

# 高速道路用プレキャスト型剛性防護柵の開発

## — 静的載荷試験および鉄球衝突試験による性能評価 —

### Development of Precast Concrete Rigid Protective Fences for Replacement for Protective Fences on Reinforced Concrete Viaducts

#### - Performance Evaluation by Static Loading Tests and Iron Ball Impact Tests -

川口昇平\* 石井敏之\* 中村方紀\*\* 三澤孝史\*

#### 要 旨

我が国の多くの高速道路は経年劣化が進んでおり、補修や更新が必要な時期を迎えている。そこで、既存の高架橋を供用しながら、劣化が進んだ部位のみを更新する部分更新技術の研究を進めている。この研究の一環で、高架橋の防護柵の更新を目的にプレキャスト型の剛性防護柵を開発し、静的載荷試験および鉄球衝突試験により性能を確認した。その結果、高速道路に適用可能な SB 種防護柵に相当する強度性能と飛散防止性能を有していることを確認した。

キーワード：高速道路、更新技術、プレキャスト、防護柵、鉄球衝突試験

#### 1. まえがき

我が国の高速道路の多くは高度経済成長期に建設され、供用期間が 40 年を超える構造物が増えている。これらの構造物は経年劣化が進み、補修や更新などの対処が必要となっている。一方、流通や緊急輸送路として都市部の高速道路の重要性は高く、長期間の通行止めを伴う大規模更新は、街路の渋滞を誘発し、社会的な影響が大きいため、更新時期の設定が難しくなっている。そのため、首都高速道路では、外環道や圏央道などの道路ネットワークの整備を待って、大規模更新の実施を検討している<sup>1)</sup>。しかし、既存の高架橋を供用しながら、劣化している部位のみの更新技術を開発することにより、交通規制による経済損失を低減し、高架橋のライフサイクルコストを低減することは可能である。そこで、劣化が進む高速道路高架橋の防護柵の更新を目的に、プレキャスト型の剛性防護柵（以下、PCa 高欄）を開発した。

PCa 高欄の施工上の利点は、劣化した既設防護柵を切断撤去したのち、PCa 高欄を既設床版に、あと施工アンカーで固定するため、コンクリートの養生が不要で、交通規制の早期解放が可能な点である。また、設計上の特徴は、設計耐力を超える衝突荷重が発生した場合に、床版につながる地覆部を塑性変形させることで、床版と高欄壁部への損傷を低減できる点である。

防護柵が保有すべき性能には、車両の逸脱防止性能、乗員の安全性能、車両の誘導性能、構成部材の飛散防止性能がある<sup>2)</sup>。防護柵の適用に当たっては、車両衝突試

験により、これらの性能を確かめることになっているが、車両衝突試験には大きな費用が必要であり、かつ非常に難度の高い試験のため、実施が容易ではない。

しかし、防護柵が保有すべき性能のうち、逸脱防止性能における強度と構成部材の飛散防止については、車両の形状と寸法によらないため、載荷試験により性能を確認することが可能である。そこで、静的載荷試験および車両の衝突荷重を模擬した鉄球衝突試験を実施し、PCa 高欄が高速道路に適用可能な、SB 種以上の強度性能と飛散防止性能を有する事を確認した。

#### 2. 車両用防護柵の要求性能

##### 2.1 防護柵の種類

車両用防護柵は、たわみ性防護柵と剛性防護柵に分類され、車両が衝突する際に、ほとんど防護柵に変形を生じない構造のものを剛性防護柵という。我が国の都市部の高速道路では、道路の建築限界や車両衝突時における防護柵の路外への変形量の規制を理由に、剛性防護柵が多く用いられている。剛性防護柵は、前面の勾配の違いから、フロリダ型、単スロープ型、直壁型などに分類される。我が国では路側幅が狭くても設置が可能な直壁型の適用数が最も多く、フロリダ型、単スロープ型の順となっている。図-1 に 3 つの剛性防護柵の形状例を示す。直壁型は壁部の勾配が 90 度で地覆の形状は①カーブストーンタイプや②傾斜タイプなどの形状がある。フロリダ型は前面が 2 段勾配であり、1 段目は 55 度、2 段目

