

拡径鉄筋を有するプレキャスト壁高欄の衝突性能と実用化

三井住友建設(株)	正会員	○藤岡 泰輔
三井住友建設(株)		博士(工学) ランズ チャミ
三井住友建設(株)	正会員	工学修士 内堀 裕之
三井住友建設(株)	正会員	博士(工学) 永元 直樹

キーワード：プレキャスト壁高欄，急速施工，衝突性能，拡径鉄筋

1. はじめに

高速道路リニューアル工事が本格化するなか、プレキャスト化による工期短縮が期待される壁高欄は、施工の急速化と相反する複雑な構造が少なくない。このため、著者らは「単純 (Easy)」と「急速 (Quick)」の二つのキーワードを掲げ、新しい接合構造を有するコンクリート製プレキャスト壁高欄 (eQ-Wall) を開発した。本稿では、静的載荷試験ですでにその耐荷性能が明らかとなった接合構造に対し、衝撃力を与える動的載荷試験により確認した衝突性能を示す¹⁾。さらに、開発したプレキャスト壁高欄を実橋に適用した施工の一例について報告する。

2. プレキャスト壁高欄の構造概要

開発したプレキャスト壁高欄の構造概要を図-1に示す。本構造の開発コンセプトは接合断面を最小化することで、現場において追加部材を一切配置することなく接合を成立させることにある。そこで、円錐台形に加工した定着部を有する鉄筋（以下、拡径鉄筋）をプレキャスト壁高欄から突出させ、他方の部材に設けた箱抜き部に拡径鉄筋を収め、30mm程度の接合断面を無収縮モルタルで充填する構造とした。拡径鉄筋は、従来の場所打ち壁高欄と同等の鉄筋量を配置し、凍結防止剤散布などの影響による鋼材腐食の対策としてエポキシ樹脂塗装を施した。

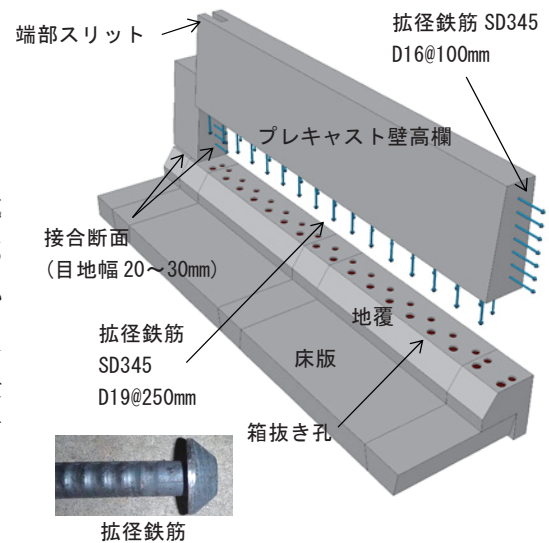


図-1 プレキャスト壁高欄の構造概要
(地覆上縁接合タイプ)

3. プレキャスト壁高欄の衝突試験

3.1 試験概要

壁高欄に対する要求性能は、①車両の逸脱防止性能、②乗員の安全性能、③車両の誘導性能、④構成部材の飛散防止性能と規定されており、これらの性能確認試験として実車を壁高欄に衝突させる手法がある^{2), 3)}。一方、プレキャスト壁高欄の試験法は、実車衝突試験によりすでに確認されたフロリダ形状の壁高欄を前提とした試験法が提案されている。その試験法に準じ衝撃体に剛性の高い鋼製台車を用い、任意に衝突条件を設定できる試験設備を使用し提案するプレキャスト壁高欄構造の性能を照査した。台車による衝突試験状況を写真-1に、設備概要を図-2に示す。



写真-1 台車を用いた衝突試験

プレキャスト壁高欄の長さは4mを標準とし、反力路盤に堅固に固定した。衝撃体は、総重量69kNの台車を用い、試験体への進入角度は90度とした。衝突位置は、試験体天端から300mmの位置とし、衝突面には鋼製の載荷板 (200mm×200mm) と緩衝材 (ゴム硬度30, 厚さ215mm) を設置した。台車先端の荷重計や台車の衝突速度、試験体の変位とひずみは、サンプリング速度2kHzで動的測定を行った。

