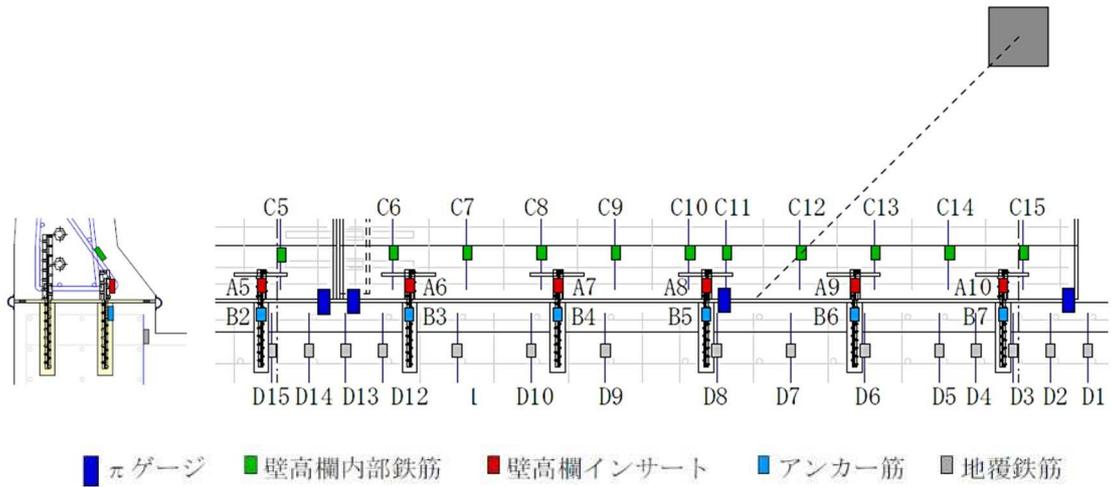


図-6.24 ひずみゲージの配置図（接合部近傍）

設計荷重載荷時において、鉄筋の発生応力度は全て許容応力度以下であり、さらに接合部の目地開きも載荷位置の鉛直下部で0.57mm,その他の接合部では0.1mm以下とごく微量であり、構造上の安全性は確保されている。しかし端部に関しては壁高欄本体の鉄筋量を約2倍配置するよう仕様規定化されており、接合部のアンカーについても、1mの範囲で2倍にするなど、補強することが望ましいと判断する。

試験③

試験③における静的載荷時のプレキャスト壁高欄の荷重-変位の関係を図-6.25に、変位計の設置位置を図-6.26に示す。

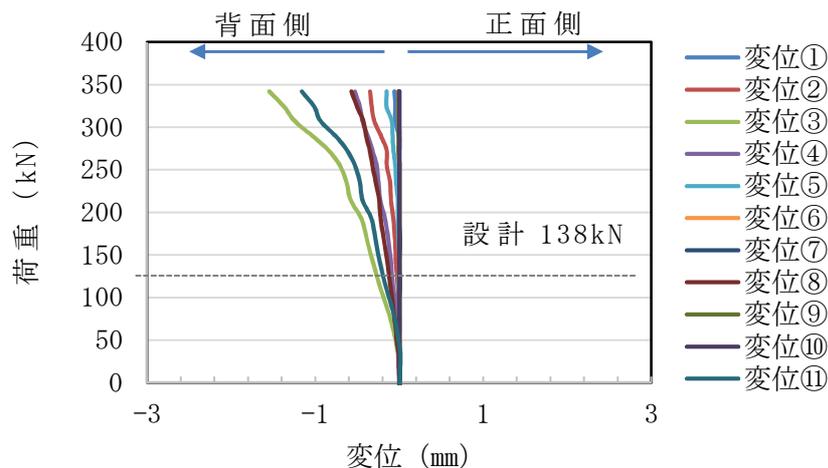


図-6.25 試験③での荷重-変位の関係

試験③においても、これまでの試験同様に載荷位置の背面側に設置した③の変位計の変位量が最も大きく、その値はSS種の設計荷重時(138kN)で0.31mm,

最大で 1.55 mm であった。次に大きな値を示しているのは、⑪に設置した変位計で、その値は設計荷重時（138kN）で 0.23 mm，最大で 1.16 mm であった。③の変位量に比べ少ない値を示しているが、これはエポキシモルタルのヤング率がコンクリートよりも低いことに起因していると考えられ、変位曲線は同一の軌跡を示していることから、静的荷重に対して、横連結部を介して隣接する壁高欄と一体となって抵抗していることが分かる。

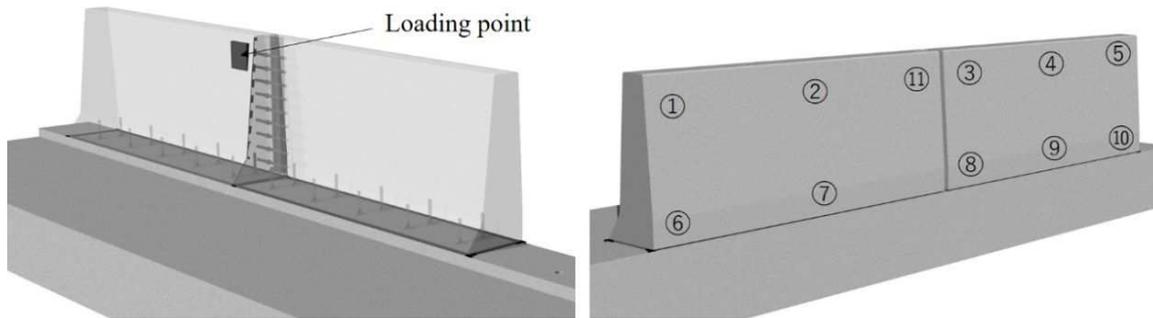


図-6.26 変位計の設置位置

次にひび割れ展開図を図-6.27 に示す。最初のひび割れは、設計荷重の約 1.3 倍の 178kN の荷重を載荷した際に、試験①，②同様にプレキャスト壁高欄本体のフロリダ型形状特有の折れ点部分に水平方向に発生し、さらに載荷面の真裏の背面側にも発生した。

