

論文 実橋への適用に向けたエポキシモルタルとアンカー固定による PCa 壁高欄の性能評価

尾立 華菜^{*1}・審良 善和^{*2}・坂本 和也^{*3}・Katpady Dhruva Narayana^{*4}

要旨：老朽化が問題となっている壁高欄の取替えには、プレキャストコンクリート（以下、PCa）を使用することが生産性を高める方法として有効な手段の一つであるが、床版との接合において、施工性の向上および要求性能の確保が困難という課題がある。そこで、開発されたエポキシモルタルとアンカーで PCa 壁高欄を固定する方法の実橋適用に向け、衝突実験を行った。その結果、エポキシモルタルは十分な充填性および付着性を有し、衝突後の壁高欄が要求性能を満足していることから、エポキシモルタルとアンカーで固定した PCa 壁高欄の実橋への適用は可能であると考えられる。

キーワード：壁高欄、取替え工事、プレキャストコンクリート、エポキシモルタル、アンカー、耐衝突性

1. はじめに

壁高欄は橋から人や車両の落下を防止するための防護柵として非常に重要な部材であり、特に高速道路や跨線橋、跨道橋など、丈夫な構造が必要な場合に設けられる。しかし、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おり、橋梁に設置される壁高欄に関しても同様である。これらの老朽化した構造物は補修・更新などの維持管理をしていく必要があるが、技術者の不足や維持管理にかけられる予算の不足などの課題がある。特に高速道路に関しては、補修・更新に伴い交通規制を必要とするため、交通渋滞も懸念される。

そこで注目されているのが PCa コンクリートである。特徴として、工場内で製造することにより、自然環境の影響を受けずに高品質で均一な部材を製造でき、現場での工期短縮や省力化が期待できる。また、壁高欄のように同一形状が連続する構造物の場合は、型枠を繰返し使えることでコスト削減に繋がり、コンクリート工の生産性を高める手段として有効¹⁾である。国土交通省では、建設現場の生産性向上を図る「i-Construction」という取り組みを推進しており、PCa コンクリートはその優位性が注目され導入促進が進められている。

しかし、現状では PCa 壁高欄は接合部の性能確保が難しいという課題を抱えており、既存の床版の厚さや強度不足からアンカーの引抜強度が十分に得られず、さらには既存の鉄筋が障害となり所定の位置にアンカーを挿入できないといったケースが発生している。

このような中で、エポキシモルタルによる接着およびアンカーによる固定により既存の躯体と PCa 壁高欄を一体化させる工法が開発された²⁾。この工法は、アンカー

に要求される引抜耐力の一部をエポキシモルタル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込み長さを低減することができる。

そこで本研究では、この工法の実橋適用に向け、より信頼性の高い技術として確立すべく、実施工を想定した供試体を製作し、エポキシモルタルおよびアンカー固定による壁高欄の施工性および耐衝突性を評価する実験を行った。

2. PCa 壁高欄の施工

2.1 供試体概要

本試験では、実橋における高速道路での施工を想定し、SB 種³⁾の壁高欄を使用した。図-1 に壁高欄の概要を示す。鉄筋径は D13 の異形鉄筋 (SD345) を使用し、アンカーは 500mm ピッチでの配置を基本として、壁高欄端部においては耐荷力が低下するため、端部から 875mm までは鉄筋径を D16 に、アンカー筋の配置を 250mm ピッチに変更した。かぶりは 70mm とした。

前面側のアンカー筋は、かぶり確保の観点から定着長を長くとることができないため、D35 の異形鉄筋に $\phi 16\text{mm}$ の孔を開け、そこに D13、長さ 150mm の異形鉄筋を結束線で固定したインサートを使用した。また、背面側のアンカーは、D22、長さ 220mm のインサートを使用した。それぞれのインサートには、床版に壁高欄を据付け前に、D22、長さ 275mm (ねじ長さ 45mm) の異形鉄筋を取り付けた。なお、本試験では、施工時の付着不良が衝突に及ぼす影響を評価するため、アンカー筋の下端から 110mm の部分にビニールテープを巻き付けた。

