

# 新しいセンシング手法を用いた RCT 桁橋の 変形性状および残存耐荷力の評価

豊福晋ノ介\*・山口浩平\*\*・松田浩\*\*・海部貴裕\*\*\*

・杉江匡紀\*\*\*\*・梅本秀二\*\*\*\*\*

## Evaluation of structural characteristic identification based on the residual load capacity of RCT girder bridge using new sensing technique

by

Shinnosuke TOYOFUKU\*, Kohei YAMAGUCHI\*\*, Hiroshi MATSUDA\*\*, Takahiro  
KAIBE\*\*\*, Masaki SUGIE\*\*\*\* and Shuji UMEMOTO\*\*\*\*\*

Recent years, domestic bridges have attracted attention for maintenance. Inspection by proximity visual inspection is the mainstream as one of the present maintenance management methods. However, in close visual inspection, it is difficult to clearly judge the bridge's "safety", and "need for closing". It is propose a maintenance method using identification of structural characteristic as one of the solutions. Structural property identification is a method to evaluate the performance and risk of the target bridge by analyzing and comparing data by both experimental method and analytical method.

In this paper, it was examined the applicability to the structural characteristic identification about the degraded RCT girder bridge. In the process of the experimental method of this structural characteristic identification, the utility by new technology was also examined.

**Key words:** *Structural characteristic identification, RCT girder bridge, maintenance method  
, Strain visualization sheet, FEM analysis.*

### 1. はじめに

戦後急速に道路交通網が整備され、現在では全国に約 70 万橋の橋梁が存在している。このうち、建設後 50 年を超えた橋梁の割合は 2013 年では約 20%であったが、2023 年には約 40%、2033 年には約 70%にも増加する事態となるため、近年橋梁の長寿命化や維持管理に注目が集まっている<sup>1)</sup>。

維持管理における近接目視では、損傷や腐食等の材

料劣化や外観変状がわかるのみで、「安全性」・「落橋の可能性」・「通行止めの必要性」・「補修の必要性」を明確に判断することは難しい。この解決方法として、Fig.1 に示す構造特性同定を提案する。構造特性同定とは、解析的手法と実験的手法によるデータを分析・比較することによって、対象橋梁の性能・リスク評価する方法である。そこで本研究では、RC 橋を対象として、実橋梁の構造特性同定への適用性を検討すること

---

平成\*\*年\*\*月\*\*日受理

\* 大学院工学研究科総合工学専攻 (Graduate student, Department of Advanced Engineering)

\*\* 大学院工学研究科システム科学部門 (Division of System Science)

\*\*\* 日本工営株式会社 (NIPPON KOEI CO.LTD) 研究時大学院工学研究科前期博士課程学生

\*\*\*\* 株式会社富士ピー・エス (Fuji P.S Corporation)

\*\*\*\*\* 株式会社計測リサーチコンサルタント (KEISOKU RESEARCH CONSULTANT Corporation)

を目的とする。

また、この構造特性同定の実験的手法の過程で、実橋梁において新技術による各種計測法を用い、そのユーザビリティや汎用性などについても検討する。本実験の計測においては、従来の計測機器（接触式変位計、ひずみゲージ）を用いるとともに、新技術による計測機器を用いた。従来の計測機器を比較値として新技術による計測機器の精度検証を行い、その有用性について検討した。

## 2. 対象橋梁および载荷試験の概要

対象橋梁は上り線が鉄筋コンクリート T 桁橋、下り線が鉄筋コンクリート床版橋で構成される単径間の橋梁である。本稿では鉄筋コンクリート T 桁橋のみを対象とし、今後は橋梁 A と呼称する。橋梁 A の詳細を Fig. 2, Table. 1, Table. 2, Photo. 1, Photo. 2 に示す。橋梁 A は詳細な設計図は残っておらず、中桁 (G2~G6) は昭和 29 年に架設され、耳桁 (G1,G7) は昭和 34 年に増設された。架設時期が 5 年の差があるにも関わらず、耳桁 (G1,G7) が中桁 (G2~G6) よりも損傷が著しく見られた。

