

# 論文 急速施工を目的とした既設RC床版と更新用プレキャスト壁高欄との接合工法に関する研究

石原 陽介\*1・田嶋 仁志\*2・睦好 宏史\*3・牧 剛史\*4

**要旨：**首都高速道路の剛性防護柵は、建設当初の基準に基づき壁厚 150mm で施工されたものがある。これらの壁高欄は所定の強度を確保するため鋼板補強が施されている。しかしながらこの補強鋼板が経年劣化と融雪剤散布の影響から腐食が著しい箇所が散見され、これらの補修補強が進められている。ライフサイクルコストと工事規制に伴う交通影響を考慮すると、既設床版を活かしたまま壁高欄を更新することが求められている。この課題を解決すべく、短時間で施工可能なプレキャストコンクリート壁高欄工法を開発した。本論では、開発した壁高欄と床版との接合部の性能確認を目的とした静的載荷試験結果と考察について述べる。

**キーワード：**プレキャストコンクリート、壁高欄、あと施工アンカー

## 1. はじめに

現在、首都高速道路では、大規模更新事業や床版拡幅工事等の改築工事に伴い、高速道路の壁高欄の更新を実施している。更新にあたっては、工期短縮を目的として、プレキャストコンクリート壁高欄（以下、プレキャスト壁高欄と称す）が採用されている。一方、既存の壁高欄は壁厚が薄いものが有り、これを補う為に鋼板にて補強を実施してきたが、近年この補強鋼板の腐食が著しく、これらの補修補強工事を進めている（図-1）。このような背景より、既設床版を活かしたまま壁高欄を更新することに着目し、更新用壁高欄の検討を開始した。規制時間を極力短くし壁高欄を更新するためには、現場作業量を少なくすることが望まれる。そこで、数あるプレキャスト壁高欄施工法のうち、DAK 式プレキャスト壁高欄工法を採用した。本研究では、異なる壁厚の壁高欄供試体の耐荷性能の比較を行い、衝突相当荷重載荷時の部材の挙動を明らかにしたうえで、既設床版とプレキャスト壁高欄との新たな接合方法を開発し、その耐荷性能に関しても明らかにした。



図-1 補強鋼板の腐食状況例

## 2. 更新用プレキャスト壁高欄の構造

### 2.1 構造形式の概要

本研究で採用した壁高欄は、プレキャスト壁高欄と床版とを高さ調整や施工誤差の吸収が容易にできるループ鉄筋継手構造にて接合し、この接合部に高耐久な間詰めモルタルを充填し、床版と壁高欄を接合させる工法である。（図-2）また、橋軸方向の壁高欄同士は、孔あき鋼板ジベル（PBL）によって接合する構造をとり、その接合部に間詰めモルタルを充填し一体化を図る構造である。これらの接合方法により、現地での鉄筋組立を必要最小限に抑え、施工の省力化が図れることが特徴である<sup>1)</sup>。新設路線の壁高欄としては、圏央道で設置実績がある<sup>2)</sup>。

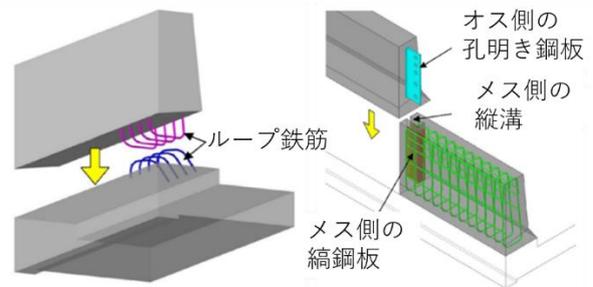


図-2 DAK 式プレキャスト壁高欄概要図

### 2.2 ループ継手高さの改良

DAK 式プレキャスト壁高欄と床版との接合はループ鉄筋にて接合することとしているが、ループ鉄筋部の高さが高ければ、間詰めモルタルの打設量が多くなることから、現場作業時間が長くなる懸念がある。これを少なくすることが必要となるが、壁厚 250mm の壁高欄においては、ループ鉄筋高さの違いによる静的載荷実験結果