図-2 に床版部の概要を示す。床版部においては、地

*1 鹿児島大学 工学部先進工学科海洋土木工学プログラム (学生会員)

*2 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 インフラテック株式会社 総合技術研究所 博士 (工学)

*4 インフラテック株式会社 総合技術研究所 博士 (工学) (正会員)

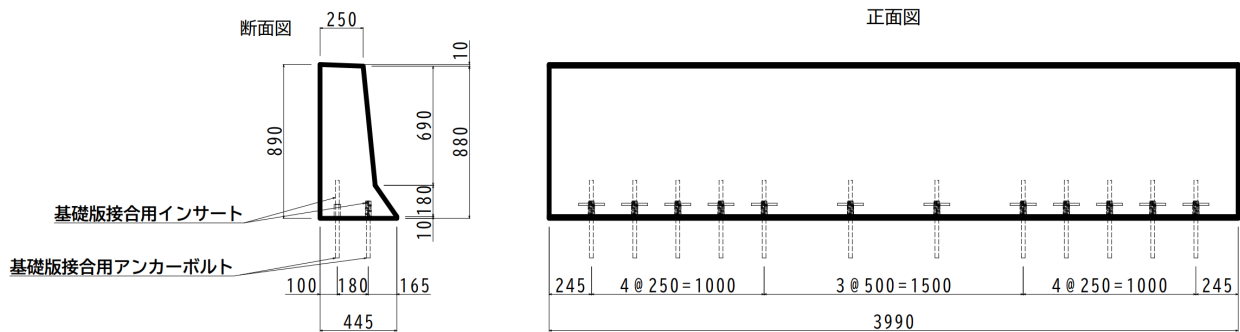


図-1 壁高欄の概要（単位：mm）

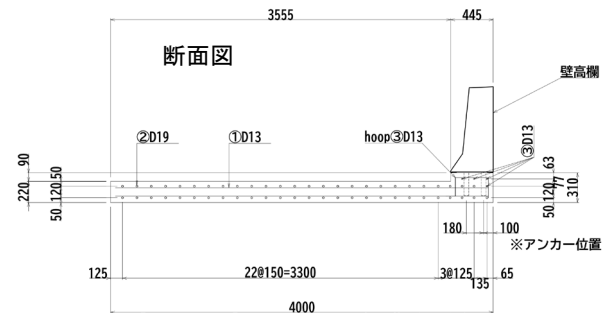


図-2 床版部の概要（単位：mm）

覆部に実橋と同様の配筋を行った。コンクリートの圧縮強度は3体平均で 44.3N/mm^2 であり、既往の研究²⁾に基づき、接合にはフィラー混入率50%のエポキシモルタルを使用した。供試体は、横連結供試体が1基、単体供試体が2基の計3基の壁高欄を床版部に施工した。

2.2 壁高欄の接合

(1) 壁高欄の接合方法

壁高欄と床版部の接合面を写真-1に示す。床版側の接合面にはエポキシモルタルを充填する隙間を確保するためのスペーサーを設置し、エポキシモルタルの漏出防止にバックアップ材としてスポンジゴムを貼り付け、その外側はバックアップ材の表面露出防止として壁高欄設置後にモルタルで仕上げた。また接合面は、エポキシモルタルの付着が良好になるよう粗面仕上げを行った。

壁高欄の据付け前に、壁高欄を吊り上げた状態で底面部および横連結部のインサートにアンカー筋を取り付け、穿孔部（ $\phi 50\text{mm}$ ）へ慎重に挿入した。横連結供試体においては、片方の製品からアンカー筋を100mm間隔で7本設置し、もう片方には縦スリット部を設け、アンカー筋側の製品をスリット側の製品に上から落とし込む方法で据え付けた。その後、無収縮モルタルにより接合した。

壁高欄と床版部の接合には、フィラー混入率50%のエポキシモルタル²⁾を使用し、注入厚さは10mmとした。なお、注入口を前面側の隅角部に設置し、排出口を対角の位置に設置することで、接合面全面にエポキシモルタルが充填されるようにした。