\*技術研究所 \*\*東日本支社環境技術部

84度で規定されている(③)。単スロープについては前面勾配が80度で規定されている(④)。なお、本試験ではPCa高欄の前面形状は、我が国で適用例の多い直壁型(傾斜タイプ)とフロリダ型を採用した。

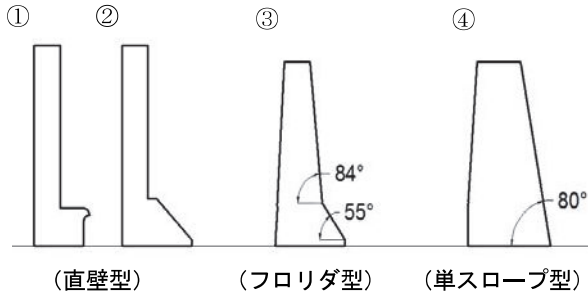


図-1 剛性高欄の形状(右側が車路側)

2.2 防護柵の種類

防護柵の種類別は、強度(車両が衝突した時に突破されない衝撃度の大きさ)と設置場所、および道路区分に応じて定められている。表-1に防護柵の種類を示す。

本試験でのPCa高欄の設計は、設計速度80km以上の高速道路に適用可能なSB種の適用区分とした。なお、衝撃度は式(1)で規定されており、車両の重量と衝突時速度、および衝突角度に依存する<sup>2)</sup>。

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left( \frac{V}{3.6} \cdot \sin \theta \right)^2 \quad (1)$$

ここで、  
 $I_s$ : 衝撃度(kJ)  
 $m$ : 車両質量(t)  
 $V$ : 衝突速度(km/h)  
 $\theta$ : 衝突角度(度)

3. 性能確認試験

PCa高欄の性能確認のため、静的載荷試験と鉄球衝突試験を実施した。静的載荷試験では、最大荷重、主要な部材の降伏、塑性変形の有無、ひび割れの発生状況から、SB種相当の強度を有することを確認した。鉄球衝突試験では、最大荷重と部材の降伏に加え、構成部材の飛散量を確認した。

防護柵の性能は衝撃度で区分されているが、衝撃度を直接計測することはできない。そこで、「車両用防護柵標準仕様・同解説<sup>3)</sup>」の衝撃度を衝突荷重に変換する式(2)を参照し、表-2の衝突荷重を目標荷重として、剛性防護柵の性能評価を行った。壁部の衝突面の傾斜により、衝突力の一部が鉛直成分に変換され、水平力が低減するため、同じ衝撃度でも壁前面に6°の傾斜を持つフロリダ型は直壁型に比べて衝突荷重が小さくなる。

3.1 静的載荷試験

a. 試験装置および載荷方法

写真-1に静的載荷試験装置を示す。載荷方法は試験体の防護柵の天端から230mmの位置をジャッキで水平に加力して行った。加力方法は、試験体が降伏するまで

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

$F_t$ : 衝突荷重(kN)       $\kappa_f$ : 補正比例係数(=0.1)  
 $E_y$ : 直行方向の運動エネルギー(kJ)       $E_y = 1/2 \cdot m \cdot V^2 \cdot \sin \theta$   
 $\theta$ : 衝突角度(=15°)       $L_w$ : 車軸間隔(=6.455m)  
 $m$ : 車両全重量(=25.0t)       $m_r$ : 後輪軸重量(=18.5t)  
 $V$ : 衝突速度(m/s)       $e_v$ : 車両の反発係数(=0.2)  
 $a$ : 斜面低減率       $a = (K_t)^2 \cdot b \leq 1.0$ (直壁は $a = 1.0$ )  
 $K_t$ : 角度低減率       $K_t = \sin^2 \alpha$   
 $\alpha$ :  $\alpha = \tan^{-1}(\sin \theta / \tan \beta)$   
 $\beta$ : 前面傾斜角度 (単スロープ10°、フロリダ6°、直壁0°)  
 $b$ : 実験係数 (単スロープ=1.7、フロリダ=1.1、直壁=1.0)