\*1 首都高速道路（株）東京西局 土木保全設計課 工修（正会員）

\*2 首都高速道路（株）技術部 工博

\*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授（正会員）

\*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 准教授（正会員）

より、耐荷力および鉄筋の挙動について差異がなかったことが既往の研究で確認されている<sup>3)</sup>。したがって、今回検証する供試体については、いずれもループ鉄筋高さを170mmに縮小した構造を基本とした。

### 2.3 開発にあたっての制約

首都高速道路の壁高欄は、国の定める「防護柵の設置基準」に準拠している「附属施設物設計施工要領（第6編車両用防護柵編）（平成27年6月）」によって設計されることから、車両用防護柵の種別はS B種の規格を満足することが要求される<sup>4) 5)</sup>。また、壁高欄の形状は直壁式が採用されている。既設壁高欄の厚さは最も薄いもので150mmであり、狭隘な都市部の制約のもと設置されてきた。更新用プレキャスト壁高欄に関しても、空間の制約を満足することが要求されることから、壁厚150mmでS B種の安全性能を有する壁高欄を開発の目標と定めた。また、既設の壁高欄の地覆形状は、首都高速道路創成期から採用されている地覆形状ではなく、現在標準としている傾斜タイプを採用することとした（図-3）。ただし、既設地覆とのすり付け及び、建築限界等の制約を考慮し、地覆の幅は200mmとし、高さを250mmとした。

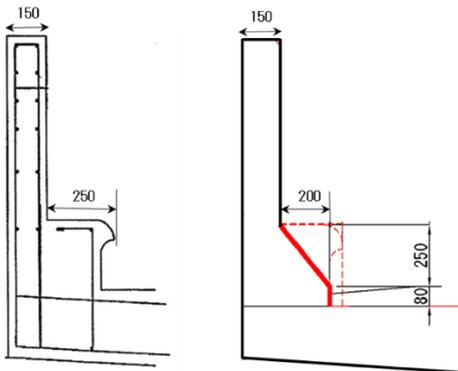


図-3 既設地覆（左）と更新用地覆（右）イメージ

## 3. 壁厚の違いが耐荷性能に及ぼす影響

### 3.1 実験目的

首都高速道路の壁高欄は、昭和39年5月まで設計されたものは、壁厚150mmを標準として設置され、その後平成2年5月まで、壁厚200mmを標準として設計された。これ以降は、耐久性向上を目的としてかぶり厚確保のために壁厚250mmの壁高欄が設計・施工されている。更新にあたっては、都市内の狭隘な制約条件や車道側の建築限界の制約より、既存の壁厚を確保することが設計条件となるため、壁厚が耐荷力に与える影響を検証する必要が生じた。そこで、本研究では、現行基準によって定められている壁厚250mmの壁高欄と壁厚を150mmとした壁高欄との耐荷性能の違いを明らかにした。

## 3.2 実験概要

本研究で実施した静的載荷実験は、図-4に示すように、車道側から外側に向けて一方向プッシュオーバー載荷を実施した。供試体のサイズは実験設備の制約より、橋軸方向幅665mmとし、壁厚高欄厚や高さは実寸サイズとした。以下、壁厚250mmのものを供試体A、壁厚150mmのものを供試体Bと称す。各供試体概要図を図-5に、使用材料の特性値を表-1に示す。また、荷重は橋軸方向に均等に作用するよう載荷した。