(2) エポキシモルタルの充填

エポキシモルタルの充填作業は壁高欄単体を中央で



写真-1 壁高欄との接合面（床版側）



写真-2 エポキシモルタル充填時の漏出状況

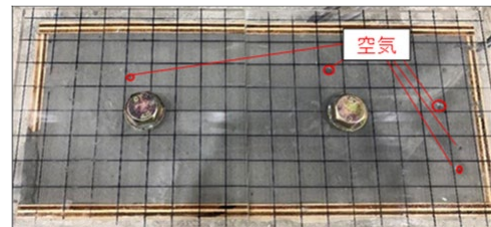


写真-3 エポキシモルタル硬化後の状況

区切り注入することを基本とした。各区画の注入量は約13Lであり、その充填時間は練り混ぜ時間を含めず平均4分30秒であった。ただし、注入時に壁高欄側面からエポキシモルタルの漏出が発生した。漏出状況を写真-2に示す。実施工時にエポキシモルタルが漏出した場合には出来形に影響し、第三者被害も懸念されるため、施工方法の改善が必要であることを確認した。これについては、バックアップ材の貼付けおよびモルタル仕上げの際に隙間を発生させないように行うこと、また、壁高欄の自重を上回る注入圧での充填によって、壁高欄の浮き上がりがないように注入することで改善された。

また、施工においてエポキシモルタルは、アンカー筋が収まる穿孔部（ $\phi 50\text{mm}$ ）や接合面へ確実に充填され、しっかりと定着される必要がある。エポキシモルタルの充填性について、別途注入試験を実施した。写真-3にエポキシモルタル硬化後の状況を示す。表面の空気の手

積率は0.4%であり、接着面およびアンカー孔に充填できることを確認した。

コンクリートとエポキシモルタルの付着性については、壁高欄の施工時にエポキシモルタルの付着試験を JIS K 5600-5-7 に準拠しプルオフ法で実施した。壁高欄が設置される床版上に、各供試体に注入したエポキシモルタルを用い、充填日と同日に供試体を作製した。また、付着試験は衝突試験日と同日に行った。試験後の状況の一例を写真-4 に、試験結果を図-3 に示す。なお、試験結果は3体の平均である。いずれの試験においても基層となるコンクリートで破壊し、少なくとも3.36N/mm²以上の付着強度を有していることが確認された。

3. 壁高欄の耐衝突性

3.1 重錘衝突試験の概要

PCa 壁高欄の接合構造の性能試験方法（試験法 441-2019）⁴⁾に準拠し、重錘による衝突試験を実施した。重錘の質量は 6880kg である。衝突位置は壁高欄の天端から 300mm の位置であり、橋軸方向接合部、中央部、端部の3ヶ所所で実施した。衝突エネルギーは SB 種設計荷重相当の 2.8kJ および場所打ち壁高欄における耐力相当（種別共通）の 28kJ を衝突角度 90 度で順に衝突させた。重錘の落下高さは、力学的エネルギー保存の法則で計算し、式（1）を用いて算出した高さになるまで重錘を円弧状に引き上げ、その後ワイヤーロープを解放し、壁高欄に衝突させた。

$$I = \frac{1}{2} \times m \times V^2 = m \times g \times h \quad (1)$$

ここで、 I ：衝突時のエネルギー（kJ）、 m ：重錘の質量（kg）、 V ：衝突速度（m/s）、 g ：重力加速度（m/s²）、 h ：落下高さ（m）である。なお、試験時の落下高さはトータルステーションで確認した。

それぞれの衝突終了後、壁高欄が表-1 に示す要求性能⁵⁾を満たしている必要がある。各供試体の測定位置を

図-4 に示す。壁高欄の耐衝突性を評価するため、接合部の目地開き、部材の変形変位および構成部材のひずみを動ひずみ測定器を用いて、1 ミリ秒間隔で測定し、ひび割れ発生位置を目視により確認した。さらに測定データより、耐力相当衝突後の壁高欄の変形状態について確認した。

