

## 〔論文〕プレキャスト高欄の耐荷性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE STRENGTH OF  
PRECAST CONCRETE RAILING竹中 裕文<sup>1)</sup>Luiza H. ICHINOSE<sup>2)</sup>佐古喜久男<sup>3)</sup>谷岸 淳一<sup>4)</sup>奥原 光<sup>5)</sup>

## SYNOPSIS

Najima Ramp Bridges is a series of 6 simply supported and 2 continuous composite girder bridges, in which precast concrete slabs were applied together with precast concrete railings.

In order to investigate the behavior of the joints between the slabs and the railings, as well as their durability, a series of experiments were carried out. The present paper is a report on the results of the static and impact loading tests, carried out on full-scale specimens.

## 1. まえがき

福岡北九州高速道路公社が多々良川上に建設中の名島ランプ橋では、当社が開発したPPCS工法<sup>1)~8)</sup>が全面的に採用されている。プレキャスト床版（以下、PC床版という）にプレキャストコンクリート高欄（以下、PC高欄という）を組み合わせると、より一層の工期の短縮が図れることは十分に予想されることである。近年の熟練技能者の減少化傾向は今後も急速に進むものと思われ、上述のようなプレハブ化による工事の省力化を試みていくことも重要である。

このような観点から、今回、本橋においてPC高欄の採用が検討された。しかしながら、PC高欄の耐荷性に関するデータはほとんどなく、理論的に解明することも困難であると考えられた。そこで、実物大の供試体を製作し、静的載荷実験および重すいを用いた衝撃破壊実験を行って、PC高欄の構造、PC床版との接合法および耐荷性等に関して検討を加えた。その結果、場所打ちの鉄筋コンクリート高欄（以下、RC高欄という）と同等以上の耐荷性能を有していることが確認された。

## 2. 実験目的

PC高欄は、文献<sup>2)</sup>等も参考にして高欄本体の構造詳細やPC床版との接合方法に関し、種々の検討を加えて設計している。しかしながら、とくにPC高欄とPC床版との接合部の耐荷性についてはデータがほとんどなく、また理論的に解明することも困難であると考えられた。そこで、実物大の供試体を用いて下記の実験を行い、力学的特性や安全性に関する資料を得ることとした。

## 2.1 静的載荷実験

風荷重に相当する水平荷重をPC高欄に作用させて、PC高欄の水平変位、PC床版との接合部の挙動等の力学的特性を調べ、構造詳細等をさらに詳しく検討するための資料とすることとした。

## 2.2 衝撃破壊実験

重すいを用いてPC高欄に水平方向の衝撃荷重を与え、PC高欄本体、接合部およびPC床版の損傷状況、破壊荷重および破壊パターン等を調べ、最終的な構造詳細や使用材料等を決定するための参考とするとともに、衝突に対する安全性を確認することとした。

## 3. 実験方法

## 3.1 実験供試体

供試体としては、従来の場所打ちRC高欄とPC高欄の2種類のものを、それぞれ1組ずつ製作した。

図-1には、供試体の全体概要を示す。厚さ21.0cmのPC

1) 本店 設計技術部次長 技術士(建設部門) Hirofumi TAKENAKA

2) 本店 設計技術部 技術開発課 主任技師 Luiza H. ICHINOSE

3) 日本ハイブリッド工業(株) 取締役技術部長 Kikuo SAKO

4) 日本ハイブリッド工業(株) 技術部次長 技術士(建設部門) Jun-ichi TANIGISHI

5) 日本ハイブリッド工業(株) 技術部工事係長 Akira OKUHARA

およびRC床版は、コンクリート基礎上に4.7mの間隔で配置されたH形鋼に固定されている。床版と鋼桁との接合は、H形鋼の上フランジに溶植したスタッドを用いて行っている。なお、供試体コンクリート等の強度は、表-1に示すとおりである。

(1) PC高欄の構造およびPC床版との接合構造

図-2には、PC高欄の構造詳細を示す。PC高欄はブロック長が2.0mで、橋軸方向に500mmの間隔で2本ずつPC床版に埋め込まれている直径 $\phi$ -24mmのアンカーボルトで固定する構造とした。PC床版上にPC高欄を設置し位置の調整を行っ