表-1 防護柵種類の適用区分<sup>2)</sup>

| 道路の区分     | 設計速度(km/h) | 一般区間 |         | 重大な被害が発生するおそれのある区間 |         | 新幹線などと交差または近接する区間 |         |
|-----------|------------|------|---------|--------------------|---------|-------------------|---------|
|           |            | 種別   | 衝撃度(kJ) | 種別                 | 衝撃度(kJ) | 種別                | 衝撃度(kJ) |
| 自高自動車専用道路 | 80以上       | A    | 130     | SB                 | 280     | SS                | 650     |
|           | 60以下       |      |         | SC                 | 160     | SA                | 420     |
| その他       | 60以上       | B    | 60      | A                  | 130     | SB                | 280     |

表-2 衝突荷重と衝撃度の関係(SB種の場合)<sup>3)</sup>

| 種別  | 衝撃度(kJ) | 衝突荷重(kN) |       |
|-----|---------|----------|-------|
|     |         | 直壁型      | フロリダ型 |
| SB種 | 280     | 72       | 58    |

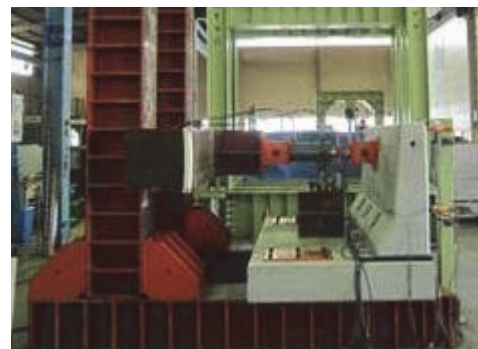


写真-1 静的載荷試験装置

5kN ごとに漸増する荷重制御で行い、鉄筋およびアンカーの降伏発生後は 2mm 毎の変位制御で行った。加力は最大耐力を越え、耐力低下が確認できるまで行った。

b. 試験体の概要

試験体は直壁型 2 体とフロリダ型 2 体の計 4 体とした(写真-2~4 参照)。直壁型として、場所打ちコンクリート製高欄を鋼板補強したタイプと PCa 高欄タイプ、フロリダ型として、標準タイプと繊維入り軽量コンクリートを使用したタイプの PCa 高欄を製作した。試験体の長さは、設置作業時の取り扱いやすさ(長さ、重量)を考慮して 2m とした。直壁型が 0.8~1.0t、フロリダ型は 1.0~1.2t である。表-3 に各試験体の概要と、図-2 に各試験体の断面図を示す。PCa 高欄は、車両衝突時の水平力に抵抗するため、定着金具(地覆コンクリートに差筋で一体化)を取り付け、前段アンカー(4 本)で床版に固定した。また、地覆傾斜部に設けた開口から後段アンカー(3 本)で固定した。

c. PCa 高欄の設置方法

模擬床版(2200mm×幅 1300mm×厚さ 250mm、主鉄筋 D19@125mm、配力筋 D16@250mm)にケミカルアンカー(ボルト径 M20、打込長さ 170mm)を打ち込み、