橋梁 A に関して弾性域における構造特性同定への適用性を検討するために、実橋梁载荷試験を行った。また、橋梁 A の塑性域における破壊メカニズムを把握するために、最小単位である主桁を用いて、切断桁载荷試験を行った。変位・ひずみ・耐荷力の観点に着目して、材料や架設時期が異なる G1, G3 の残存耐荷力を検討した。さらに、この実験的手法の過程で以下の計測機器を用いた。実橋梁载荷試験では、サンプリングモアレカメラ（以下：SMC）、ひずみ可視化シート（以下：SVS）、切断桁载荷試験では、これらに加えてデジタル画像相関法（以下：DICM）など新技術による計測機器を用いた。新技術による計測機器が弾性域・塑性域どちらにも適用できるかを検討した。

## 3. 実橋梁载荷試験による構造特性同定の検討

### 3.1 载荷条件

200kN のコンクリートブロック（100kN を 2 つ）を G4 の支間長中央（载荷ケース 1）、G7 の支間長中央（载荷ケース 2）に载荷した。この载荷位置の詳細を Fig. 3 に示す。

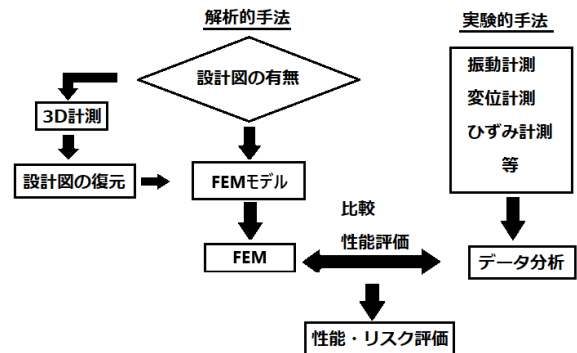


Fig. 1 構造特性同定の概要

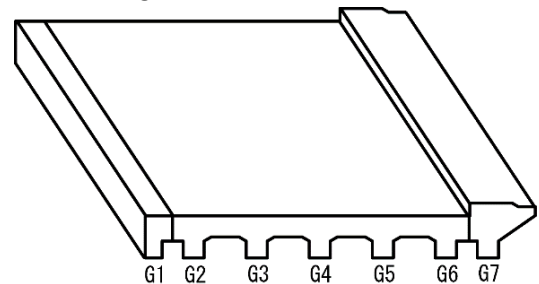


Fig. 2 橋梁 A の概略図

Table. 1 橋梁 A の諸元

橋長	8.3(m)	斜角	44.45度
支間長	7.8(m)	架設年	昭和29年 (G1,G7は昭和34年に増設)
幅員	9.75(m)	適用示方書	昭和14年 1等橋 設計活荷重: 13t