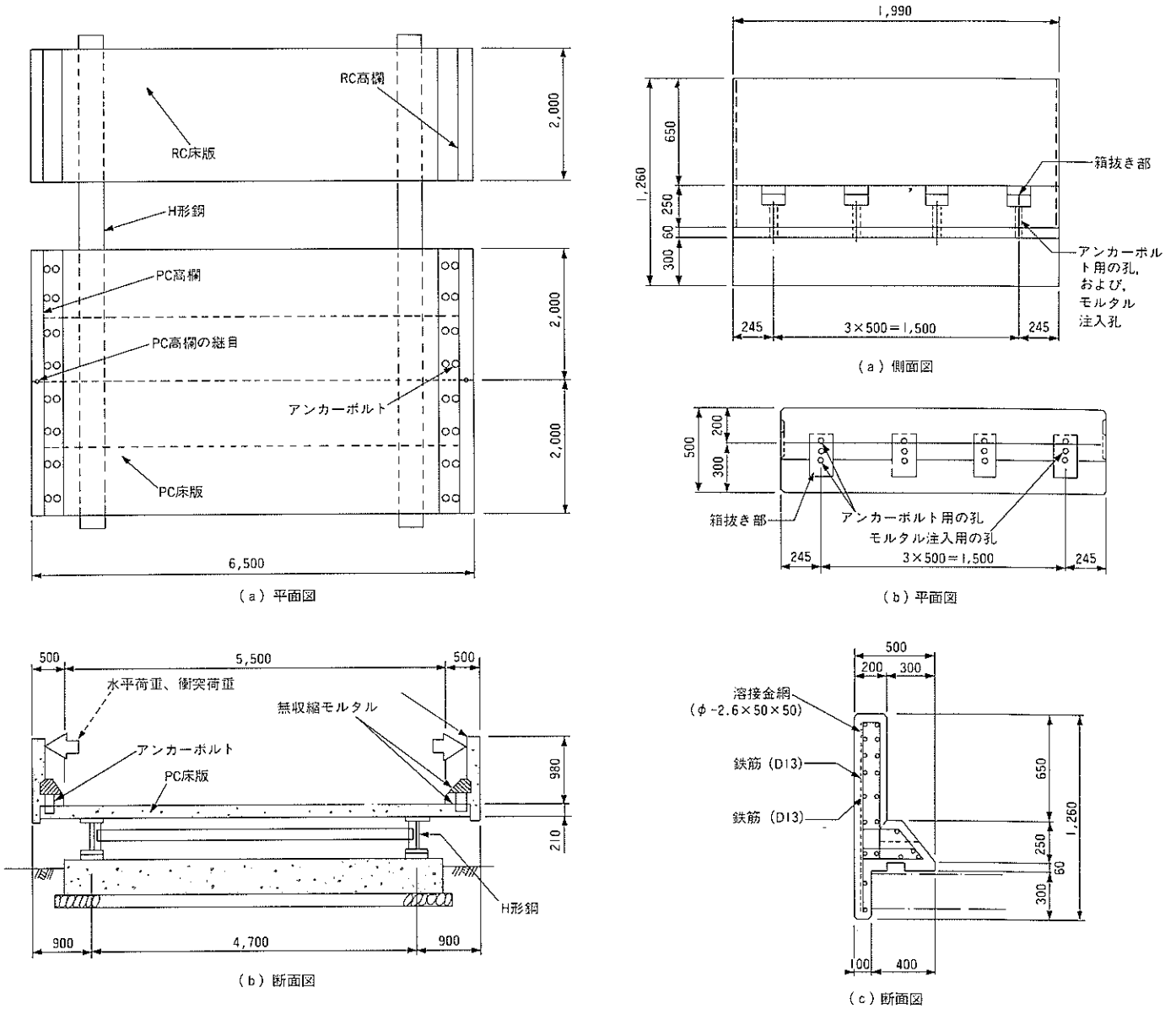


図-1 供試体の概要

表-1 供試体コンクリート等の圧縮強度

| 供試体  | 箇所   | 使用材料        | 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------|------|-------------|-----------------------------|
| PC高欄 | PC床版 | コンクリート      | 606                         |
|      | PC高欄 | コンクリート      | 404                         |
|      | 接合部  | 無収縮セメントモルタル | 658                         |
| RC高欄 | RC床版 | コンクリート      | 386                         |
|      | RC高欄 | コンクリート      | 309                         |

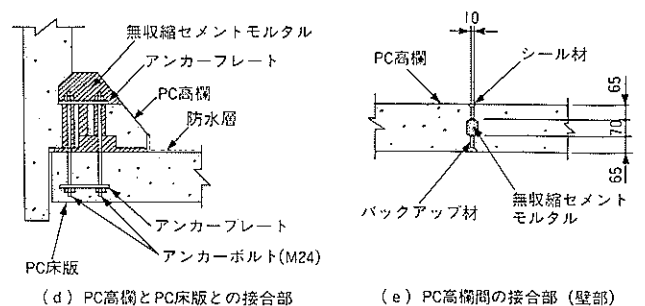


図-2 PC高欄の構造詳細 (寸法単位:mm)

た後、高欄の箱抜き部に設けられた注入孔から無収縮セメントモルタルを流し込んで充填した。もちろん、充填が十分に行われたことは、型枠を取りはずした際に確認している。また、PC高欄間の接合部は、図-2 (e) に示すようにせん断キラーを設ける構造にしている。なお、高欄の外側には衝突時のコンクリート飛散防止のため溶接金網(φ-2.6mm×50mm×50mm)を配置している。

(2) RC高欄の構造

RC高欄は、公社の標準設計に基づいているが、主鉄筋を100mm間隔に配置したものと、200mm間隔に配置したものと2種類の供試体を製作した。

3.2 静的載荷実験

(1) 載荷方法

写真-1には、静的水平荷重の載荷状況を示す。左右の高欄間に鋼柱を横に渡し、荷重分配梁およびジャッキを介在させて、全ての高欄ブロックに等しい水平荷重が作用するようにした。その際、荷重の載荷位置は高欄天端より20cm下方とした。また、荷重は30回繰返して載荷し、その間の種々な力学的特性の変化も調べた。

本橋の高欄には高さ3.0mの防音壁が設置されるため、設計風荷重はかなり大きくなる。載荷水平荷重の最大値は、上述の設計荷重によるPC高欄とPC床版との接合部における曲げモーメントが作用するように定めた。表-2には、静的水平荷重の載荷ステップを示す。