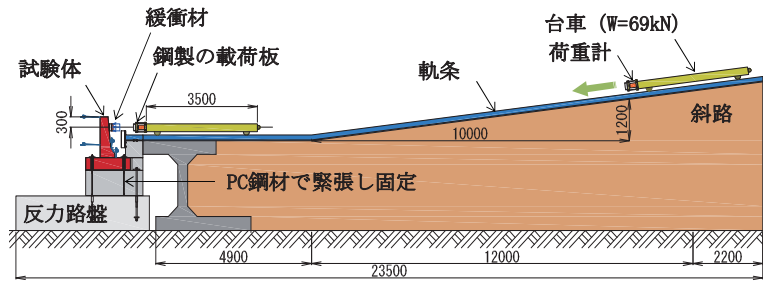


図-2 台車衝突試験の設備概要

表-1 プレキャスト壁高欄の要求性能

衝突条件	衝撃度	照査内容
設計荷重相当 種別: SS種	6.5kJ	①有害なひび割れ(目安: 0.2mm)が発生しないこと ②構成部材が飛散しないこと ③壁高欄および接合部に残留ひずみが発生しないこと
標準配筋の 耐力相当*	28kJ	①壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートにはく離が生じないこと ②接合部の引張部材に破断や抜けが生じないこと

*設計要領第二集で規定する標準配筋の場所打ち壁高欄

3.2 性能照査と衝突条件

現在の高速道路におけるプレキャスト壁高欄に対する要求性能を表-1に示す。

本試験法では、高速道路の設計要領第二集⁴⁾で規定する標準配筋の場所打ち壁高欄 (以下、標準壁高欄) と同等程度の性能を有することを確認する必要性が示されていると考えられる。具体的には、標準壁高欄の耐力相当を確認するとともに、車両の突破による第三者被害を及ぼすことがないように配慮されている。

これらの与条件より、当該プレキャスト壁高欄の衝突試験においては、段階的に衝撃度を上げ、壁高欄が破壊に至るまでの過程を把握することとした。当該試験の衝突条件を表-2に示す。

表-2 当該試験体の衝突条件

試験体の種類 載荷位置	衝突STEP	衝撃度
	STEP-01	3.0 kJ
	STEP-02	6.5 kJ
L=4m一般部 (種別: SS種)	STEP-03	20 kJ
	STEP-04	28 kJ
試験体中央	STEP-05	34 kJ
	STEP-06	42 kJ
	STEP-07	65 kJ

3.3 試験結果

(1) 衝撃力と壁高欄の損傷状況

衝撃力の時刻歴応答値を図-3に、損傷状況を図-4に示す。衝撃力は、試験体と台車間に緩衝材があるため、衝突速度の上昇とともに衝撃力の増加勾配が急激に増大した。STEP-02 (設計荷重相当6.5kJ) のときは、最大衝撃力が94kNで損傷は発生しなかった。STEP-04 (耐力相当28kJ) のときは、最大衝撃力が743kNを示し、接合部の0.25mm程度の目開きと橋軸方向の全体曲げにより衝突位置背面側に鉛直方向のひび割れが発生した。STEP-05の最大衝撃力は862kNに達したが、構成部材の飛散は確認されなかった。STEP-06の最大衝撃力は931kNで、載荷位置を中心とする同心円状のひび割れが顕著となり、表層剥離が一部確認された。STEP-07では、衝突位置からの押し抜きせん断破壊で局部破壊に至ったが、接合部の拡張鉄筋は破断せず、車両は突破されなかった。