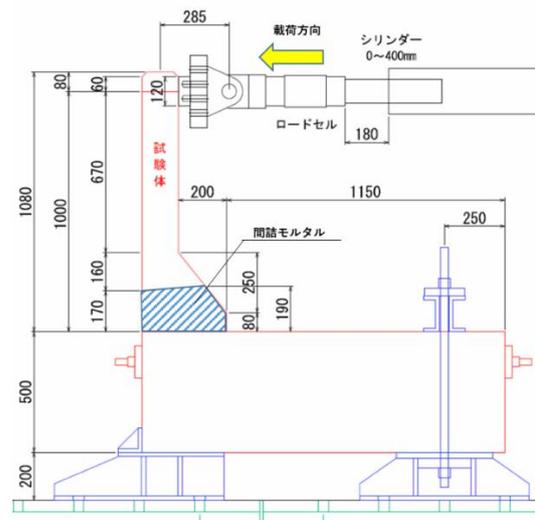


図-4 静的載荷実験状況

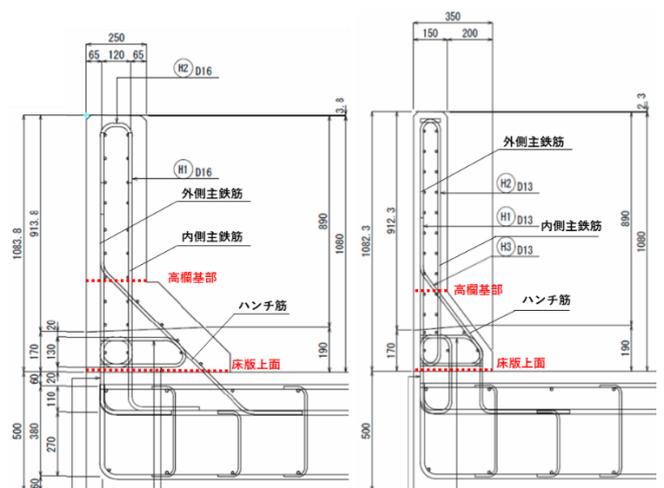


図-5 供試体概要図（左：供試体A、右：供試体B）

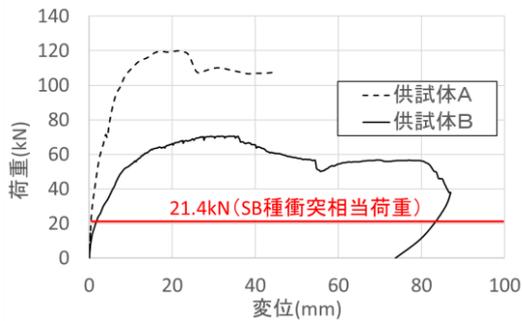
表-1 供試体AおよびBの材料特性値

	供試体A	供試体B
Pca高欄コンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	49.3	76.4
間詰めモルタル圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	55.0	61.7
ベースコンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	41.2	49.3
鉄筋降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	391	404
鉄筋引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	558	552

### 3.3 実験結果

#### (1) 荷重－変位関係

縦軸に荷重を、横軸に載荷点変位を示した荷重－変位関係を図－6に示す。供試体Aについては、荷重20～30kN程度で剛性が若干低下した後、100kN～110kNで荷重の増加が緩やかになりその後靱性的な挙動を示し、最大荷重を迎え徐々に荷重が低下した。最大荷重は120kNであった。一方、供試体Bについては、荷重15kN付近で高欄基部断面でのひび割れ発生し、剛性が若干低下した。その後荷重50kN程度で緩やかに剛性低下し、最大荷重70.5kNで荷重増加が頭打ちとなった。