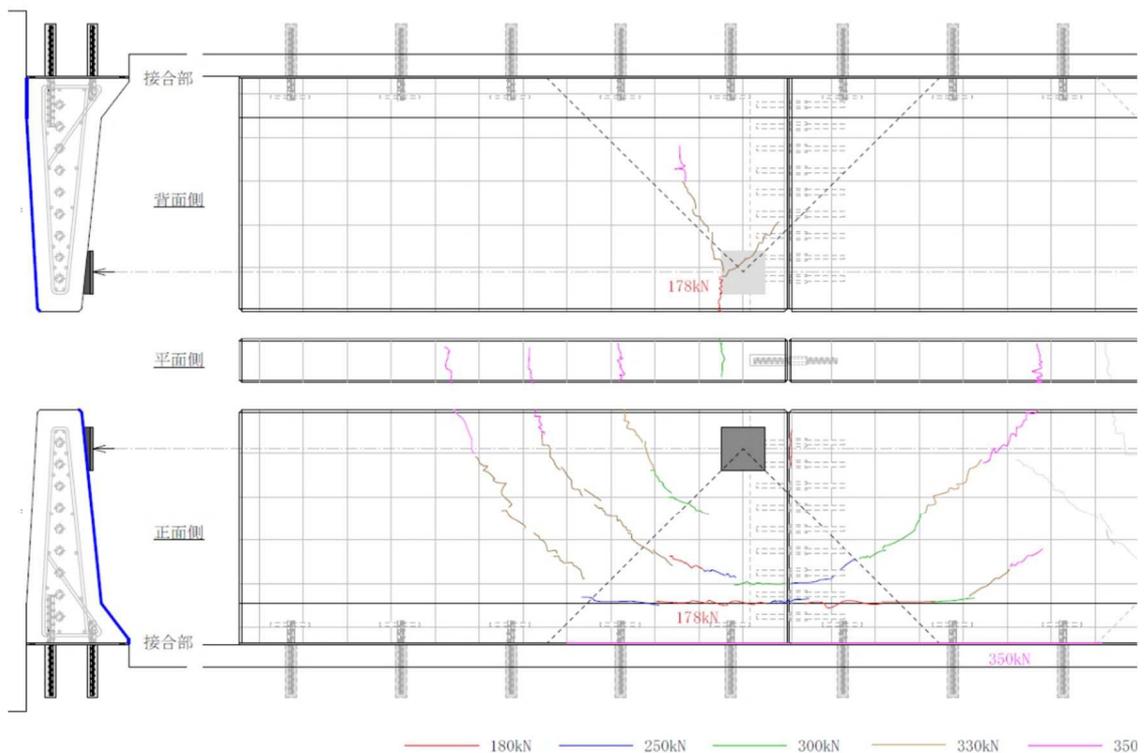


図-6.27 試験③の供試体のひび割れ展開図

その際の荷重位置の鉛直下部での接合部の目地開きは、0.14 mmと小さい値であった。その後ひび割れは荷重点より45度方向の分布線に対し直角方向にほぼ左右対称に入り、350kN付近で壁高欄天端部に到達した。このことから静的荷重により一方の壁高欄に生じた引張応力は、横連結部を介して隣接する壁高欄に伝達されており、横連結部においても接合構造の一体性は十分に確保されていることが分かる。また背面側は押抜きせん断によるひび割れが確認された。

次にプレキャスト壁高欄本体の主筋およびインサート、アンカー筋、地覆部の鉄筋の荷重-ひずみの関係を図-6.28, 6.29, 6.30, 6.31 に示す。またそれぞれのゲージ位置を図-6.32 に示す。これらを見ると、試験①, ②同様に、どのひずみも荷重位置により近い横連結部近傍がもっとも大きく、両端部に行くにしたがって低くなっていることが分かる。これらは試験①同様に、全て同じ挙動を示しており、床版との接合部、また横連結部を含めた供試体全体で静的荷重に抵抗していることが分かる。また設計荷重以下の挙動は全て線形であり、弾性領域であることも分かる。