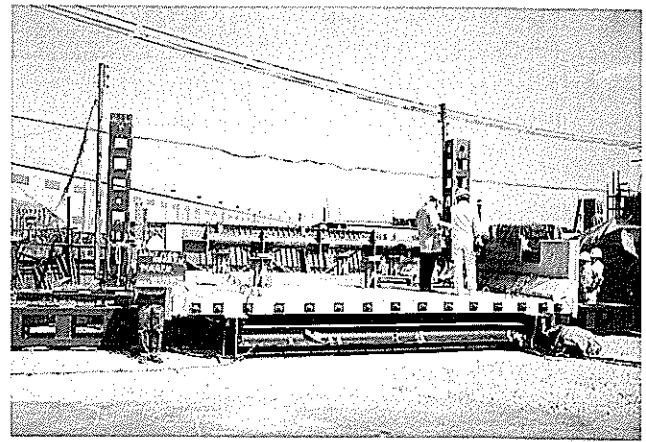


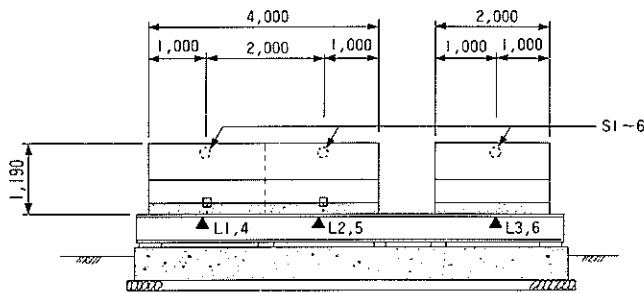
写真-1 静的載荷実験の状況

表-2 (a) 静的荷重の載荷ステップ(PC高欄)

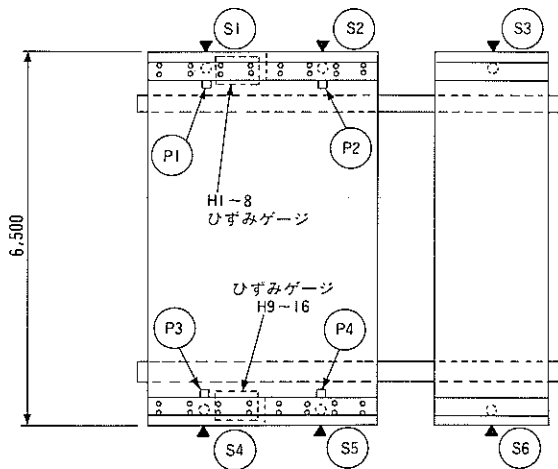
| 載荷No. | 載荷ステップ (tf)   |
|-------|---|
| 1     | 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 11.3, 10.0, 6.0      |
| 2~3   | 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 11.3, 10.0, 6.0           |
| 4~29  | 2.0, 11.3   |
| 30    | 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 11.3, 10.0, 6.0, 2.0, 0.0 |

表-2 (b) 静的荷重の載荷ステップ(RC高欄)

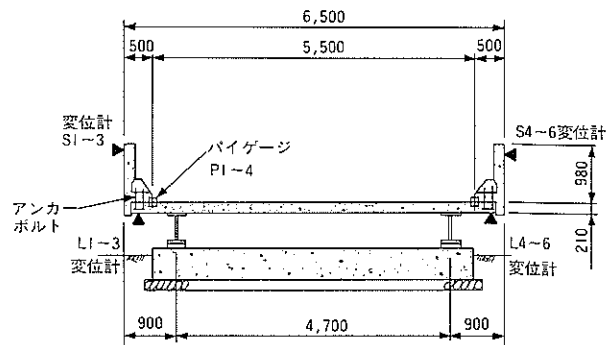
| 載荷No. | 載荷ステップ (tf)                  |
|-------|------------------------------|
| 1     | 0.0, 2.0, 4.0, 5.7, 4.0, 2.0 |
| 2~3   | 2.0, 4.0, 5.7, 4.0, 2.0      |
| 4~29  | 2.0, 5.7                     |
| 30    | 2.0, 4.0, 5.7, 4.0, 2.0, 0.0 |



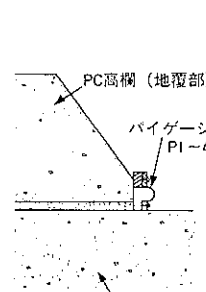
(a) 側面図 (A-A)



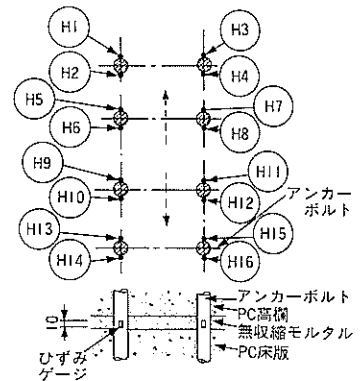
(b) 平面図



(c) 断面図 (PC高欄部)



(d) バイゲージ取付位置



(e) アンカーボルトのひずみ測定位置

図-3 計測位置

(2) 計測項目および方法

表-3には、計測項目を示す。また図-3には、これらの計測位置とそれらの記号とを示す。

表-3 静的載荷実験の計測項目

| 計測項目               | 計測器等           |
|--------------------|----------------|
| 高欄天端の水平方向の変位       | 変位計(ストレインゲージ型) |
| 床版先端の鉛直方向の変位       | 変位計( // )      |
| PC床版とPC高欄との接合部の開閉量 | パイゲージ( // )    |
| アンカーボルトの表面の軸方向ひずみ  | ストレインゲージ       |

3.3 衝撃破壊実験

衝撃破壊実験は、静的載荷実験が終了した後に実施した。

(1) 載荷方法

写真-2には、衝撃破壊実験中の状況を示す。衝撃荷重は、質量2.6tの重すいをクレーンで1点吊りし、所定の高さまで吊り上げた後に落下させる振り方式によって与えた。衝撃位置は、PC高欄間の継目部とし、PC床版上面から70cm上方の位置(高欄天端から28cm下方)に載荷板を取り付けて、衝撃荷重が分布するようにした。その際、載荷板の大きさは150mm(縦)×500mm(横)とした。

重すいの衝突は、高欄が破壊に至るまで落下高さを順次上げて行うこととした。今回は、静的水平荷重50tf(490kN)によるPC高欄およびPC床版のひずみエネルギーに等しい位置エネルギーを重すいに与え、その後自由落下させるときの衝撃荷重を設計衝突荷重とした。衝撃荷重の載荷条件を表-4に示す。