図－6 荷重－変位関係図（供試体 A, B）

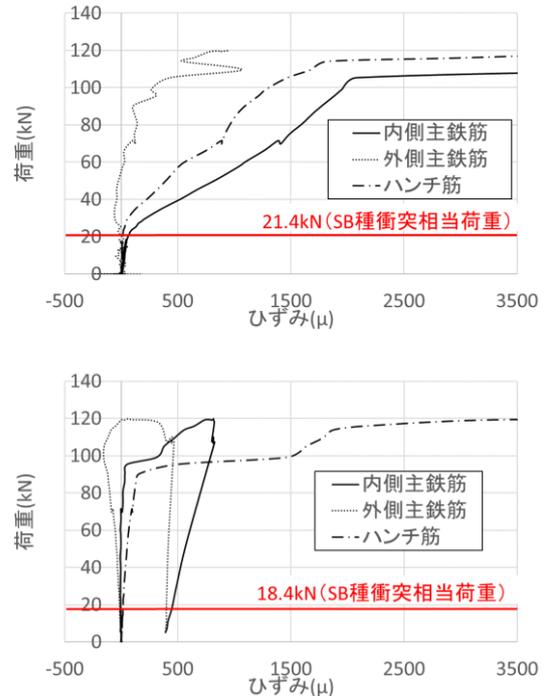
#### (2) 鉄筋の挙動

次に、主筋およびハンチ筋の鉄筋ひずみに関する変化を、図－5に示す高欄基部と床版上面の異なる2断面にて比較した。供試体Aを図－7に、供試体Bを図－8に示す。供試体Aでは、高欄基部の内側主鉄筋およびハンチ筋のひずみが荷重20kN程度から増加し始め、110kN付近でいずれも降伏ひずみを超過した。また、床版上面の鉄筋に関しては115kN付近でハンチ筋のみ降伏した。これより、壁高欄基部が制御断面として設計されていることが確認できた。一方供試体Bにおいては、荷重15kNにて高欄基部のひび割れが発生し、このひび割れに伴うひずみ増加が確認された。その後、30～40kN付近で床版上面でのひび割れに伴い、ハンチ筋のひずみが急増し始めた。60kN前後で高欄基部の内側主鉄筋が降伏ひずみに達した。上記より、壁厚150mmの壁高欄も高欄基部で制御断面を形成していることが確認できた。

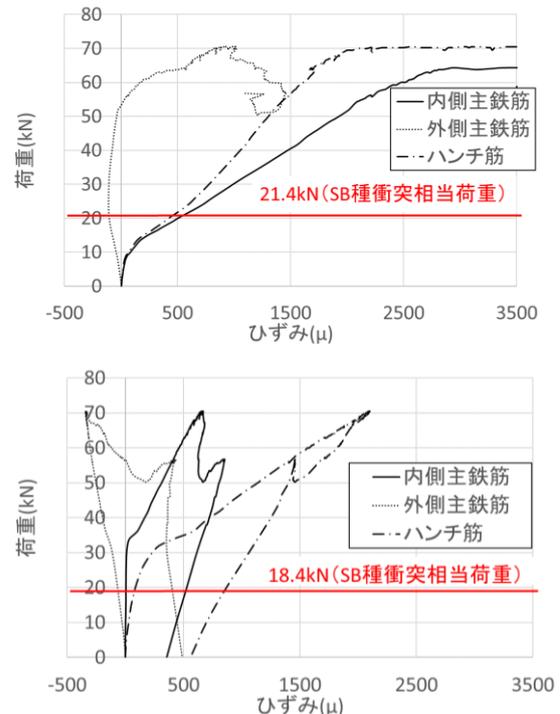
#### (3) ひび割れの比較

今回比較した2体の供試体について、ひび割れ図を図－9にそれぞれに示す。供試体Aについては、初期ひび割れが高欄基部にて確認され、その後荷重30kN時の観測ではひび割れ進展が確認された。最大荷重120kN以降は載荷点から斜め下に伸びているひび割れが進展・開口し、やがて接合モルタルを貫通してベースまで至った。一方、供試体Bについては、荷重15kN付近で高欄基部に曲げひび割れが確認され、これが進展し、最大荷重を

迎える手前付近から壁部に生じた曲げひび割れが斜め下方へ進展していき、この斜めひび割れと載荷板下縁付近を結ぶひび割れが生じたあたりで荷重が低下した。その後斜めひび割れが鉛直ひび割れに進展し、図中に示す高欄背面の上界面付近で圧縮破壊が生じた。