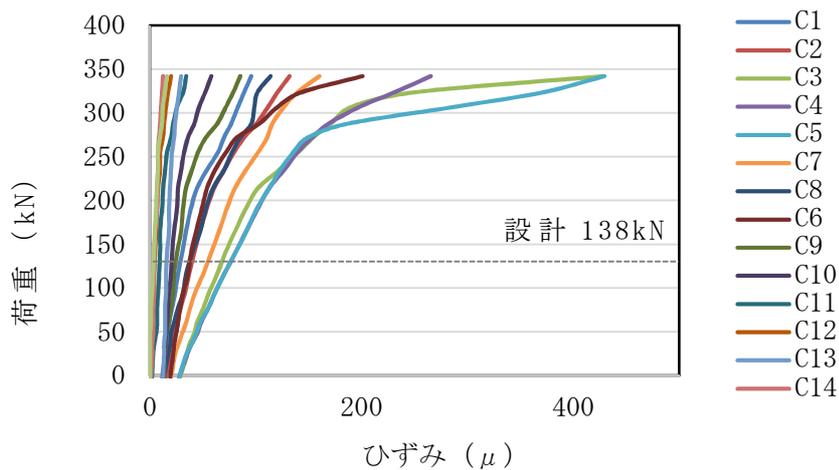


図-6.28 壁高欄内部鉄筋（水平方向）の荷重-ひずみ

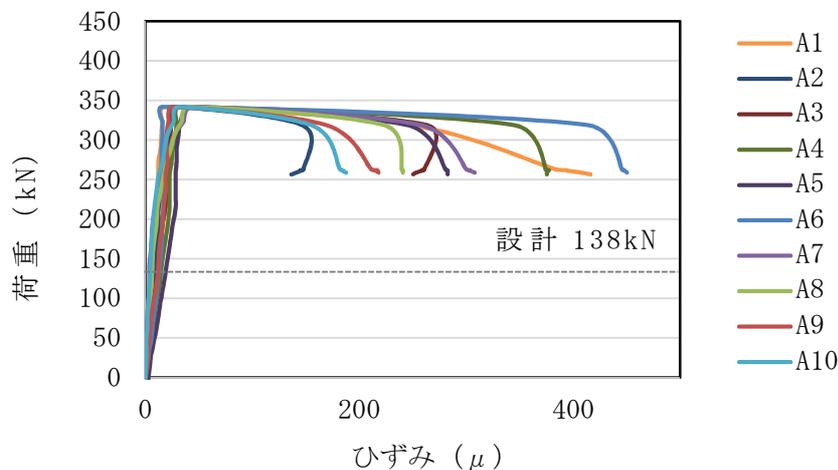


図-6.29 壁高欄内部インサートの荷重-ひずみ

第6章 実構造物における接合構造の性能評価

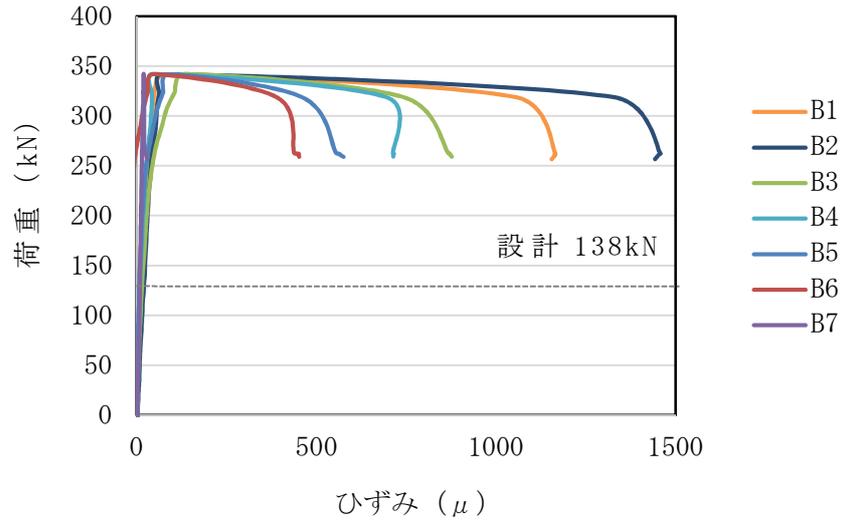


図-6.30 アンカー筋の荷重-ひずみ

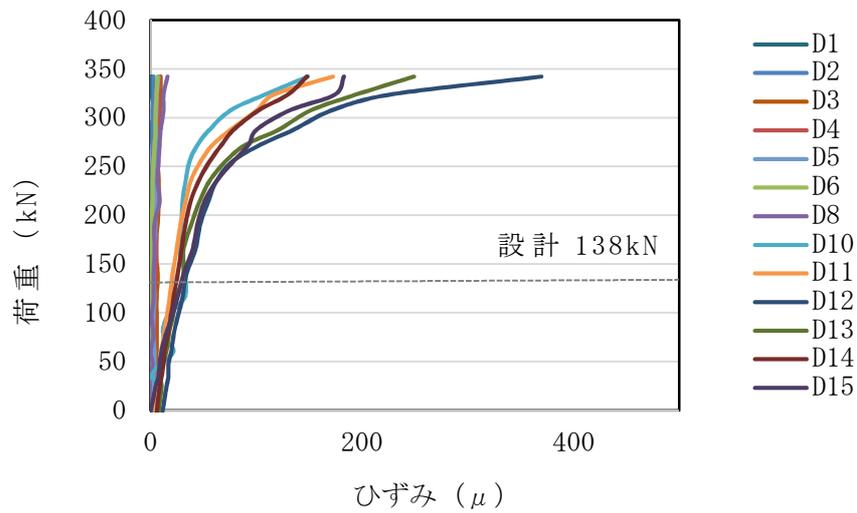


図-6.31 地覆部鉄筋の荷重-ひずみ

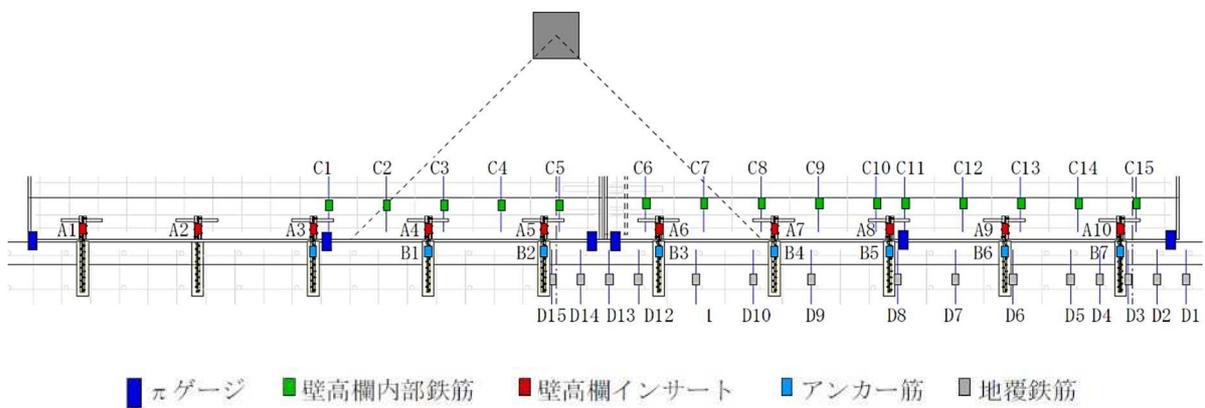


図-6.32 ひずみゲージの配置図（接合部近傍）

SS 種の設計荷重（138kN）を載荷した際の内部鉄筋の応力は約  $76\text{N}/\text{mm}^2$  であり，また地覆部の鉄筋の応力は  $88\text{N}/\text{mm}^2$  と十分小さい値であった。壁高欄内部に設置したインサートと地覆部に挿入したアンカーの応力は，どちらも最大で  $9\text{N}/\text{mm}^2$ ， $16\text{N}/\text{mm}^2$  とさらに小さい値を示している。これはエポキシモルタルの接着力が応力を負担していることによるもので，設計荷重に対しての安全性は十分確保されていると言える。

その後，設計荷重の約 2.5 倍にあたる 350kN の荷重を載荷した際に，接合部のエポキシモルタルとコンクリートとの間で界面破壊が発生し，その瞬間アンカーのひずみが最大で  $1440\mu$  に達した。ひずみが最大であったのは，載荷位置の鉛直下部にあるアンカーで，そのアンカーを中心に左右に配置されたアンカーに沿って徐々にひずみが小さくなる結果であった。このことから供試体全体で静的荷重に抵抗していることが確認できる。