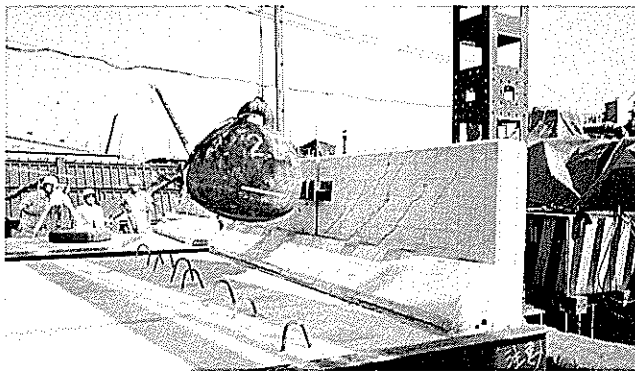


写真-2 衝撃破壊実験の状況

表-4 衝撃荷重の載荷条件

| 載荷No. | 落下高さ (cm) | 位置エネルギー (tf・m) |
|-------|-----------|----------------|
| 1     | 15.0      | 0.39           |
| 2     | 30.0      | 0.78           |
| 3     | 60.0      | 1.56           |
| 4     | 90.0      | 2.34           |
| 5     | 110.0     | 2.86           |

重すい質量：2.6t

(2) 計測項目および方法

本実験では、下記の項目について調査した。

- ① ひびわれの発生・進展状況の調査：高欄の表面に10cm角のマス目を描いておき、各載荷ごとに発生したひびわれを記録した。また接合部の変状についても観察を加えた。
- ② コンクリートの飛散量の測定：衝撃荷重を与える度に飛散ったコンクリート片を集めて、その重量を計測した。
- ③ 破壊荷重および破壊パターンの調査：最終的に高欄が破壊したときの重すいの位置エネルギーおよび破壊パターンを調べた。
- ④ アンカーボルトの動的ひずみの計測：重すいが衝突したときに生じるアンカーボルトのひずみを、動ひずみ計を用いて計測した。
- ⑤ 高欄の水平変位・加速度の計測：重すい衝突時の高欄の水平変位および水平方向の加速度を、それぞれ非接触型変位計および加速度計により測定した。

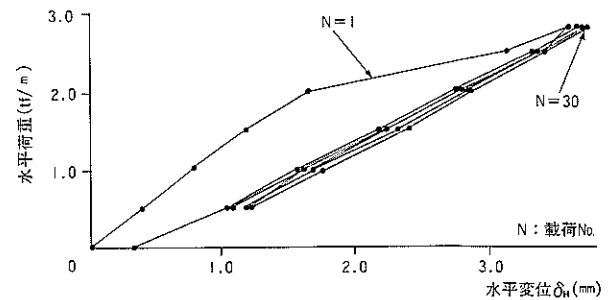
4. 実験結果とその考察

ここでは、実験結果の一部を示し、若干の考察を加えることとする。

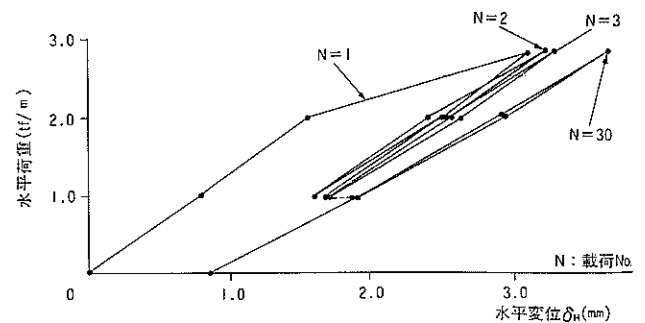
4.1 静的載荷実験結果とその考察

(1) 水平荷重と高欄天端の水平変位との関係

図-4には、PCおよびRC高欄天端の水平変位と水平荷重との関係の一例を示す。これらの図より、まずPC高欄においては、荷重が2tf/m(19.6kN/m)を越えるあたりから



(a) 荷重-PC高欄天端の水平変位関係



(b) 荷重-RC高欄天端の水平変位関係

図-4 水平荷重と高欄天端の水平変位との関係

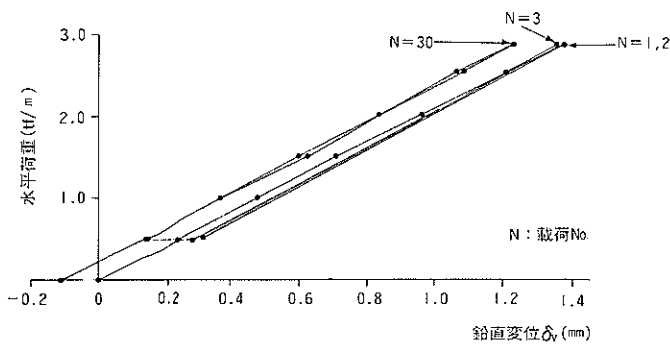
変位が急速に増大しており、上述の荷重を境に剛性が低下したことがわかる。しかしながら、繰返し载荷に伴う変位の増大はほとんどみられず、2回目以後の载荷に対しては、荷重と変位とはほぼ直線関係を保っており、30回载荷後の残留変位は0.3mmとなっている。

一方、RC高欄においても、荷重が2 tf/m (19.6kN/m) を越えると急速に変位が増大し、PC高欄の場合と同様の挙動を呈している。また水平変位量もほぼ同じであり、両者の剛性はほぼ等しいものと思われる。ところが、繰返し载荷に伴って変位が斬増する傾向がみられ、ひびわれの進展等によって剛性が徐々に低下しているように思われる。また最終的な残留変位は、PC高欄の2.5倍 (0.75mm) もあり、PC高欄に比べると復元性が小さいことがわかる。