3.2 試験結果

(1) 衝突試験後の外観変状

すべての供試体において、設計荷重相当の衝突試験ではひび割れの発生がなく、構成部材の飛散もなかった。

図-5 に各供試体の耐力相当衝突試験後のひび割れ図を示す。壁高欄基部において、接合部供試体で前面側に



写真-4 付着試験破壊断面

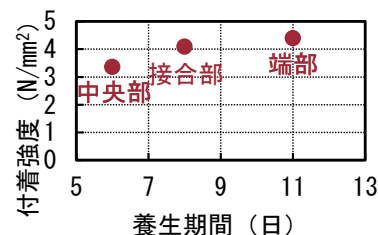


図-3 付着試験結果

表-1 壁高欄の要求性能⁵⁾

衝突条件	項目	要求性能
「設計荷重相当」の衝撃を与えた場合 2.8kJ	外観変状	①有害なひび割れが発生しないこと
	構成部材のひずみ	②構成部材が飛散しないこと
「場所打ち壁高欄における耐力相当」の衝撃を与えた場合 28kJ	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

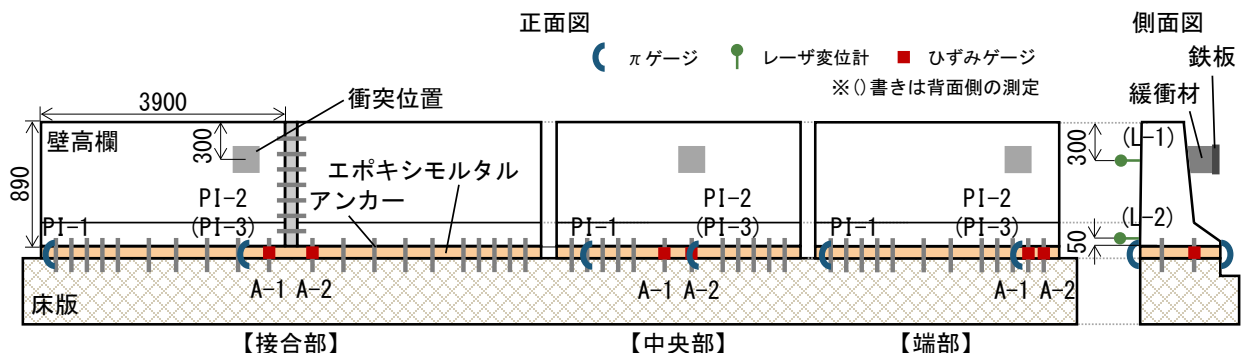


図-4 測定位置および測定方法（単位：mm）

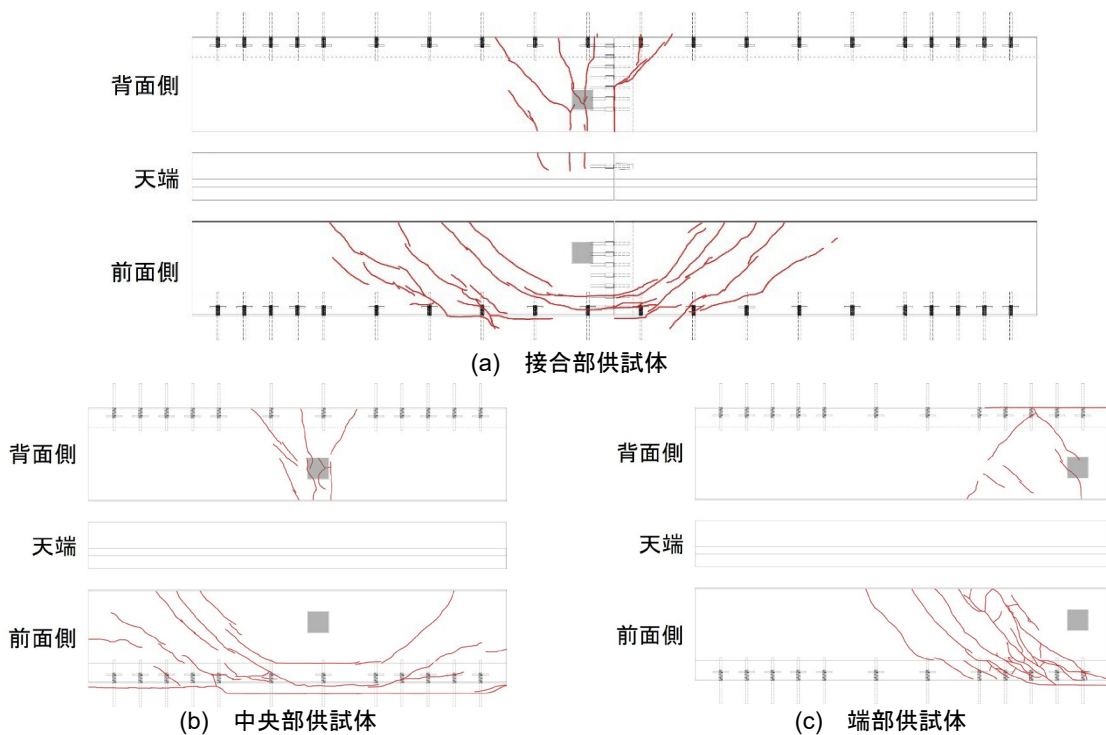


図-5 耐力相当衝突後のひび割れ図



写真-5 端部供試体コンクリート剥離状況



(a) 前面側



(b) 背面側

写真-6 アンカー筋付近はつり状況

0.5mm, 中央部供試体で背面側に 0.35mm, 端部供試体で前面側に 16mm の最大ひび割れ幅が観測された。また, 接合部においては, 接合部供試体に 0.6mm, 中央部供試体に 1.6mm, 端部供試体に 15mm, の最大ひび割れ幅が観測された。各供試体, 衝突位置を中心として円弧状にひび割れが発生しており, 接合部供試体においては, 横連結された壁高欄にも応力が伝達され, 壁高欄同士における接合構造の一体性が維持されていた。また, 床版部との接合部は一体化しており, 衝突後, 接合部の剥離が先に生じることはなく, 円弧状のひび割れに沿ったひび割れ確認された。なお, 壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートに剥離は生じなかった。