今回の試験は，冬場の施工を想定し，12月にエポキシモルタルを注入し，6日間養生した後に静的載荷試験を行ったが，より構造安全性を高め，地覆部や壁高欄の内部鉄筋の降伏以上の剛性を持たせるために，外気温に応じた適切な養生期間を定め，施工マニュアル化することが望ましいと判断する。

次に横連結部の内部インサートおよびアンカー筋の荷重-ひずみ曲線を図-6.33, 6.34 に示す。またひずみゲージの設置位置を図-6.35 に示す。これらを見るとどちらのひずみの値も十分に小さく，約 300kN までの静的荷重に対しては，エポキシモルタルの接着力のみで抵抗していることが分かる。

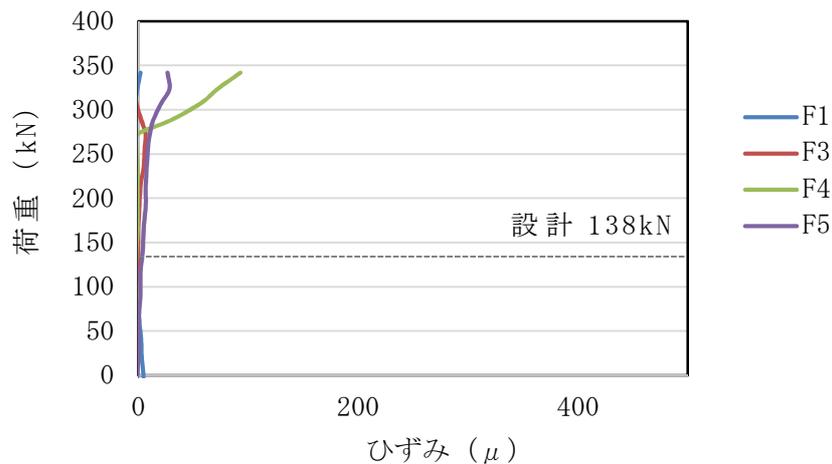


図-6.33 横連結部のインサートの荷重-ひずみの関係

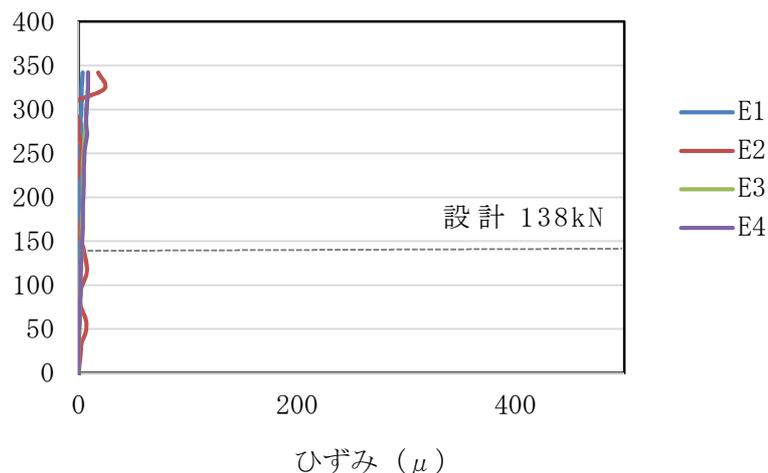


図-6.34 横連結部のアンカーの荷重－ひずみの関係

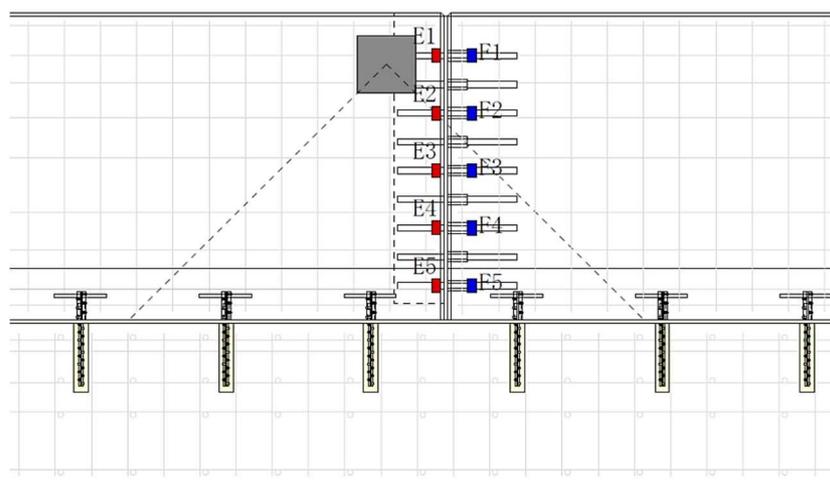


図-6.35 試験③での横連結部のゲージ位置図

これらの試験の結果より，本接合構造は設計荷重載荷時において，RC 部材として要求される耐荷性能を十分に有していることが確認できた。さらにエポキシモルタルの優れた接着性能により，設計荷重載荷時の壁高欄の変位量は 1 mm 以下，その際の接合部の目地開きは 0.1 mm 程度とごくわずかで，車両衝突時に発生すると予想される壁高欄の破損，変形を最小限に抑えることが可能であり，高い耐久性を有する構造であると言える。

### 6.3 重錘衝突試験の実験概要

プレキャスト壁高欄の接合構造の性能試験方法（試験法 441-2018）<sup>4)</sup>に基づき，重錘による衝突試験を実施した。なお載荷位置は壁高欄の天端から 300 mm とし，衝突部には緩衝材を取付け，試験を実施した。

6.3.1 試験方法

試験は、表-6.3 に示す衝突条件にて実施し、衝突試験における外観変状を観察し、ひび割れ発生状況を記録した。この場合の重錘の落下高さは、運動エネルギーと位置エネルギーの等価の法則で計算し、式 6.1 を用いて落下高さを算出した。試験の概要を図-6.37 に示す。

表-6.3 衝突条件

衝突条件	種別	衝突直前のエネルギー (kJ)	衝突角度 (度)
設計荷重相当	SS	6.5	90
	SA	4.2	
	SB	2.8	
	SC	1.6	

$$6.5 \text{ (kJ)} = m \times g \times h \quad \text{(式 6.1)}$$

ここに、m：重錘の質量 (5.3t)、g：重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)、h：落下高さ (m)