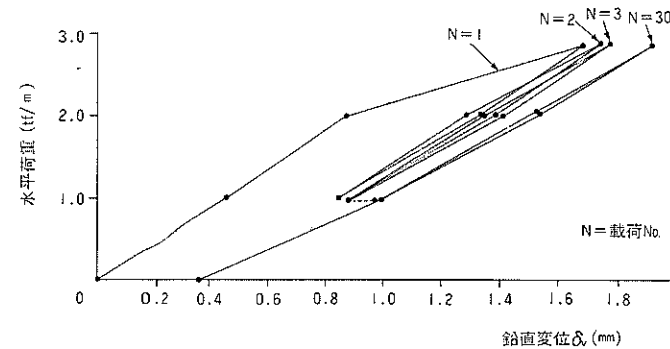
(2) 水平荷重と床版先端部の鉛直変位との関係

図-5には、荷重と床版先端部の鉛直変位との関係の一例を示す。荷重とPC床版先端の鉛直変位とはほぼ直線関係を保持している。また30回の繰返し载荷後の残留変位は-0.1mm (上方への変位) 程度であり、復元性が非常に大きいことがわかる。もちろん、PC床版にはひびわれは発生しなかった。

一方、RC床版先端の鉛直変位は、図-5 (b) に示すように、荷重2 tf/m (19.6kN/m) を越えた付近で急増し、载荷の繰返しに伴って徐々に増大していく傾向がみられる。残留変位は0.4mmあり、PC床版とは異なる挙動を呈すること



(a) 荷重-PC床版先端の鉛直変位関係



(b) 荷重-RC床版先端の鉛直変位関係

図-5 水平荷重と床版先端の鉛直変位との関係

がわかった。また、RC床版上面にはひびわれが発生した。

(3) PC高欄とPC床版との接合部の挙動

図-6には、水平荷重とPC高欄の接合部(無収縮モルタル充填部)の開閉挙動との関係を例示する。1回目の载荷において、荷重が2 tf/m (19.6kN/m) 以上になると開き量が急増しており、最大の開き量は、0.7mm程度である。無

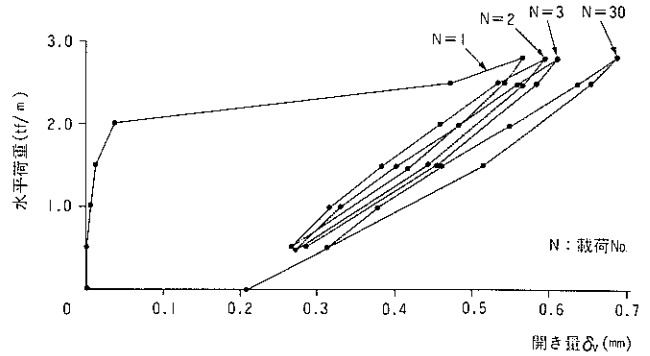
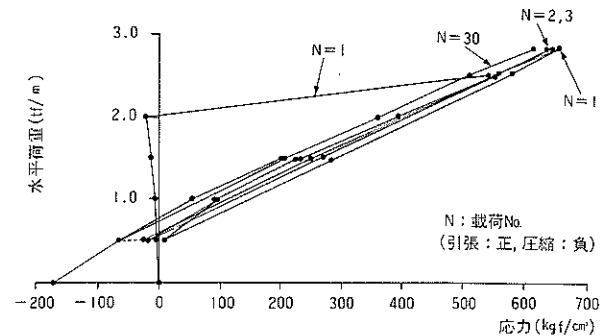
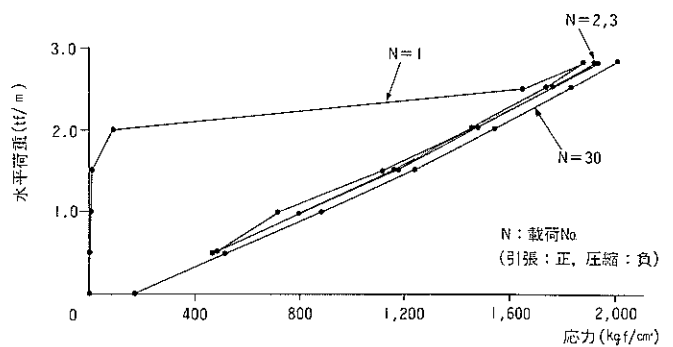


図-6 水平荷重とPC高欄接合部の開閉挙動との関係



(a) 荷重-応力関係(A点)



(b) 荷重-応力関係(B点)

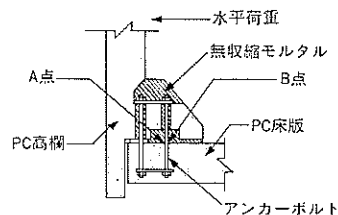


図-7 水平荷重とアンカーボルトの表面応力との関係

収縮モルタル充填部のひびわれ、あるいは、コンクリート部との境界面での剝離が目視によっても確認されている。2回目以後の荷重に対しては徐々に接合部の開き量が増大する傾向がみられ、最終的な残留開き量は0.2mm程度であった。これらのことから、PC高欄の接合部分には、設計荷重以下の荷重でひびわれ、あるいは、剝離が生じるものと考えられる。

(4) 荷重とアンカーボルトの応力との関係

図-7には、水平荷重とアンカーボルトの表面応力との関係の一例を示す。これまでの結果と同様に、1回目の載荷においては荷重が2tf/m (19.6kN/m) までは発生する応力も小さく、弾性的な挙動を呈している。しかしながら、2tf/m (19.6kN/m) を越えると、突然大きな応力が応生しており、荷重に抵抗する断面が急変したことがわかる。抵抗断面が急変した後は再び弾性的な挙動をしており、新たなこの抵抗断面は設計風荷重に対して弾性範囲内で抵抗しているものといえよう。アンカーボルトの表面応力の最大値は、約2,000kgf/cm<sup>2</sup> (196MPa) であるが、これらの表面応力を内側(引張側)のアンカーボルトの軸力に換算すると約1300kgf/cm<sup>2</sup> (127MPa) となる。また、これらの図から、アンカーボルトには軸方向力とともに曲げモーメントも作用していることがわかる。