ただし, 端部供試体においては, 床板部側面側のかぶりコンクリートに剥離が確認された。コンクリートの剥離状況を写真-5 に示す。衝突による大変形によって床版部に発生したひび割れが原因であると考えられる。そこで, 衝突位置下部の接合面周辺のコンクリートをはつり, 内部鉄筋やアンカー筋の状態を確認した。エポキシモルタルは破壊面を除く接合面全体および穿孔部まで確実に

充填されており, アンカー筋の周囲において形状が保持されていた。コンクリートおよびエポキシモルタルをはつり取った後のアンカー筋付近の状況を写真-6 に示す。背面側では, 衝突の衝撃により壁高欄自体が水平方向に移動する力に対して床版コンクリート中の配力筋が拘束したことで, 崩壊に至らなかったと考えられる。アンカー筋および配力筋には, 目視でわかる変形が確認され, 床版のかぶりコンクリートには変形分の大きなひび割れが確認されたが, 剥落には至っていなかった。一方で, 引張側となる前面側では, インサートにつけた D13 の鉄筋の変形が認められ, また, インサートと鉄筋との接合部に変形が生じていた。しかしながら, 付着不良を想定したアンカー筋であっても, 鉄筋の破断やインサートからのアンカー筋の引抜けはなく, およびエポキシモルタルとアンカー筋, エポキシモルタルと床版コンクリートとの付着は健全な状態であった。

以上のことから, 衝突試験後の壁高欄は, 外観に大きな変形は認められたものの, 要求性能を満足していることを確認できた。

(2) 衝突試験時の構成部材のひずみ

図-6 に、設計荷重相当の衝突試験時におけるアンカー筋のひずみの経時変化を、50 ミリ秒の移動平均で示す。また、表-2 に衝突試験時のひずみおよび変位の最大値および残留値を示す。接合部供試体および中央部供試体において、アンカー筋の最大ひずみ値はいずれも弾性域であり、非常に小さいことが分かる。また、衝突後の残留ひずみも確認されなかった。なお、端部供試体においては、計測途中に計測不能となり、定常時の残留ひずみは判断できなかったが、ひずみが衝突後に減少していること、目地開きも最大で 0.3mm 程度であり、残留変位が確認されなかったことから、アンカー筋の残留ひずみは生じていないと推察される。また、主鉄筋や配力筋につ