図－7 荷重－鉄筋ひずみ関係（供試体 A）  
（上段：高欄基部 下段：床版上面）



図－8 荷重－鉄筋ひずみ関係（供試体 B）  
（上段：高欄基部 下段：床版上面）

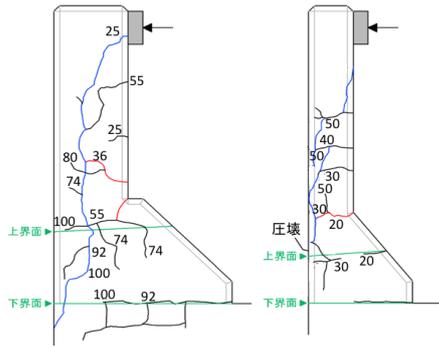


図-9 ひび割れ図（左：供試体 A, 右：供試体 B）

### 3.4 考察

実験結果より、壁高欄の静的載荷においては、壁厚が異なることによる断面剛性の違いが耐荷性能に支配的であることがわかった。また、床版部における破壊を防ぐために地覆部の曲げ剛性を高くしているが、両供試体とも高欄基部にて鉄筋が降伏し最大耐力を迎えることが明らかとなった。防護柵設置基準では、剛性防護柵の変形性能は、衝突相当荷重載荷時に防護柵を構成する主たる部材の弾性限界内での変形を見込んで設計することが必要となる。今回の実験では、衝突相当荷重載荷時において荷重-変位関係および鉄筋ひずみ関係より弾性範囲内であることが確認できた。一方、耐荷力については、衝突相当荷重との比較が明らかにされていないため、今回の試験結果より、衝突相当荷重（高欄基部では 21.4kN、床版上面では 18.4kN）および、照査断面毎に算出した試験体断面の降伏モーメントから逆算した載荷荷重<sup>6)</sup>との比率を求め、これを比較した（表-2）。これより、壁厚 250mm の壁高欄が衝突相当荷重の約 5.6 倍の耐荷力を有することに対し、壁厚 150mm の壁高欄は約 3.3 倍の耐荷力を有していることがわかった。

表-2 壁厚の違いによる耐荷力の比較

		SB種 衝突荷重 (kN)	降伏荷重 (理論値) (kN)	実験 最大荷重 (kN)	降伏/衝突 比率	最大荷重/ 設計荷重比率
高欄基部	供試体A (250mm)	21.4	72.1	120.3	3.37	5.62
	供試体B (150mm)	21.4	32.2	70.5	1.50	3.29
床版上面	供試体A (250mm)	18.4	126.3	120.3	6.86	6.54
	供試体B (150mm)	18.4	52.8	70.5	2.87	3.83

## 4. 急速施工を満足するための定着構造の提案

### 4.1 拡底アンカーを採用した定着工法

前述の供試体については、既設床版コンクリートをはつり、壁高欄と床版との鉄筋定着を確保して更新することを想定しているが、これでは床版コンクリートのはつり時間、定着鉄筋の配筋、型枠設置、床版コンクリート

の再構築と、一連の作業時間が必要となる。更新対象路線は重交通路線であることから、交通影響を極力少なくするために、更に短時間で施工可能かつ安全性を確保した壁高欄構造の開発が必要となる。そこで、床版コンクリートをはつらずに、床版と壁高欄とを、拡底アンカーにて床版に接合したねじ節鉄筋を機械継手にて接合したループ鉄筋継手を介し、既設 RC 床版とプレキャスト壁高欄を接合させる工法を開発した。なお、拡底アンカーは、数あるあと施工アンカーの中で、施工時に既設コンクリート床版に負担をかけずに耐久性の高いものを設置できることから採用することとしている。

本研究では、拡底アンカーを用いた 2 種類の供試体について実験した。まず、一方の供試体（以下、供試体 C と称す）は、内側外側主筋並びにハンチ筋の 1 断面 3 列の鉄筋に関して拡底アンカーを使用して床版に定着させた。拡底アンカーの定着長は、首都高速道路の現存する床版で最薄に設計されたコンクリート床版厚 160mm を想定し、その半分の 80mm 削孔した場合に最大で確保できる定着長 65mm として設置した。もう一方の供試体（以下、供試体 D と称す）は、過去の実験結果より、曲げに対する地覆部における内側の主鉄筋の寄与度合いが少ないことと、拡底アンカーの施工本数を減らすことを目的として、拡底アンカーをハンチ筋と外側主鉄筋の 2 列に関してアンカー筋を設置した構造として設計した。また、アンカーの定着長については、既設床版厚 160mm とし、床版下側主鉄筋を削孔しない最大の定着長 90mm として設計した。供試体 C と D の概要図を図-10 に示す。