PCa 高欄をボルトで固定した。そして、PCa 高欄と床版の隙間(約 2cm)に無収縮モルタルを充填し、一体化させた。

d. 計測項目

計測項目の一覧を表-4 に、計測点位置を図-3 に示す。

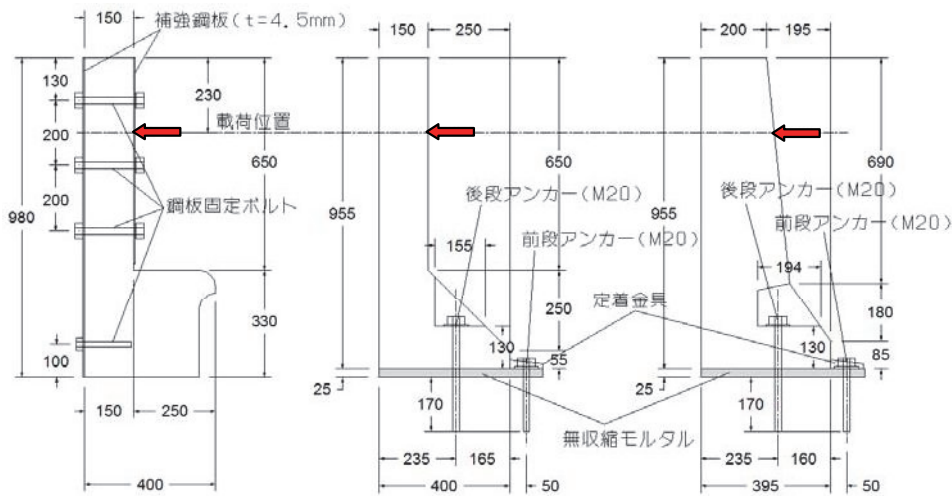
e. 試験結果

(a) 荷重と変位の関係

図-4 に各試験体の荷重-変位曲線を示す。設計衝突荷重まで概ね弾性的な挙動を示しており、すべての主要部材は降伏しなかった。しかし、設計衝突荷重を越えてから地覆部にひび割れが発生し、直壁型では断面変化位置、

表-3 静的載荷試験体の概要

| 形式    | 試験体名            | 構造条件  |
|-------|-----------------|---|
| 直壁型   | TS-1<br>(場所打ち)  | 場所打ちコンクリート鋼板補強型<br>( $f_c = 21\text{N/mm}^2$ )+鋼板補強( $t=4.5\text{mm}$ ) |
|       | TS-2<br>(PCa高欄) | 普通コンクリート( $f_c = 30\text{N/mm}^2$ )<br>+アンカー(M20,L=170mm)               |
| フロリダ型 | FS-1<br>(PCa高欄) | 普通コンクリート( $f_c = 30\text{N/mm}^2$ )<br>+アンカー(M20,L=170mm)               |
|       | FS-2<br>(PCa高欄) | 繊維入りコンクリート( $f_c = 30\text{N/mm}^2$ )<br>+アンカー(M20,L=170mm)             |



(TS-1; 直壁型場所打ちタイプ) (TS-2; 直壁型プレキャストタイプ) (FS-1, 2; フロリダ型プレキャストタイプ)

図-2 高欄試験体の断面形状



写真-2 直壁型場所打ちタイプ



写真-3 直壁型プレキャストタイプ



写真-4 フロリダ型プレキャストタイプ

フロリダ型では地覆の前段アンカーと後段アンカーの間にひび割れが生じた(写真-5参照)。その後、最大荷重に至るまでは荷重が増加し、最大荷重を超えると、水平変位の増加とともに緩やかに荷重が低下した。