以上のことから、実験では材質SS41のアンカーボルトを用いたが、実橋ではもう少し許容応力度の大きなものを使用することとした。

4.2 衝撃破壊実験結果とその考察

(1) 破壊パターンおよび破壊荷重

表-5には、衝撃破壊実験結果の概要を示す。また図-8には、ひびわれや損傷の状況を例示する。さらに、写真-3~5には、最終的な破壊状況を示す。これらの結果から、まず設計荷重50tfに対応する衝突に対しては、ひびわれが発生した程度で損傷は極めて軽微であり、十分な耐荷力を保有していることが確認された。これはRC高欄においても同様である。つぎに、最終的にPC高欄を破壊に至らしめた重すい位置エネルギーは、2.34~2.86tfm (22.9~28.0kJ) であり、設計荷重に対応する位置エネルギーの約3~3.7倍であることがわかった。PC高欄は、写真-3および4に示すように、破滅的な破壊には至らなかったものの、高欄の壁部分でせん断破壊が生じるとともに、接合部が大きく開いた。実験終了後、アンカーボルト付近のコンクリートを取除いて変状等の有無を調べたが、ボルトは破断していなかった。RC高欄は、写真-5に示すように、かなり大きな水平変位が残留するとともに、壁部分が鉛直方向に沿って大きく2つに裂けて破壊した。