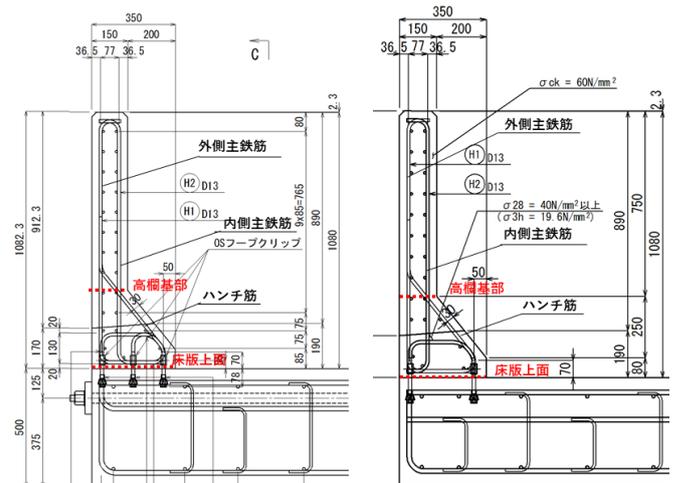


図-10 供試体概要図（左：供試体 C, 右：供試体 D）

### 4.2 実験概要

実験は、前述の実験同様プッシュオーバー載荷として変位・ひずみ等の計測も同様に実施した。使用した材料の特性値を表-3 に示す。

表-3 供試体 C および D の材料特性値

	供試体C	供試体D
Pca高欄コンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	75.9	72.9
間詰めモルタル圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	60.0	39.0
ベースコンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	45.9	46.5
鉄筋降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	404	404
鉄筋引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	552	570

### 4.3 実験結果

#### (1) 荷重-変位関係

前述の拡底アンカーを用いない供試体 B を含む 3 体の荷重-変位関係図を図-11 に示す。供試体 C については、供試体 B 同様に荷重 15kN 付近で剛性が若干低下した。その後荷重 50kN~60kN にかけて緩やかに剛性低下し、最大荷重 64kN でハンチ筋を定着した拡底アンカーのコーン破壊に起因すると思われる水平ひび割れがベースコンクリートに発生したことにより、荷重が急激に低下した。

一方、供試体 D については、供試体 B,C 同様に荷重 15kN 付近で高欄基部断面でのひび割れの発生により、剛性が若干低下したものの 40~60kN にかけて徐々に剛性低下し、その後最大耐力 67.5kN を迎えて靱性的挙動を示しその後耐力増加が見られなかったため、最大変位 60mm 付近で载荷を打ち切った。

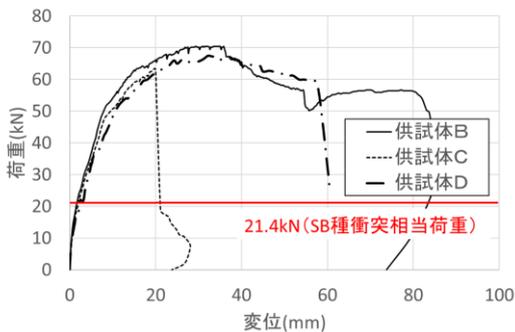


図-11 荷重-変位関係図 (供試体 B, C, D)

#### (2) 鉄筋の挙動

拡底アンカーを用いた供試体 C, D の高欄基部と床版上面における荷重-鉄筋ひずみの変化をそれぞれ図-12, 13 に示す。供試体 C の鉄筋ひずみの変化は、アンカー引抜きまで供試体 B とほぼ変わらない挙動を示すことが明らかとなった。また、供試体 D の鉄筋ひずみについても、高欄基部のハンチ筋と内側主鉄筋のひずみが 10kN あたりから増加し始め、20kN 付近で床版上面のハンチ筋ひずみが増加し始めている。その後、55kN 付近で高欄基部の主筋が降伏ひずみに達している。最大耐力を迎えると、高欄基部のハンチ筋も降伏が確認された。これより、拡底アンカーの定着が最大耐力を迎えるまで、確保できる事が明らかとなった。