(b) 荷重と各部材のひずみの関係

図-5~8に各試験体の荷重と鉄筋、アンカー、定着金具のひずみの関係、表-5に静的荷重試験の結果一覧を示す。以下に各試験体の荷重状況を示す。

TS-1は壁鉄筋のひずみが大きく、背面の鉄筋が降伏

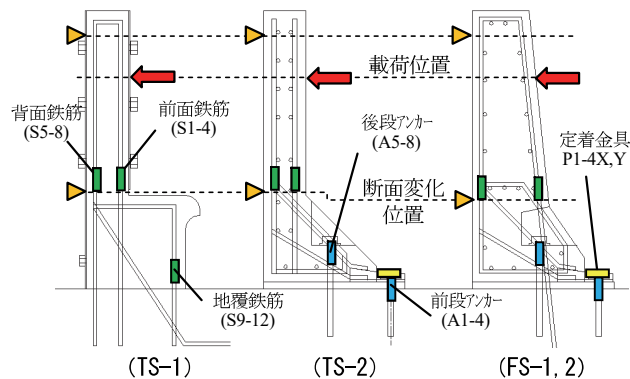


図-3 計測点位置

表-4 静的荷重試験の計測項目一覧

| 計測項目(記号)                  | 主な計測位置             | 計測点数   |
|---------------------------|--------------------|--------|
| 水平変位(変位計)                 | 上端部<br>断面変化位置      | 2<br>2 |
| 壁部鉄筋ひずみ(ひずみゲージ)           | 前面鉄筋<br>背面鉄筋       | 4<br>4 |
| 地覆部鉄筋ひずみ(ひずみゲージ)          | 場所打ちタイプの<br>TS-1のみ | 4      |
| アンカー筋ひずみ(ひずみゲージ)(TS-1は除く) | 前段アンカー<br>後段アンカー   | 4<br>3 |
| 定着金具ひずみ(ひずみゲージ)(TS-1は除く)  | 水平方向 X<br>鉛直方向 Y   | 4<br>4 |

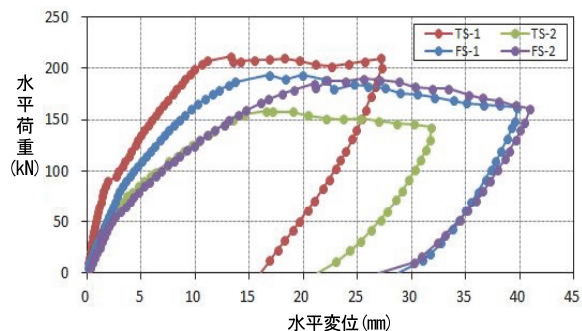


図-4 荷重-変位曲線

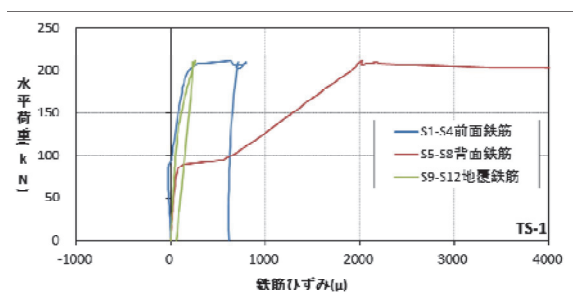


図-5 荷重とひずみの関係 (TS-1)

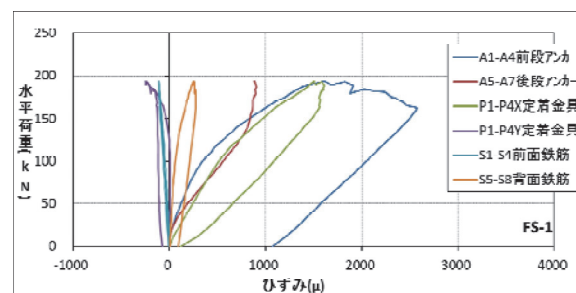


図-7 荷重とひずみの関係 (FS-1)

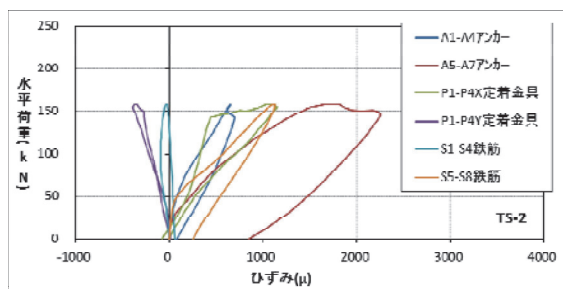


図-6 荷重とひずみの関係 (TS-2)

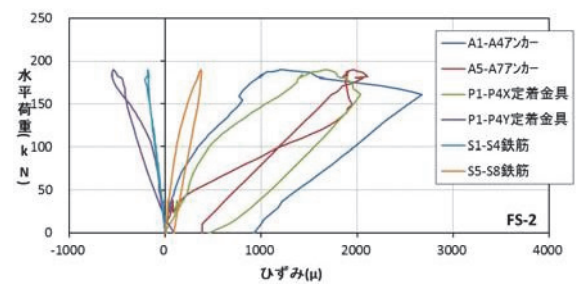


図-8 荷重とひずみの関係 (FS-2)