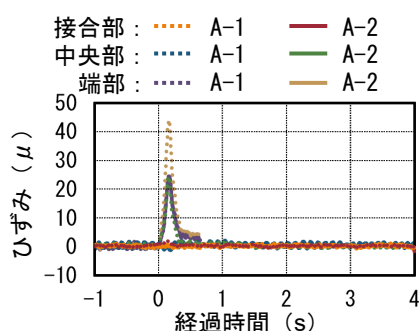


図-6 設計荷重相当衝突後のアンカー筋のひずみの経時変化

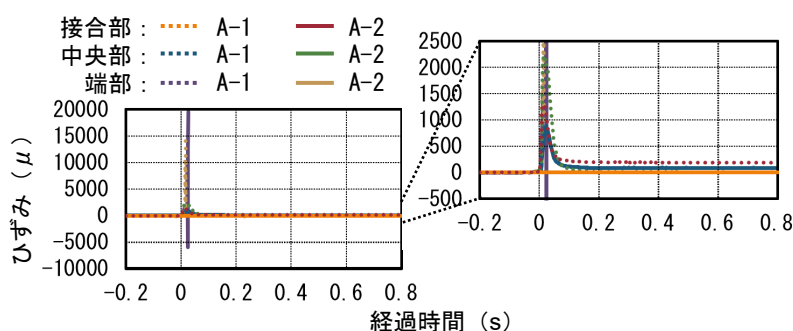


図-7 耐力相当衝突後のアンカー筋のひずみの経時変化

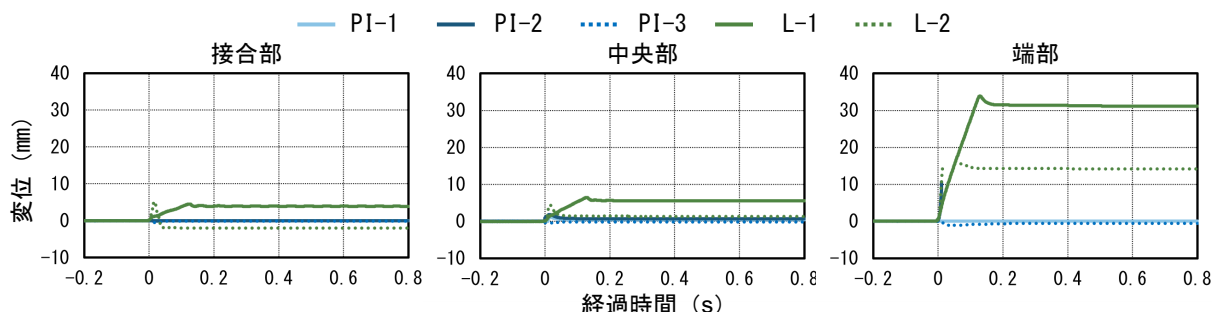


図-8 耐力相当衝突後の壁高欄の変位の経時変化

表-2 衝突後の各構成部材のひずみおよび変位の最大変位量と残留値

	衝突条件 (kJ)		アンカー筋 (μ)	主鉄筋 (μ)	配力筋 (μ)	目地開き (mm)	変位 (mm)
接合部	2.8	最大変化量	-5	34	-19	-0.0170	0.260
		残留値	0	0	0	0	0
	28	最大変化量	1289	2148	1157	1.38	5.00
		残留値	185	250	500	0.440	4.00
中央部	2.8	最大変化量	28	28	-23	-0.0190	0.170
		残留値	0	0	0	0	0
	28	最大変化量	2222	1092	386	1.85	10.4
		残留値	85	285	220	0.680	5.50
端部	2.8	最大変化量	50	44	10	0.300	0.550
		残留値	-	-	-	-	0
	28	最大変化量	19546	8635	9222	11.7	33.8
		残留値	-	-	-	-0.600	31.0