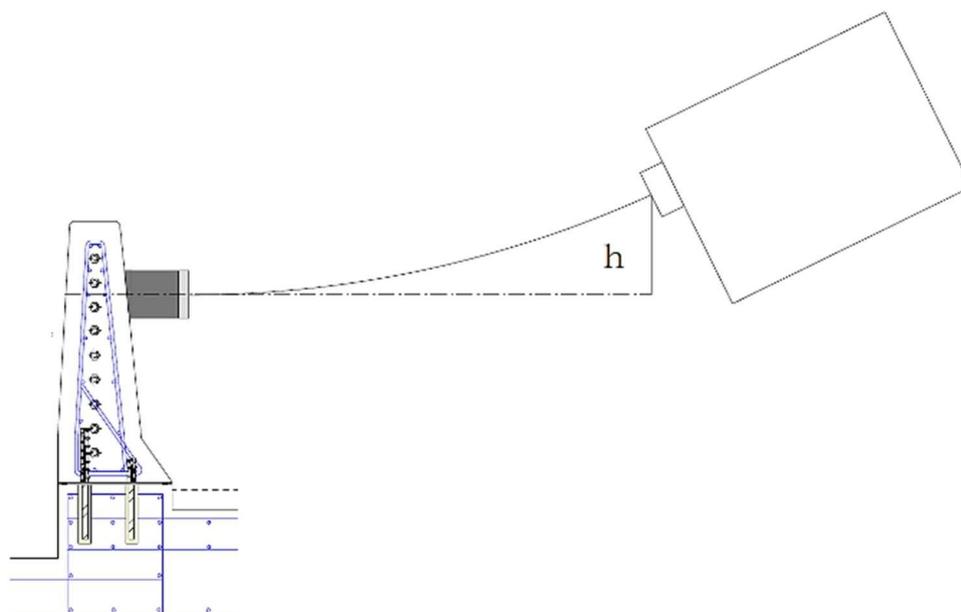


図-6.36 重錘衝突試験の概要図

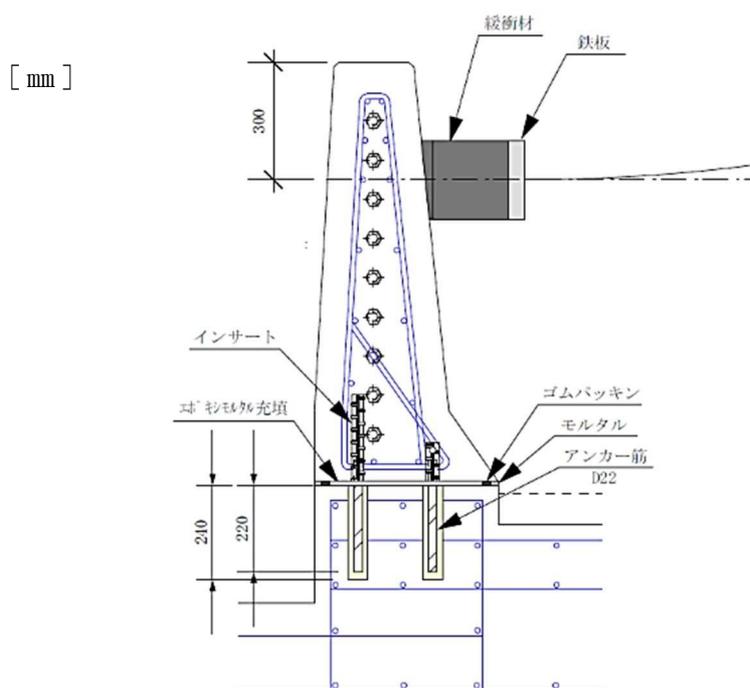


図-6.37 重錘衝突試験の概要図

### 6.3.2 試験結果および考察

試験の結果を写真-6.7, 6.8に示す。プレキャスト壁高欄と床版の接合部及びプレキャスト壁高欄同士の接合部の安全性について、以下の結果を得た。



写真-6.7 床版との接合部の状況



写真-6.8 横連結部の状況

- ①プレキャスト壁高欄と床版との接合部の界面の開きについては、写真-6.7に示すように、目視の限り確認できなかった。

②プレキャスト壁高欄と床版の接合部においては、写真-6.8に示すように、壁高欄同士の接合部（スポンジパッキンを目隠しするための仕上げモルタル）に、微細な縦ひび割れ（0.08mm）を観測した。

以上の結果より、床版との接合部及び壁高欄同士の橋軸方向の接合部には、衝突荷重による有害な損傷は無く、重錘衝突試験によるプレキャスト壁高欄の安全性に問題はないと判断する。

#### 6.4 本章のまとめ

プレキャスト壁高欄の中央部，端部，接合部の3箇所にて静的載荷試験を実施したが，床版部との接合部，及び製品同士の横連結部はいずれも設計荷重載荷時には目地開きやひび割れは観測されず，また構成部材のひずみ，さらには水平変位測定による評価においても，十分な構造安全性を有していることを確認した。さらに重錘による衝突試験の結果からも，衝突による動的な荷重に対しても有害なひび割れや目視による目地開きは確認されず，構造安全性に問題はないことが確認できた。

<参考文献>

- 1) 高速道路総合技術研究所：設計要領第二集「橋梁保全編」，令和元年7月
- 2) 建設土木研究所道路部交通安全研究室，日本道路公団試験研究所他：高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書，平成10年6月
- 3) 藤岡泰輔，内堀裕之，三加崇，永元直樹：拡径鉄筋を接合構造に用いたプレキャスト壁高欄の開発
- 4) 高速道路総合技術研究所：NEXCO 試験方法（第4編）「構造関係試験方法」，令和元年7月

## 第 7 章

### 結論



## 第7章 結論

高度成長期（1955～1973年）に建設された道路構造物は、全橋梁数の約40%、全トンネル数の約25%を占めており、これらの多くは近い将来、更新あるいは大規模な改修時期を迎えると予想されている。しかしながら、生産年齢人口の減少による労働力不足、財源の不足、人口の一極集中というかつてない社会構造の変化の中で、良質な社会資本を次世代に継承することは極めて困難な課題である。また、現状の補修技術は、劣化部の撤去・断面修復や鉄筋の防錆処理、表面の被覆など、あくまで延命対策の域を出ず、恒久対策と呼べるものは少ない。