直壁型場所打ち (TS-1)



直壁型 PCa 高欄 (TS-2)



フロリダ型 PCa 高欄 (FS-1)



フロリダ型 PCa 高欄繊維入 (FS-2)

写真-5 ひび割れ発生状況



した。鋼板補強の効果で前面鉄筋は降伏に至らず、地覆鉄筋も降伏しなかった(図-5)。

TS-2 は後段アンカーのひずみが大きく、降伏に至った。定着金具、壁鉄筋は降伏しなかった(図-6)。

FS-1 は地覆にひび割れが発生した後に前段アンカーが降伏に至った。定着金具と壁鉄筋は降伏に至らなかった(図-7)。

FS-2 は後段アンカーが先に降伏し、前段アンカーも最大荷重後に降伏した。定着金具は降伏したが、壁鉄筋は降伏に至らなかった(図-8)。

(c) 床版のひび割れの発生状況

TS-1 は飲み込み鉄筋の引き抜きにより、床版に大きなひび割れを生じた。一方、PCa 高欄の TS-2、FS-1、FS-2 では引き抜きに伴い、アンカー周辺に床版のコンクリートの剥離を生じたが、損傷はボルト周りのコンクリート表層部に限定的であった(写真-6)。

3.2 鉄球衝突試験

a. 試験方法

鉄球衝突試験状況を写真-7に示す。鉄球の載荷高さ(以下、載荷高)は、鉄球(重量 1.8t)を衝突点の直上の位置でクレーンで吊り、所定の位置エネルギーになるようにバックホウで横引きして調整した。載荷高は 5cm、10cm、1m、1.5m とし、載荷高の低い順に段階的に載荷した。載荷高 5cm は、SB 種の荷重強度 72kN に相当し、10cm は位置エネルギーが 2 倍、1m および 1.5m は破壊荷重を想定して設定した。この所定の載荷高に静止させた後、鉄球を解放して振り子式に衝突させた。鉄球の衝突位置は、静的載荷試験と同じ壁部中央の天端から 230mm の位置とした。また、鉄球の衝突による局所的な破壊を防ぐため、衝突点にゴム板(t=50mm)を接着した H 型鋼載荷板をアンカーボルトで取り付けた(写真-8 参照)。

b. 試験体の概要

試験体は表-6に示すように、直壁型4体とフロリダ型2体の計6体を製作した。直壁型は、静的載荷試験の TS-1、TS-2 に対応した TD-1、TD-2 に加え、飛散防止対策を施した繊維入りコンクリートタイプ(TD-3)、背面に繊維シートを埋め込んだタイプ(TD-4)とした。

表-5 静的載荷試験の結果一覧

| 試験体名          | 最大耐力 (kN) | 壁鉄筋    | 地覆鉄筋 | アンカー | 定着金具 |
|---------------|-----------|--------|------|------|------|
| TS-1 (場所打ち)   | 208       | 背面鉄筋降伏 | 降伏せず |      |      |
| TS-2 (PCa 高欄) | 154       | 降伏せず   |      | 後段降伏 | 降伏せず |
| FS-1 (PCa 高欄) | 186       | 降伏せず   |      | 前段降伏 | 降伏せず |
| FS-2 (PCa 高欄) | 185       | 降伏せず   |      | 前後降伏 | 降伏   |