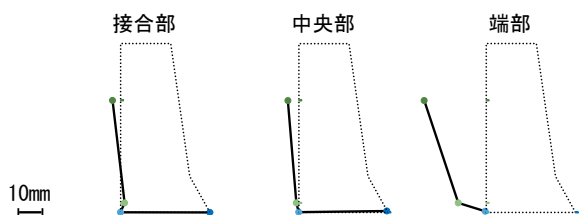


図-9 衝突位置断面の最終変形状況

挙動であったと考えられる。耐力相当の衝突エネルギーが作用した場合、エポキシモルタルの塑性変形後にアンカー筋が衝突応力を受け持つ構造となっており⁶⁾、このように衝突によって下部が先行して変形した要因としては、樹脂の弾性係数がコンクリートに比べ小さいためであると考えられる。

アンカー筋のひずみに関しては、接合部および中央部供試体のひずみは、最大で 1000～2000 μ 程度であった。一方で、端部のひずみは最大 20000 μ 程度で完全に降伏している状況であった。この違いは、ひび割れの発生状況からも、衝突力を受ける範囲が接合部および中央部は広く、より複数本のアンカーで衝突力を受け持ったためである。表-2 より、接合部および中央部のアンカー筋は、若干の残留ひずみが確認されたため、鉄筋自体は降伏していたと予想される。付着不足のアンカー筋であっても十分な性能を有していると考えられる。端部については、残留ひずみは計測不能であった。完全に降伏し、大きく塑性変形を起こしていると考えられる。しかし、衝突により、壁高欄背面のかぶりコンクリートの剥落や接合部のエポキシモルタルの接着およびアンカー筋の抜けはなく、床版部との一体性は確保されていたことから、壁高欄は要求性能を満足していることを確認した。

最終変位の結果より、図-9 に耐力相当の衝突後の壁高欄の衝突位置断面における変形状況を実際の変位の 10 倍で示す。先述したように、衝突直後は壁高欄下部の変位の方が大きいものの、最終的な挙動としては、いずれの供試体も、壁高欄が数ミリから数十ミリ程度背面側に振られる変形挙動であった。耐力相当の大きな衝撃を受けた場合には、壁高欄自体が崩壊する可能性は極めて低い。重錘衝突試験の結果からわかるように、特に端部は大変形を起こし、一部、地覆コンクリートが剥離する可能性も考えられるため、速やかな撤去および取替えが必要であると考えられる。

4. まとめ

実施工を想定した、エポキシモルタルおよびアンカー固定による壁高欄の性能評価試験を、施工性および耐衝突性の観点から実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) はつり作業によりエポキシモルタルは接合面に充填されており、付着は健全な状態であったことを目視で確認した。施工時の漏出は、接合面の隙間を発生させないことおよび壁高欄の浮き上がりがないように注入することで改善された。
- (2) 設計荷重相当の衝撃を与えた場合、ひび割れや部材の飛散および構成部材のひずみは発生せず、壁高欄は要求性能を満足していた。
- (3) 耐力相当の衝撃を与えた場合、アンカー筋や鉄筋の降伏および壁高欄の変形が確認されたが、壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートの剥離および接合部の部材に破断や抜けは発生せず、床版部との一体性は確保されており、壁高欄は要求性能を満足していた。
- (4) エポキシモルタルとアンカー固定による壁高欄は、衝突試験の結果より、実橋への適用が可能であると考えられる。ただし、壁高欄の大変形および一部の地覆コンクリートの剥離の可能性を考慮すると、衝撃が加わった場合には速やかな点検が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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」, 2020.5
- 2) 坂本和也, 審良善和, 武若耕司, 大貝麻梨子：PCa 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.571-576, 2019
- 3) 高速道路総合技術研究所：設計要領 第二集 橋梁保全編, vol.7, pp.114, 2023.10
- 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, pp.76-77, 2023.10
- 5) 高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領, Vol.3, pp.128-129, 2023.10
- 6) 赤塚創太ほか：エポキシ接着材およびアンカーによる PCa 壁高欄の固定性能の評価, 土木学会年次学術講演会公演概要集 Vol.5, V-639, 2020