これらの背景を踏まえ本研究では、建設労働力の不足、熟練工の経験と知識に頼りがちな現場作業の標準化、工期短縮などに寄与できる技術としてプレキャスト化に着目した。ここで言うプレキャスト化とは、現場打ちコンクリート構造物を解体撤去し、プレキャスト製品で新設するという意味ではなく、高コストな作業にも関わらず、煩雑で品質のばらつきが大きく、効果の検証が難しい維持補修分野にプレキャスト部材の適用を図ることを意味する。

しかし現在、プレキャスト製品の維持更新需要への適用は、あくまで老朽化したプレキャスト製品の交換という形で行われることが多く、現場打ちで建設されたインフラ構造物の部分的補修、部材単位の交換、長寿命化というような目的で使用されることは少ない。これは、多品種少量生産に不利であるというプレキャスト製品の特徴に起因すると考えられるが、道路橋の壁高欄のように、同一形状が連続する線状構造物では、接合方法の改良などにより、老朽化した現場打ちコンクリートの交換用部材としてプレキャスト部材を利用できるものと考えた。

そこで本研究では、プレキャストコンクリートの維持補修分野での適用を目的とし、既存のコンクリートとの一体化を図る方法として、鉄筋が障害とならないアンカー工法の検討、アンカーの本数削減を目的としたエポキシ樹脂とアンカーを併用する新しい工法を提案し、その構造安全性を評価すべく、各種の性能評価試験を実施した。その結果各章で得られた知見は、以下の通りである。

### 第2章「エポキシ樹脂の特性について」

#### <高温環境下における疲労特性>

温度60℃、湿度80%の環境下で、エポキシ樹脂とモルタルの接合面は200万回疲労後も破壊することなく、また動弾性係数にも変化がなかった。疲労後の供試体と疲労前の供試体との曲げ強度の結果より、200万回疲労後も、エポキシ樹脂は高い接着性能が維持されていることが確認できた。

### < 接着強度 >

エポキシ樹脂の接着力は、フィラーを混入した場合においても、コンクリートの引張強度よりも高いことが確認できた。また、混入率が高くなるほど見かけの引抜耐力が上がっているが、これはエポキシ樹脂自体の硬化収縮による内部応力により、コンクリート表面に引張力が働いたためであると考えられる。それに対し無収縮モルタルとコンクリートとの接着力はとても低く、エポキシ樹脂のように、引抜耐力を負担させることはできない事が確認できた。

### < 圧縮強度 >

エポキシ樹脂にフィラーを混入すると、圧縮強度は未混入のものに比べ約36%低下した。また、フィラーを混入率0%の供試体では、破壊形態は高分子材料特有の降伏を示さずに破壊する脆性型の破壊であるのに対し、フィラーを50%混入した供試体の破壊形態は、降伏後の塑性領域で破壊することを確認した。

### < 内部収縮 >

フィラー混入率0%の樹脂は、著しい温度上昇、降下に伴う膨張、内部収縮が見られることや、可使時間が他の樹脂に比べ20分程度短いことから、現場での使用には適さないと判断する。フィラー混入率25%、50%の樹脂に関しては硬化収縮量、可使時間はほぼ同程度であったが、反応温度には約25℃の差が見られ、フィラー混入率の増加に伴い反応温度を抑えられることが分かった。

### < 充填性能と粘性 >

フィラー混入率50%のエポキシ樹脂は適度な粘性（充填時の漏れやポンプ注入作業の容易さ）があり、充填に関しても空気を巻込むことなく、隅々まで確実に充填されていた。

これらの結果より、エポキシ樹脂にフィラーを混入することで硬化収縮率を大幅に低減できることが確認できた。また作業性や充填性能などを考慮すると、その混入率は全体容積の50%が最も適していた。

## 第3章「エポキシ樹脂とアンカー併用による効果検証」

アンカー径や定着長さ、エポキシ樹脂の厚みや接着面積を様々に変化させて、アンカーとエポキシ樹脂併用による効果の検証を行ったが、いずれの試験でもアンカーのみの場合に比べ、アンカーとエポキシ樹脂を併用することで、引抜耐力が増加することが分かった。さらにエポキシ樹脂の接着面積を増やす

ことで、コンクリートとの付着力が増加し、結果的にコンクリートのコーン破壊部の体積が増加することを確認した。これらの結果はアンカーの埋め込み深さを長く取れない場合、また本数を多く取れない場合などにおいて、必要耐力を確保するために有効な手段である可能性を示唆している。

### 第4章「模擬供試体による接合部の構造性能評価」

#### < 静的載荷試験 >

静的載荷試験で提案する工法の構造性能を確認した。3種類の供試体を用いて、比較を行ったが、エポキシ樹脂とアンカーを併用した場合には、破壊荷重が他の供試体と比較して高いという結果が得られた。応力伝達については、100kNあたりまではエポキシ樹脂の接合部が、100kN以降はアンカーも応力を受け持ち、最終的にコーン破壊に至ることが確認できた。また破壊の状況を確認すると、第3章の「3.3 アンカーの引抜試験（その1）」の引抜試験による効果検証の結果と同様に、コーン破壊の円錐の角度が緩やかになっており、併用による効果が模擬供試体においても確認できた。

無収縮モルタルとアンカーを併用した場合には、接合部に充填した無収縮モルタルは応力をほぼ受け持たず、アンカーのみが荷重に対する応力を受け持ち、最終的にコーン破壊に至ることが確認できた。これはコンクリートと無収縮モルタルの付着力が脆弱であるためであり、本工法でのアンカーの応力負担を接着力で補う目的としては、使用は現段階では難しいと言える。

エポキシ樹脂のみの場合については、最大荷重到達直後のエポキシモルタルとコンクリートとの接着面近傍における、コンクリートの脆性的な凝集破壊であり、制御破壊の観点より、アンカーとの併用が望ましいと考えられる。

#### < 200万回の疲労耐久性試験 >

200万回の繰返し載荷による疲労試験を行い構造性能の評価を行ったが、繰返し載荷で供試体が破壊することはなく、高い疲労耐久性を示した。200万回の繰返し載荷後に行った静的載荷試験による供試体の破壊荷重は、無疲労試験体と比較して24%低下したが、繰返し載荷後の荷重と変位の関係、また接合部のエポキシモルタルのひずみが無疲労状態と変化していないことから、低下した原因はアンカー近傍のコンクリートの疲労亀裂の進展により、最終耐力が減少したためと考えられる。これらの結果より、本工法で使用するエポキシモルタルは、繰返し荷重に対し、高い疲労耐久性を持つ材料であると言える。