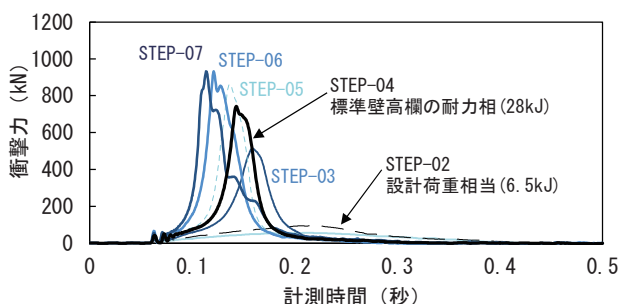


図-3 衝撃力の時刻歴応答値

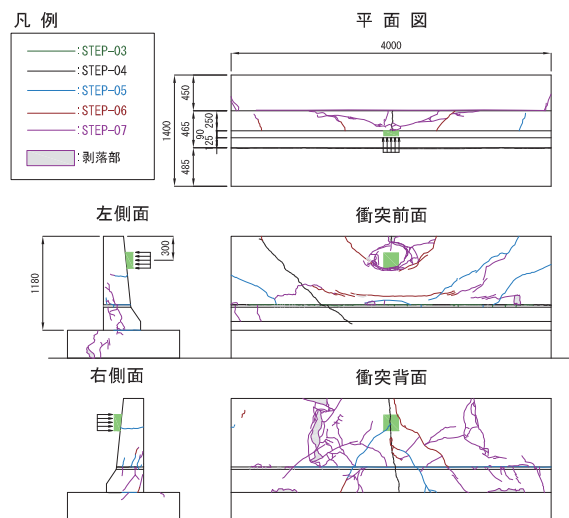


図-4 壁高欄の損傷変状

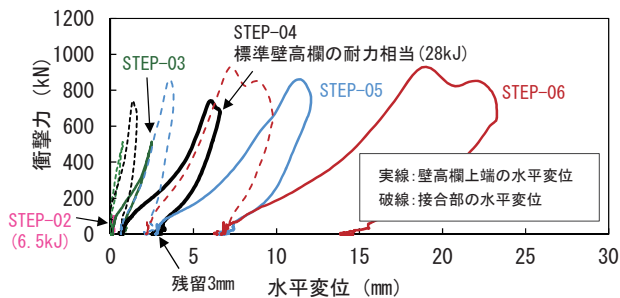


図-5 壁高欄の水平変位

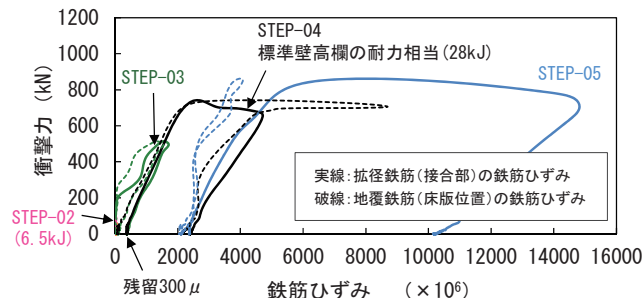


図-6 拡張鉄筋と地覆鉄筋のひずみ

(2) 壁高欄の水平変位とひずみ履歴

衝突位置におけるプレキャスト壁高欄の水平変位を図-5に示す。壁高欄の水平変位は、STEP-02まで弾性挙動を示した。STEP-04では壁高欄上端の水平変位の残留が3mm程度発生し、衝撃度の増大に伴い残留変位も顕著となった。

接合部の拡張鉄筋と床版位置における地覆鉄筋のひずみ履歴を図-6に示す。STEP-03では拡張鉄筋と地覆鉄筋ともに残留ひずみが最大300μ程度であった。STEP-04では地覆鉄筋のひずみ増加が先行し、拡張鉄筋ともに降伏に至った。その後、衝撃度の増大とともに最大ひずみと残留ひずみが増加した。

3.4 破壊性状に対する考察

同一形状の試験体で静的荷重および衝撃力を与えた際の破壊状況を写真-2に示す。いずれの破壊性状においても載荷位置からの押し抜きせん断破壊で終局に至ったが、静的荷重では鉄筋が降伏に至った範囲が載荷位置から45度分布の範囲内にあるのに対し、衝突試験では広範囲にわたって鉄筋が降伏した。また、衝突試験では衝撃力の増加とともに、徐々に台車先端が壁高欄に貫入する現象が確認された。しかし、両試験の耐力相当の荷重条件では、拡張鉄筋の破断や抜け出しは生じなかった。これらより、当該プレキャスト壁高欄は標準壁高欄と同等の性能を有し、十分な余剰耐力と第三者に対する安全性が確認されたといえる。

3.5 最大衝撃力の時刻歴応答値の算定

今回の衝突試験では2kHzの動的計測を行っているため、壁高欄の水平変位は0.5mm以下と高精度であり、荷重の時刻歴推定精度も高い。そのため、壁高欄に伝達されるエネルギーも精緻に求めることができる。そこで、衝突試験で得られたプレキャスト壁高欄と緩衝材のバネ定数を算定し、その荷重変位曲線から時刻歴応答値を算出した。ここでは、衝撃力の実測値の一例と台車重量を変化させた計算結果を示す(図-7)。使用した台車重量は69kNであり、計算値が実測値に概ね一致していることが検証できた。なお、各台車重量の計算値は、衝突速度を調整し衝突エネルギーを一定とした算定結果であるが、最大衝撃力に達するまでの力積が異なる結果となる(表-3)。



a) 静的荷重による破壊性状



b) 衝撃力による破壊性状

写真-2 試験体の破壊状況

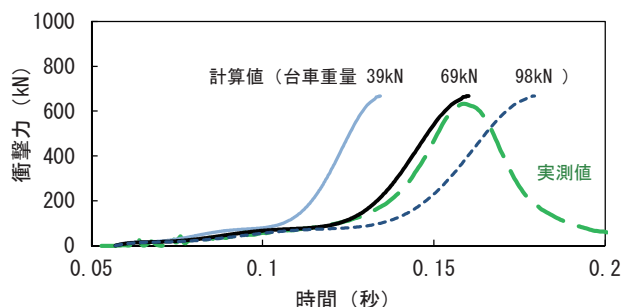


図-7 衝撃力の時刻歴応答値の算定結果

表-3 衝撃度と力積との関係

台車重量 (kN)	39	69	98
衝突速度 (m/s)	3.20	2.41	2.02
衝突エネルギー (kJ)	20.4	20.4	20.4
力積 (kNs)	12.8	17.0	20.2