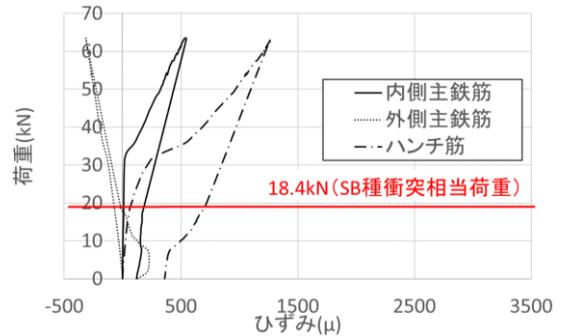
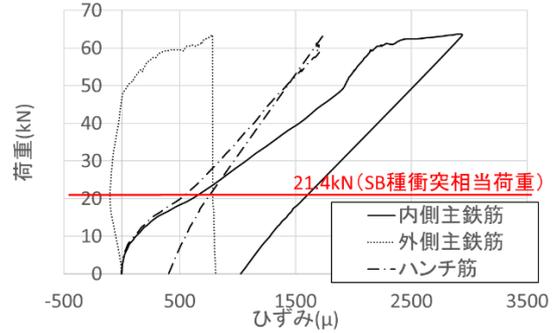


図-12 供試体 C 荷重鉄筋ひずみ関係  
(上段：高欄基部 下段：床版上面)

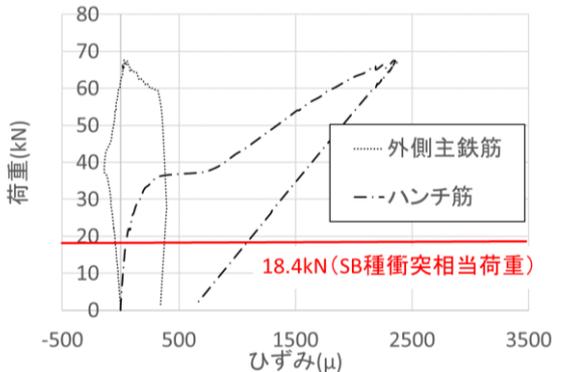
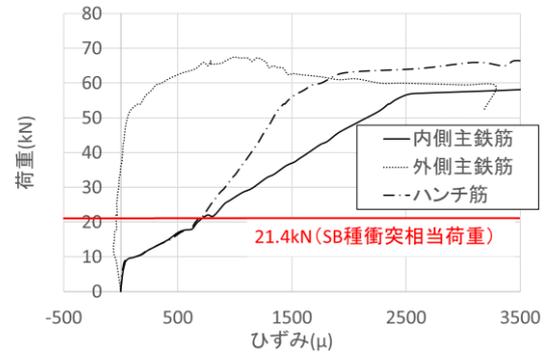


図-13 供試体 D 荷重鉄筋ひずみ関係  
(上段：高欄基部 下段：床版上面)

#### (3) ひび割れ比較

供試体 C および D のひび割れ図を図-14 に示す。両供試体とも、荷重 60kN までは供試体 B と同様のひび割れ性状を示したが、供試体 C に関しては、荷重 64kN 付

近でハンチ筋を定着した拡底アンカーのコーン破壊に起因すると思われる水平ひび割れがベースコンにて確認された。一方、供試体 D については、同様のひび割れは見られず、供試体 B 同様、荷重が増加するにつれ、曲げひび割れが斜めひび割れに進展・開口する挙動が確認された。

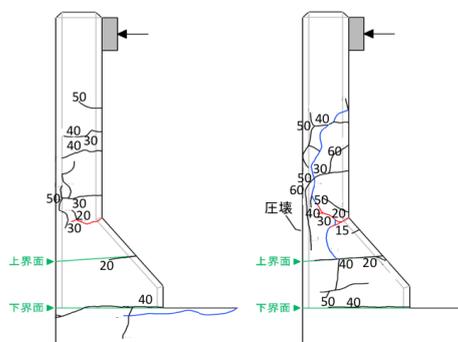


図-14 ひび割れ図 (左: 供試体 C, 右: 供試体 D)