### 第5章「実構造物での施工性評価」

床版取替工事の一般的な橋長を考慮し、橋長 150m（壁高欄は橋梁の両側に施工するものとし、壁高欄施工延長 300mとする）を対象に、場所打ち壁高欄の標準的な施工工程と、プレキャスト壁高欄の標準的な施工工程との比較を行った。その結果、プレキャスト壁高欄の施工工程は、場所打ち壁高欄に比べ 40%の工期の短縮に繋がり、また述べ人工は 60%の削減が可能である事を確認した。

### 第6章「実構造物における接合構造の性能評価」

プレキャスト壁高欄の中央部，端部，接合部の 3箇所にて静的載荷試験を実施し、構造安全性の確認を行ったが、床版部との接合部，及び製品同士の横連結部はいずれも設計荷重載荷時には目地開きやひび割れは観測されず，また構成部材のひずみ，さらには水平変位測定による評価においても，本研究で提案するエポキシとアンカー併用による新しい接合構造は，十分な安全性を有していることを確認した。さらに重錘による衝突試験の結果からも，衝突による動的な荷重に対しても有害なひび割れや，目視による目地開きは確認されず，構造安全性に問題がないことを確認した。

上記の知見より，本研究で提案した工法は，新旧部材の一体化技術として，今後の維持保全分野において，壁高欄を含むプレキャストコンクリート製品を活用するための接合工法として，十分に適用が可能であると評価できる。

また，本工法は，現場打ちコンクリート工法と比較して，現場作業の標準化や工期短縮が容易であるため，今後，益々深刻化すると予想される建設労働力の不足や熟練工の離職などの問題を克服する手法のひとつとして有効であるとともに，橋梁の改修工事において顕著な生産性の向上が期待できる技術であると考えられる。

特に本工法は，その採用により，床版厚が薄いためにアンカーの埋込み深さを長くとれない，既存の鉄筋が障害となりアンカー本数を増やせない等，既存橋梁の改修工事において発生しやすい設計・施工上の困難を克服できるケースが少なからずあると見込まれることから，鉄筋コンクリート構造物の長寿命化，ひいては安全で快適な社会資本を維持保全するという社会的需要に対して大きく貢献することが可能な技術とも考えられる。

また，本工法はプレキャスト床版と組み合わせることで，維持・補修工事だけではなく新設橋梁の施工時にも大幅な生産性向上が期待でき，活用の方はさらに広がることが予想される。

本研究において提案したアンカーとエポキシ樹脂の併用による耐力向上法は，その用途を壁高欄に限定されるものではないが，本論文は，プレキャスト壁高欄

## 第7章 結論

への適用が可能であることを確認するという所期の目的を達成した現時点において帰結とする。

今後は、本工法の実構造物における施工経験を重ねることにより、その諸性能について知見を深めるとともに、壁高欄以外への用途拡大、さらには機械施工による完全無人化施工なども視野に入れ、研究を進めていきたいと考える。



## 謝辞

本論文は、(主査) 武若耕司教授、(副査) 山口明伸教授、(副査) 審良善和准教授、(副査) 酒匂一成准教授のご指導のもと鹿児島大学大学院理工学研究科総合理工学専攻建設システム工学講座コンクリート研究室において取りまとめたものです。

主査である武若教授には、本論文の執筆にあたり終始適切な助言を賜り、またお忙しい立場でありながら、熱心なご指導を頂きましたことに深く感謝申し上げます。私が今の会社に入社して初めてコンクリートという素材に係るようになってから、先生のお名前をいろいろな所で拝見するようになり、そのことは鹿児島大学の卒業生として、誇りに思うところでありました。その頃はまさか自分が先生のもとで、学位を取るための指導を受けられるとは夢にも思っていませんでした。今こうして論文を執筆し、主査のところに先生のお名前を記載できることをとても嬉しく、そして誇らしく感じております。

また学生にとっても厳しく、少し怖い先生だと勝手な想像をしておりましたが、その本当のお人柄に触れ、たくさんの人を引き付ける魅力を理解する事が出来ました。先生に学会での発表練習の際に言われた「自分の家族に説明するように、普段その研究に関わっていない一般の人達にも解りやすく伝えられる、そういったプレゼンを目指してください」という助言は、これからの研究人生、また仕事においてもとても大切なご指導となりました。本当に3年間ありがとうございました。

副査である山口教授には、ゼミの際にはいつも明晰かつ厳密に、そして丁寧で温かいご指導を頂きまして、深く感謝しております。また研究以外の仕事上でのご相談に対しても、試験の進め方や考察の方法など、細部にわたるアドバイスを頂きました。心より感謝致します。今後はまた企業の研究員として、様々な依頼をお願いすることになるかと思いますが、これまでのように多くのご指導とご助力を引き続きお願いできれば幸いです。

副査である審良准教授には、本研究を行うにあたり、研究計画から実験の遂行まで様々な部分でサポート頂き、また実験を進めるにあたり、多くのアドバイスを頂いたことに深く感謝致します。特にインフラテック始良工場での静的載荷試験の際には、寒い中夜遅くまで実験に立ち会ってくださり感謝の念が絶えません。それから北海道での学会の際には、私が、北海道が初めてだったこともあ

り、美味しいジンギスカンのお店をご紹介頂き、共にお酒を飲んで研究の話や、学生さんの話をさせて頂きました。私もとても楽しく、おいしい料理とお酒を飲むことで良い気分転換が図れました。本論文の研究において、多大なるご指導を賜りましたことに深く感謝いたします。本当にありがとうございました。

副査である酒匂准教授には、ゼミの際にはいつも、ご専門である土質の分野の専門的知見から、するどいご指摘を頂き本当にありがとうございました。先生のお陰で、論文の内容にも深みを増すことが出来たと思います。そして私にとって何にも替え難い貴重な財産となりました、心より感謝申し上げます。