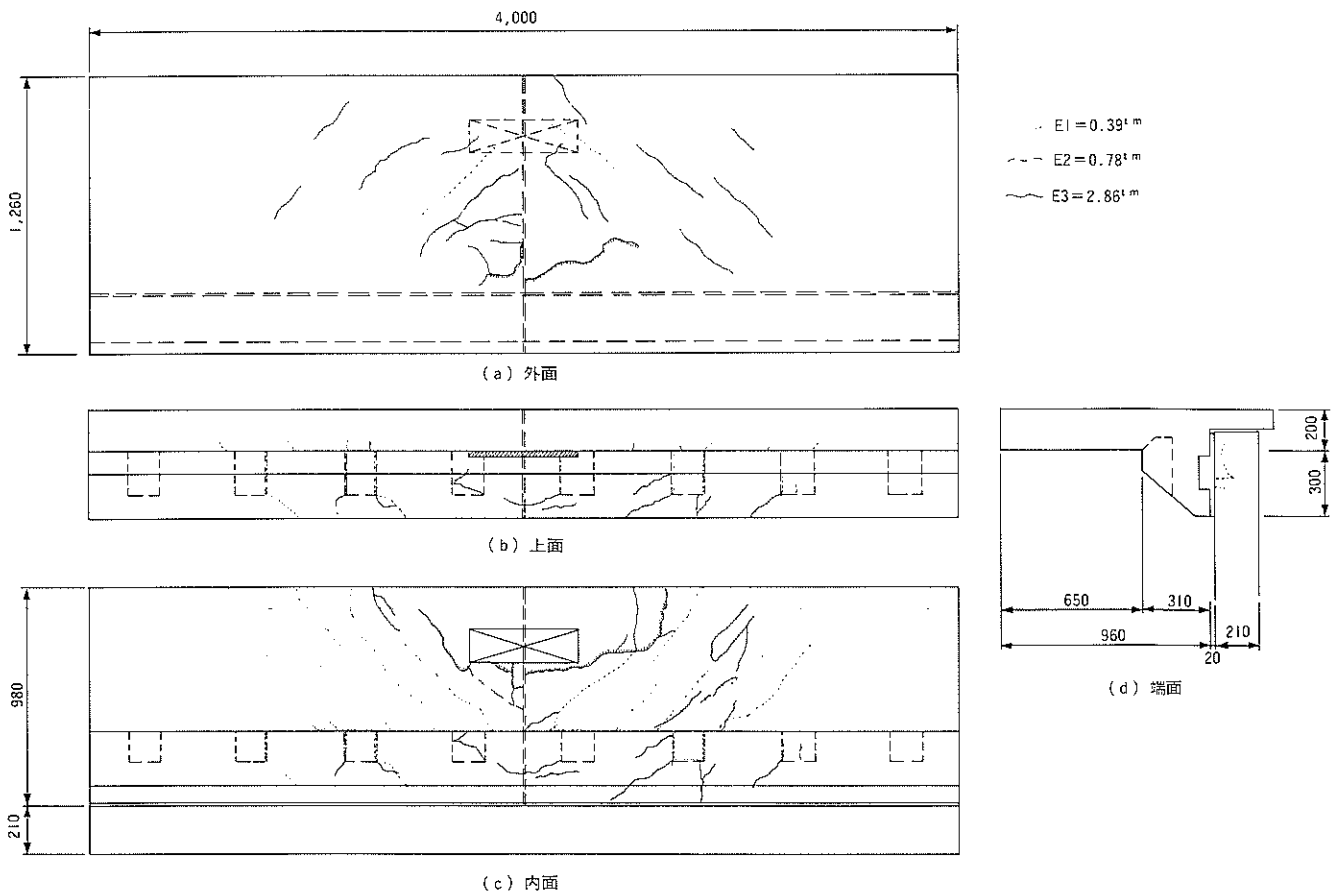


図-8 PC高欄の損傷状況の例

表-5 実験結果の概要

| 供試体           | 載荷 No. | 落下高さ (cm) | 位置エネルギー (tjm) | 損傷概要                                    | コンクリート飛散量 (kg) |
|---------------|--------|-----------|---------------|---|----------------|
| PC高欄 (Type-A) | 1      | 15        | 0.39          | ・高欄部にひびわれ発生                             | 0              |
|               | 2      | 30        | 0.78          | ・高欄部ひびわれ進展<br>・床版先端部にひびわれ発生             | 0              |
|               | 3      | 60        | 1.56          | ・ひびわれ進展                                 | 0              |
|               | 4      | 90        | 2.34          | ・高欄部内側のせん断損傷大<br>・接合部ひびわれ大<br>・高欄の水平変位大 | 0              |
| PC高欄 (Type-B) | 1      | 15        | 0.39          | ・高欄部にひびわれ発生                             | 0              |
|               | 2      | 30        | 0.78          | ・ひびわれ進展                                 | 0              |
|               | 3      | 110       | 2.86          | ・壁部せん断破壊<br>・接合部ひびわれ大<br>・高欄の水平変位大      | 0              |
| RC高欄 (Type-A) | 1      | 15        | 0.39          | ・高欄、床版部にひびわれ発生                          | 0              |
|               | 2      | 30        | 0.78          | ・ひびわれ進展                                 | 0              |
|               | 3      | 60        | 1.56          | ・ //                                    | 0              |
|               | 4      | 90        | 2.34          | ・壁部せん断破壊<br>・床版先端部破壊<br>・変形が極めて大きい      | 19.2           |
| RC高欄 (Type-B) | 1      | 15        | 0.39          | ・高欄、床版部にひびわれ発生                          | 0              |
|               | 2      | 30        | 0.78          | ・ひびわれ進展                                 | 0              |
|               | 3      | 60        | 1.56          | ・ //                                    | 0              |
|               | 4      | 90        | 2.34          | ・壁部せん断破壊<br>・床版先端部破壊<br>・変形が極めて大きい      | 2.1            |

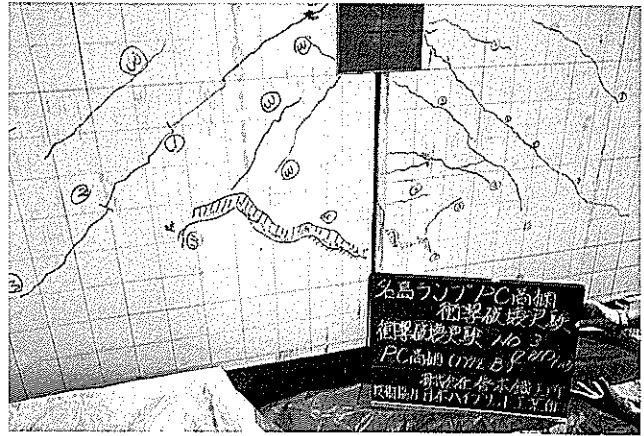


写真-3 PC高欄の損傷状況(1)

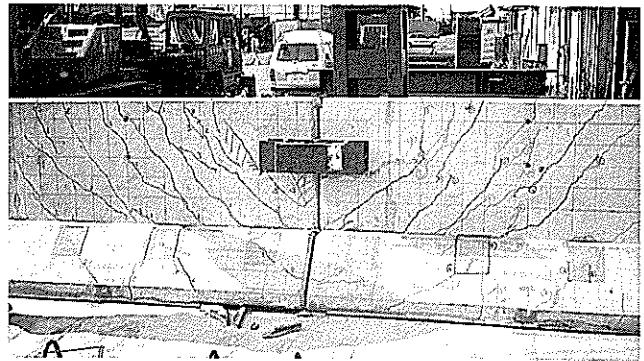


写真-4 PC高欄の損傷状況(2)

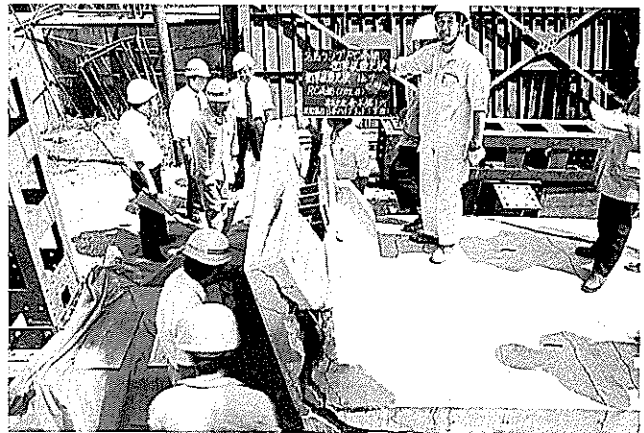
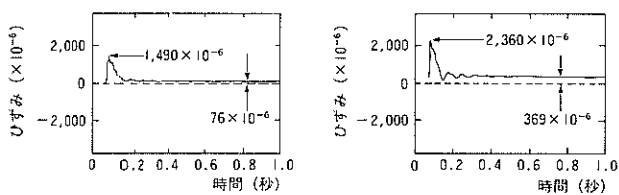
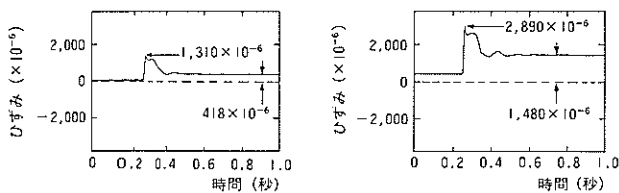