#### 4.4 考察

試験結果より、壁厚 150mm の壁高欄で拡底アンカーを用いた異なる定着方法の二つの供試体について、衝突相当荷重載荷時にはいずれも弾性挙動を示したことが確認できたが、拡底アンカーの定着長の違いによって、破壊形態が異なる結果となった。拡底アンカーの引抜き耐力は、定着長の長さに依存することから、各種合成構造設計指針・同解説(日本建築学会)<sup>7)</sup>による耐力の算定式を元に、今回実施した拡底アンカー 1 本あたりの耐力をそれぞれ算定すると表-4 のとおりとなる。この結果から、定着長 65mm のアンカーを採用した供試体 C については、コーン破壊耐力時の鉄筋ひずみを逆算すると約  $1400\mu$  となり、アンカー鉄筋降伏前にコーン破壊を迎えることとなる。実験結果と比較すると、計算と同等なひずみレベルでコーン破壊していることがわかった。一方、供試体 D については、計算上は鉄筋降伏前にコーン破壊する結果となっているが、実験では、コーン破壊せず、高欄基部が降伏断面として靱性挙動している。したがって、アンカーの設計にあたっては、床版部のコーン破壊を防ぐために、アンカーの定着長を十分に確保することが必要である。また、内側主鉄筋を省略し、ハンチ筋を主構造として設計した供試体に関して、内側主鉄筋を省略しても、挙動の変化に与える影響は少ないことが明らかになったと考えられる。

表-4 拡底アンカー耐力比較

	有効水平 投影面積 (mm <sup>2</sup> )	ベースコン 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	コーン破壊時 アンカー耐力 (kN)	コーン破壊時 引張ひずみ ( $\mu$ )
供試体C	17174	45.9	36.1	1388
供試体D	22255	46.5	47.0	1811

#### 5. まとめ

本研究では、壁厚が異なるプレキャスト壁高欄供試体および、既設 RC 床版を利用し、拡底アンカーを用いた新たな定着方法を適用したプレキャスト壁高欄供試体について、静的載荷実験を実施し、その接合構造の挙動と耐荷性能を明らかにした。その結果、以下が結論づけられる。

- ① 壁厚 250mm の壁高欄と 150mm の壁高欄について、壁厚の違いにより、耐荷力が約 1.7 倍違うものの、壁厚 150mm の壁高欄も衝突相当荷重に対して弾性限界内で挙動を示すことが明らかとなった。
- ② 拡底アンカーを用いた壁厚 150mm のプレキャスト壁高欄について、衝突相当荷重載荷時にアンカー鉄筋を含む主たる部材が弾性挙動を示すことが明らかとなった。
- ③ 拡底アンカーを用いた壁厚 150mm プレキャスト壁高欄において、アンカーの定着長を十分に確保することで、高欄基部を制御断面とでき、床版との接合が可能であることが明らかとなった。
- ④ 拡底アンカーを用いたループ鉄筋継手構造について、壁高欄本体のループ鉄筋に生じた引張力をアンカー鉄筋に伝達できることが明らかとなった。

今後は、橋軸方向の継手である穴あき鋼板ジベルを用いた継手性能確認試験を実施し、継手の安全性を確認し、橋軸方向の分散効果も考慮した検討を進めることを考えている。

#### 参考文献

- 1) DAK 式プレキャスト壁高欄「設計・施工ガイドライン」、DAK 式プレキャスト壁高欄工法研究会, 2017.3
- 2) DAK 式プレキャスト壁高欄工法研究会 HP : <http://dak-pc.org/performance.html>
- 3) 石原陽介, 柿木啓, 牧剛史, 鈴木優佑: 更新用プレキャストコンクリート壁高欄継手部に関する実験的考察, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-304, 2017.9
- 4) 防護柵の設置基準・同解説: (公社) 日本道路協会, pp.13-18, 2016.12
- 5) 附属施設物設計施工要領 第 6 編 [車両用防護施設編], 首都高速道路 (株), pp.3-11. 2015.6
- 6) 車両用防護柵標準仕様・同解説: (公社) 日本道路協会, pp.116-118, 2004.3
- 7) 各種合成構造設計指針・同解説: (一社) 日本建築学会, pp.236-238, 2010