車両が衝突する現象は、衝突体の変形を伴う作用時間の比較的長い衝撃作用特性（ソフトな衝撃）として取り扱われるため、静的荷重による破壊性状とさほど変わらないとの報告もある。しかし、衝撃作用に対するひずみ速度や荷重速度、および衝突体と被衝突体の質量比によって破壊挙動が静的荷重の作用と異なることも知られている⁵⁾。よって、このような衝突実験においては、衝突体の重量と緩衝材を一定とした衝突試験により標準的な構造と性能を相対比較する手法や、力積と最大衝撃力などを考慮したより精緻な評価方法の検討が必要であると考えられる。

4. プレキャスト壁高欄の実橋への適用例

今回提案するプレキャスト壁高欄は、壁高欄を地覆上縁で接合するタイプと地覆下縁で接合するタイプを開発した。実橋においては、後者のプレキャスト壁高欄を採用した。静的および動的試験に比べ、壁高欄の据付け試験や接合断面へのモルタル充填試験を実施し施工性能についても確認を行った。その結果を踏まえ、施工法をマニュアルとして定め運用した。

実橋におけるプレキャスト壁高欄の設置状況を、写真-3に示す。プレキャスト壁高欄から突出させた拡張鉄筋と床版に設けた箱抜き孔との接合部に充填する無収縮モルタルは、プレキャスト壁高欄を設置する直前に箱抜き孔に投入し、不可視部分に充填不良が生じない手順で接合作業を行った。箱抜き孔へのモルタル投入後、プレキャスト壁高欄を据え付け、床版および壁高欄同士の接合断面の型枠を組み立て、モルタルポンプを用いて無収縮モルタルを注入した。

実橋における実施工程から、プレキャスト壁高欄の1日当たりの施工延長は50m以上であり、作業の習熟とともにさらなる施工の急速化が見込めることが確認できた。

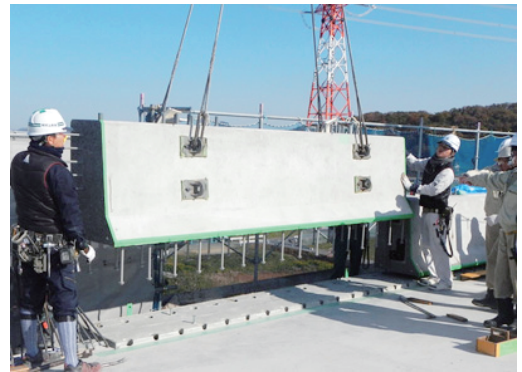


写真-3 プレキャスト壁高欄の設置

5. まとめ

開発したプレキャスト壁高欄の衝突試験および実橋への適用で得られた知見を以下に示す。

- 1) 拡張鉄筋を接合構造に用いたプレキャスト壁高欄は、台車による衝突試験結果より、高速道路の設計要領第二集で規定する標準配筋の場所打ち壁高欄と同等の性能を有することが確認できた。
- 2) 標準壁高欄の耐力相当の荷重条件における衝突試験では、拡張鉄筋の破断や抜け出しは生じず、過載荷時においても接合構造の靱性や堅牢性が高いことが確認できた。なお、過載荷による壁高欄の衝撃破壊モードは、橋軸方向の全体曲げが先行した後、衝突位置から押し抜きせん断破壊で終局に至った。
- 3) 開発したプレキャスト壁高欄の1日当たりの施工延長は50m以上であり、今後さらなる施工の急速化が見込める。プレキャスト壁高欄の接合構造の単純化と、施工の急速化の両立が実現できた。

開発したプレキャスト壁高欄を今後本格化する更新事業に適用し、交通規制の短縮による社会経済損失を低減するとともに、生産性向上に資するプレキャスト技術として貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 藤岡泰輔, 内堀裕之, 三加崇, 永元直樹: 拡張鉄筋を接合構造に有するプレキャスト壁高欄の開発, プレストレストコンクリート工学会, 第26回シンポジウム論文集, pp. 205-208, 2017年10月
- 2) 社団法人日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 平成28年12月
- 3) 建設省土木研究所道路部, 日本道路公団試験研究所, (社)セメント協会ほか: 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, 共同研究報告書第207号, 1998年6月
- 4) 株式会社高速道路総合技術研究所: 設計要領第二集橋梁建設編, 平成28年8月
- 5) 公益社団法人土木学会: 構造工学シリーズ6「構造物の衝撃挙動と設計法」, 1994年1月