フロリダ型は FS-1 と FS-2 に対応した FD-1、FD-2 とした。試験体の長さは全てのケースで 2m とした。

c. PCa 高欄の設置方法

PCa 高欄試験体の設置方法は、静的載荷試験と同様である。

d. 計測項目

計測項目の一覧を表-7に、計測器配置を写真-8に示す。なお、鉄筋、アンカー、定着金具のひずみ計測位置は図-3と同じである。

e. 評価方法

衝突荷重は、写真-8の H 型鋼載荷板にひずみゲージを添付し、あらかじめ求めた荷重-ひずみ関係から衝突荷重に換算して求めた。

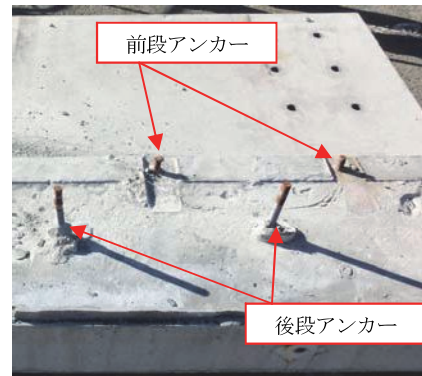


写真-6 アンカー周りの剥離状況



写真-7 鉄球衝突試験状況

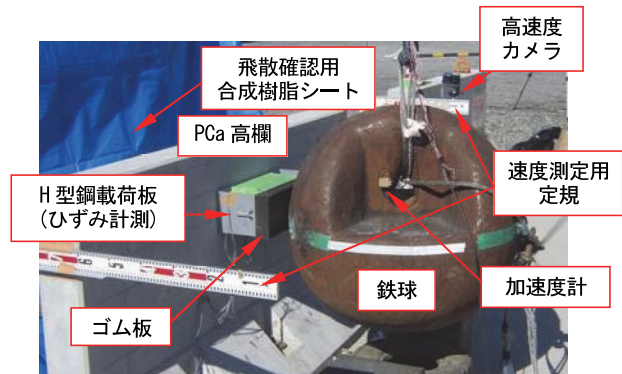


写真-8 計測器の配置状況

f. 試験結果

(a) 衝突荷重と高欄の耐力

表一八に、鉄球衝突試験の衝突荷重と鋼材（アンカー、とPCa 壁鉄筋（以下、壁筋））、および定着金具の降伏の有無を示す。表中の空白部は降伏していないことを示す。SB 種に相当する載荷高 5cm の試験ケースでは、全てのケースで主要な部材は降伏に至らず、塑性変形も生じなかった。110kN 程度までは、主要構造部材の降伏は見られなかった。また、静的載荷試験で求めた最大耐力を超える 200kN 以上の衝突荷重においては、アンカーや壁筋、定着金具などが降伏するが破断には至らず、PCa 高欄の転倒は生じなかった。

(b) 衝突時の飛散物について

写真一八のように、試験体背面に合成樹脂シートを敷設し、試験後の飛散物の有無を確認した。SB 種の衝突荷重に相当する載荷高 5cm の試験ケースでは、コンクリート片などの構成部材の飛散物は認められなかった。

破壊荷重を想定した載荷高 100cm および 150cm 試験ケースにおいても、背面に顕著な損傷は見られず、構成部材の飛散物は確認されなかった。飛散防止用に繊維入りのケース（TD-3）と繊維シートを施したケース（TD-4）の試験を実施したが、飛散対策なし（TD-2）でも飛散が見られなかったため、有意な差は確認できなかった。

(c) ひび割れの発生状況

写真一九に、各試験体のひび割れ発生状況を示す。載荷高 100cm では、地覆部に損傷が集中的に発生し、壁には顕著な損傷は生じなかった。静的載荷試験と鉄球衝突試験で概ね同じ傾向を示した。全ての試験体で、壁背面および床版にひび割れは生じなかった。

4. 結論

開発した PCa 高欄の性能に関して、静的載荷試験と鉄球衝突試験により十分な強度性能を確認した。以下に結論を示す。

- i. PCa 高欄は SB 種相当の衝突荷重に対して、主要な部材に塑性変形が生じず、十分な耐力を有する
- ii. PCa 高欄（直壁型・フロリダ型）は SB 種相当の衝突荷重の 2 倍以上の強度性能を有する
- iii. PCa 高欄は、SB 種を超える衝突荷重に対しても、壁部に大きな損傷は生じず、構成部材の飛散を防止できる