写真-5 RC高欄の破壊状況



(a) 落下高さ30cmのときのアンカーボルトのひずみ



(b) 落下高さ110cmのときのアンカーボルトのひずみ

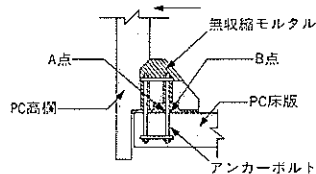


図-9 アンカーボルトのひずみ挙動

衝突に伴うコンクリートの飛散は比較的少なく、これは、高欄の壁部に埋設した溶接金網の効果によるものと思われる。

なお、床版の端部は、ひびわれが発生するなどの損傷を受けたので、アンカーボルト付近には補強鉄筋を配置する必要がある。

(2) アンカーボルトのひずみ挙動

図-9には、落下高さ30cmおよび110cmのときの内側のア

ンカーボルトの表面ひずみの時間的変化を示す。この図から、設計荷重に対応する重すいの衝突に対して、 $2300 \times 10^{-6}$  および  $1500 \times 10^{-6}$  のひずみが生じていることがわかる。また、落下高さ110cmのときは、 $2890 \times 10^{-6}$  および  $1310 \times 10^{-6}$  のひずみが生じており、落下高さ30cmのときに比べてあまり大きな差異はないものの、残留ひずみは著しく大きくなっている。

これらのことから、最も大きな引張力の作用する内側のアンカーボルトは、設計荷重に相当する衝突に対して降伏領域に入っていたものと考えられる。

## 5. まとめ

本実験の結果から、下記の諸点が明らかとなった。

- ① PC高欄本体およびPC床版との接合部は、設計衝突荷重50tf (490kN) に対して十分な耐荷力を保有しているものと考えられる。
- ② PC高欄の破壊は、接合部におけるアンカーボルトの降伏を伴う高欄壁部のぜん断破壊であった。また、破壊に至った重すいの位置エネルギーは、2.34~2.86 t fm (22.9~28.0kJ) で、概ねこれまでの実験結果と一致している。
- ③ 重すいの衝突に伴うPC高欄のコンクリートの飛散は非常に少なく、これは高欄壁部の外側に埋設された溶接金網の効果によるものと思われる。
- ④ アンカーボルト (材質SS41) には、衝突荷重によって低荷重の段階で局部的な降伏が生じているものと考えられる。また、設計荷重に相当する衝突に対しては、最も大きな引張力の生じるアンカーボルトでは全断面が降伏領域に達しているものと思われる。
- ⑤ 設計風荷重によって、アンカーボルトには平均1700kg f/cm<sup>2</sup> (166.6MPa) 程度の応力が生じることがわかった。
- ⑥ PC高欄の接合部においては、1回目の水平荷重の載荷の際、設計荷重の50~70%の荷重で接合面にひびわれ、あるいは、コンクリートとモルタル間の剥離が生じた。しかしながら、2回目以後の繰返し載荷に対しては、弾性的な挙動を呈することがわかった。
- ⑦ RC高欄の静的挙動は、基本的にはPC高欄の挙動に近いものであった。
- ⑧ しかしながら、設計風荷重以下の荷重でRC床版上面にひびわれが発生し、水平荷重に対して弾性的な挙動が失われる傾向がみられた。
- ⑨ また、衝撃破壊実験においても、PC高欄に比較して非常に大きな損傷が生じた。

また、本実験の結果を参考にして、実際の構造詳細および使用材料等について検討を加えた結果、下記のとおりとすることとした。

- ① アンカーボルトの材質は、S35CNとすることとした。
- ② アンカーボルトおよびアンカープレート等には亜鉛メッキを施す。

- ③ PC床版内のアンカーボルト付近には、補強鉄筋を配置する。
- ④ PC高欄とPC床版との接合部の地覆内側の部分およびその近傍のPC床版上面には防水層を施す。

## 6. あとがき

本文では、実物大の供試体を用いたPC高欄の静的載荷実験および衝撃破壊実験結果の一部について報告した。

上述の実験結果から、PC高欄は十分実用に供しうものと考えられ、PC床版と組合せることによって、一層の工期短縮や省力化が図れるものと考えられる。したがって近年の熟練技能者不足対策としても有効であるといえよう。PC高欄は、コンクリート床版を有する橋梁だけでなく、今後、鋼床版橋等にも採用されていく可能性が高いものと思われる。

PC床版やPC高欄の製作・施工に関しては、別の機会に報告したいと考えている。

最後に、今回の実験に際して、ご指導、ご協力を賜った福岡北九州高速道路公社の関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 八木滋弘・石川啓造・藤正行・竹中裕文・重信孝臣：PPCS工法による空港通ランプ橋の設計と施工と現場実験、橋梁と基礎、1989年5月
- 2) 中井博編：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988年5月
- 3) 中井博・岸田博夫・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁の耐荷性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.31A、土木学会、1985年3月、pp.395-408
- 4) Takenaka, H., Kishida, H. and Nakai, H.: A Study on New Composite Girder using Prestressed Precast Concrete Slab by PPCS Method, Der Stanhlbau, 55Jahrgang, Heft 6, 1986, s. 165-174
- 5) Fujii, M., Nakai, H., Watanabe, E. and Takenaka, H.: Studies on Composite Girder Bridges using Prestressed Precast Concrete Slabs, Seminar on Precast Concrete Construction in Seismic Zones, Japan Concrete Institute, Vol.2, Oct. 1986, pp. 239-258
- 6) Nakai, H., Takenaka, H. and Kita, H.: Durability of Composite Girder with Prestressed Precast Concrete Slabs under Moving Vehicle, Proc. of JSCE, NO. 386/I-8, Oct. 1987, pp. 95-103
- 7) Kita, H., Takenaka, H. and Nakai, H.: Durability of Composite Girders using Prestressed Precast Concrete Slabs under Moving Vehicle, Proc. of The 1st East Asian Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Jan. 1986, Vol. 1, pp. 680-692
- 8) 中井博・藤井学・渡辺英一・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ現象に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.33A、土木学会、1987年3月、pp.275-284