鹿児島大学助教である小池先生には、学位の申請書類の書き方や、出張時の手続きなど、分からない事をいろいろと教えて頂きました。またハワイでの国際学会の際には同行して頂き、初めての国際学会で緊張する私を気遣い、いろいろと励ましてくれました。本当にありがとうございました。また先生に誘って頂いて、学会の空いた時間に「日立の木」を見に行けた事は、私にとってとても貴重な経験であり、今でも大切な良い思い出となっております。本当にありがとうございました。

技術職員の前村様には、供試体の準備や大型試験機を用いての実験など本当にお世話になりました。会社に入社した当時から、実験ではいろいろとお世話になっていましたので、既に20年以上お付き合いさせて頂いておりますが、社会人として大学に入学した際には、前村さんには気軽に声をかけさせてもらう事ができました。装置の使い方などを訪ねても、いつも快く、優しくご指導頂きましたことを本当に感謝致します。ありがとうございました。

同じく技術職員の種田様にも、本研究での供試体の設置や、試験のお手伝いなど、大変お世話になりました。特に実物大の静的載荷試験の際には、本当に寒い中、遅くまで試験に立ち会って頂きまして、心より感謝申し上げます。お忙しい中、厳しい要求にも難なく応えてくださり本当に助かりました。ありがとうございました。

また現在オリエンタル白石株式会社に勤めている福永和生君には、博士前期課程2年の時に実験を手伝って頂きました。供試体が重量物であったにも関わらず、いつもスムーズに実験が行えたのも、福永君が普段からトレーニングマシンで筋肉を鍛え上げていたためで、本当に助かりました。またその筋力にも関わらず、細かいところにも気遣いができ、困っていたらいつも力になってくれました。プライベートでも一緒にスポーツジムに行ってもらい、トレーナーをやっ

てもらい、いまだに私も時間があいたらトレーニングを続けていますが、全て福永君のお蔭です。私より大分年下でしたが、本当に尊敬できる人でした。是非いつか今回の研究と一緒に実験を行ったプレキャスト壁高欄を、実際の橋梁工事で一緒に施工できる日が来ればと思います。その時は宜しくお願い致します。

現在西部ガス株式会社で働いている大貝麻梨子さんにも、学部4年生の時に一緒に研究を行い、いろいろな面で助けてもらいました、ありがとうございました。賢くて几帳面で、またいつも笑顔で、大変な実験作業も大貝さんがいてくれるだけで雰囲気明るくなり、とても楽しく行えました。努力を怠らず、いろいろな事を学んで吸収し成長していく姿には、いつも感心させられていました。試験データも完璧にグラフ化してくれたおかげで、今回の論文執筆を無事終了することが出来ました。今は社会人1年目ですが、すでに第一線で活躍されていることと思います。いつか本当に共同研究などで一緒に仕事ができれば幸いです。それまで私も、大貝さんに負けないよう日々努力を重ねたいと思います。

鹿児島大学博士前期課程2年の赤塚創太君は、本当に気が利いて、いつも頼りになる存在でした。実物大モデルでの静的載荷試験では、ゲージや変位計などの測定項目が多く、大量のデータを記録する必要がありましたが、赤塚君がいてくれたお蔭で無事に測定を終えることが出来ました。これから社会人に進むと思いますが、どんな企業に入っても活躍できる素晴らしい能力を持っている人材だと思います。あと一年、学生生活が残っていますが、とても賢い赤塚君ですので、是非本論文の研究をさらに進めて、より高い技術へと確立してくれる事を期待しております。

鹿児島大学4年生の坂本茉奈美さんは、苗字が同じ坂本という事と、さらには軽音楽サークルの後輩（私はだいぶ先輩にあたりますが）という事もあり、すごく親近感を感じながら、いつも実験をさせてもらいました。赤塚君との二人のコンビは、見ていてとても温かい気持ちにさせてもらいました。来年から社会人ですが、細かい配慮と気配りが上手な坂本さんですので、どんな職場でも活躍できると思います。もし実務の中で壁高欄の工事がある時には、自分の研究した製品がありますと、積極的にPRして使ってください。その時はまた一緒に仕事をしましょう。本当に1年間ありがとうございました。

また構造物診断技術研究会の白澤様や、山住君をはじめとするコンクリート研究室の多くの学生の皆様には、寒い中夜遅くまで実験に立ち会って頂き、またいろいろなところで協力を頂きました。そのお蔭で本論文を無事完成させるこ

とができました。本当にありがとうございました。

今回仕事をしながら研究を遂行し、本論文の執筆に至ることができたのも、インフラテック株式会社の社員の皆様のお蔭です。本入学を快く受け入れて頂いた松崎秀雄社長、松崎慎太郎副社長には、いつも励ましのお言葉を頂き、大変感謝しております。また現在同社開発課で新商品の開発を行っておりますが、社会人ドクターである私に対して、論文執筆を業務の一環として、快く受け入れて頂いた中須課長、森山係長、島主任、ドゥルバ研究員に感謝申し上げます。

中須課長には、壁高欄の供試体の製造時に、工場経験を生かしたアドバイスを頂きました。森山係長は現場施工での卓越した技術を、試験施工の際に発揮して頂き助けて頂きました。島主任には、研究全般を通し多くのサポートと励ましを頂き、本当にいろいろな面で助けて頂きました。ありがとうございました。ドゥルバ研究員は、実験の準備やデータ整理、また英訳や国際学会の発表練習など多くの支援を頂きました。また開発課ではありませんが、入佐次長には、遅くまで実験を手伝って頂き、また試験施工の際にもいろいろと準備をしてもらい、本当に助けて頂きました。込山部長には、研究の初歩の段階から数多くのアドバイスと助言を頂き、ありがとうございました。それから、総合技術研究所の技術課の皆様、FRC工場、始良工場の皆様、そして、工事課の皆様には、繁忙期の忙しい中、壁高欄の試作や、施工作业をお手伝い頂き、心より御礼申し上げます。

またその他にも材料供給や施工をお手伝い頂いた取引先の皆様を含め、本研究に関わって頂きました全ての方々に、感謝の意を表したいと思います。皆様のご協力なくしてこの研究は遂行し得ませんでした。日頃からご指導、ご支援、ご厚意頂き心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

最後にこれまで自分の思う道を進むにあたり、温かく、辛抱強く見守ってくれた最愛の家族に対し深い感謝の意を表し、謝辞と致します。

2020年3月

坂本 和也