5. あとがき

本 PCa 高欄は、石川島建材工業株式会社と共同研究で開発した。高い安全性が確認されているフロリダ型に対し、直壁型は衝突実験例が少ないため、今後は乗員の安全性能を確認した上で、実用化する予定である。

表一六 鉄球衝突試験体の概要

| 形式    | 試験体名 | 構造条件             |
|-------|------|------------------|
| 直壁型   | TD-1 | TS-1 と同仕様        |
|       | TD-2 | TS-2 と同仕様        |
|       | TD-3 | TD-2 の繊維入りタイプ    |
|       | TD-4 | TD-2 背面に繊維シートを埋込 |
| フロリダ型 | FD-1 | FS-1 と同仕様        |
|       | FD-2 | FS-2 と同仕様        |

表一七 鉄球衝突試験の計測項目一覧

| 計測項目  | 計測方法                     | 計測点数  |
|-------|--------------------------|-------|
| 衝突荷重  | ひずみゲージ                   | 1     |
| 衝突速度  | 高速度カメラ(1000 コマ/秒)        | 2     |
| 部材ひずみ | 水平変位を除き、静的載荷試験と同じ計測位置・点数 | 23~27 |

表一八 鉄球衝突試験結果の一覧

| 試験体名<br>タイプ  | 鉄球<br>載荷高<br>高さ<br>(cm) | 衝突<br>荷重<br>(kN) | 鋼材降伏の状況 |    |             |    |      |    |
|--------------|-------------------------|------------------|---------|----|-------------|----|------|----|
|              |                         |                  | アンカー    |    | PCa 壁<br>鉄筋 |    | 定着金具 |    |
|              |                         |                  | 前段      | 後段 | 前段          | 後段 | 水平   | 鉛直 |
| TD-1<br>直壁   | 5                       | 77               |         |    |             |    |      |    |
|              | 10                      | 149              |         |    | 降伏          |    |      |    |
|              | 100                     | 欠測               |         |    | 降伏          | 降伏 |      |    |
| TD-2<br>直壁   | 5                       | 74               |         |    |             |    |      |    |
|              | 10                      | 111              |         |    |             |    |      |    |
|              | 100                     | 252              | 降伏      |    | 降伏          |    | 降伏   |    |
| TD-3<br>直壁   | 5                       | 79               |         |    |             |    |      |    |
|              | 10                      | 116              |         |    |             |    |      |    |
|              | 100                     | 295              |         | 降伏 | 降伏          |    | 降伏   | 降伏 |
| TD-4<br>直壁   | 5                       | 113              |         |    |             |    |      |    |
|              | 10                      | 186              |         | 降伏 |             |    |      |    |
|              | 100                     | 317              |         | 降伏 | 降伏          |    | 降伏   |    |
| FD-1<br>フロリダ | 5                       | 69               |         |    |             |    |      |    |
|              | 10                      | 105              |         | 降伏 |             |    |      |    |
|              | 100                     | 263              | 降伏      | 降伏 |             |    | 降伏   |    |
|              | 150                     | 231              | 降伏      | 降伏 |             |    | 降伏   | 降伏 |
| FD-2<br>フロリダ | 10                      | 131              |         |    |             |    |      |    |
|              | 100                     | 205              | 降伏      | 降伏 |             |    | 降伏   | 降伏 |
|              | 150                     | 238              | 降伏      | 降伏 |             |    | 降伏   | 降伏 |



(直壁型 TD-2) (フロリダ型 FS-1)  
写真一九 ひび割れ発生状況（載荷高 100 cm）

【参考文献】

- 1) 首都高速道路（株）、「首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会 報告書」、2013.1
- 2) (社) 日本道路協会、「防護柵の設置基準・同解説」、2008.1
- 3) (社) 日本道路協会、「車両用防護柵標準仕様・同解説」、pp115、2004.3