Table. 2 各桁の詳細

主桁	G2~G6桁	G1・G7桁
架設年	昭和29年	昭和34年
コンクリート	玉砂利	碎石
鉄筋	丸鋼	異形鉄筋



Photo. 1 A 橋（桁下）



Photo. 2 A 橋（剥離・鉄筋露出）

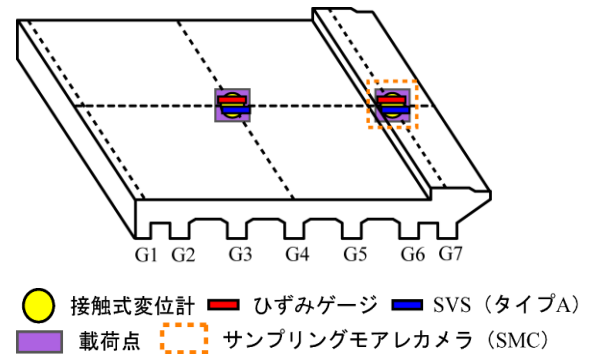


Fig. 3 載荷位置と測定位置図

### 3.2 変位・ひずみ計測

Fig. 3 に載荷位置と計測位置図を示す。新技術による計測法として、変位計測では SMC，ひずみ計測では SVS（タイプ A：Photo. 3）を用いた。SMC は計測物に設置した格子ターゲットを撮影し、その載荷前後の静止画像から変位を計測できる。SVS（タイプ A）は、目視による概略的な計測と静止画像解析による計測からひずみを算出することができる。本稿では、静止画像解析から算出したひずみのみ比較を行った。

載荷ケース 2 における G7 の支間長中央部の変位に関して、接触式変位計と SMC を比較したものを Fig. 4 に示す。また、載荷ケース 1 における G4 の支間長中央部のひずみに関して、ひずみゲージと SVS（タイプ A）を比較したものを Fig. 5 に示す。

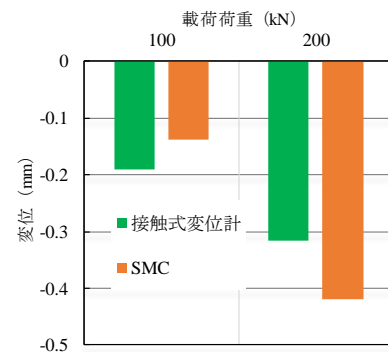


Fig. 4 変位の精度比較

### 3.3 数値解析

橋梁 A では詳細にモデル化したソリッド解析モデルを作成した。支持条件はピン（A1）/ローラー（A2）で、解析モデルに用いた材料特性を Table. 3 に示す。材料特性は G1, G3 から抜き出した鉄筋とコンクリートコアの強度試験から得た結果を反映させた。載荷ケース 1（200kN）における G1, G4, G7 の支間長中央部の変位に関して実験値，解析値を比較したものを Fig. 6 に示す。同様に、載荷ケース 2（200kN）における G1, G4, G7 の支間長中央部の変位に関しての実験値，解析値を比較したものを Fig. 7 に示す。



Photo. 3 SVS（タイプ A）

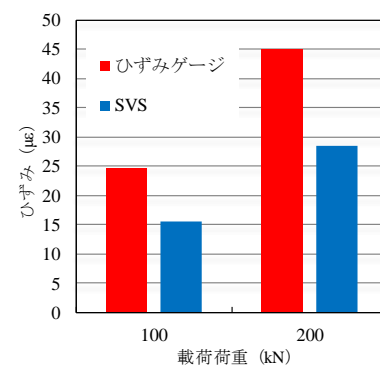


Fig. 5 ひずみの精度比較

Table. 3 材料特性

材料	コンクリート		鉄筋	
種類	G1, G7	G2-G6	G1, G7	G2-G6
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	17740	21150	191500	197400
単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	24.5	24.5	78.5	78.5
ポアソン比	0.139	0.171	0.3	0.3
降伏強度(kN/mm <sup>2</sup> )			357	310

### 3.4 結果および考察

Fig. 4 より，接触式変位計と SMC の差は約 0.1mm の範囲にあり，SMC は精度よく計測を行えた．Fig. 5 より，ひずみゲージと SVS（タイプ A）の差は $\pm 20\mu\epsilon$  の範囲にあり，SVS（タイプ A）は精度よく計測できた．Fig. 6, Fig. 7 より，実験値と解析値が概ね一致しており，弾性域において変位の観点から構造特性同定の可能性が示唆された．

## 4. 切断桁荷重試験による残存耐力の検討

### 4.1 荷重条件

実橋梁から切り出した切断桁 G1, G3 を用いて，静的荷重試験を行った．荷重方法は 2 点集中荷重で行い，曲げ破壊が先行するように荷重点をとった．荷重パターンはひび割れ発生荷重 (Pcr)，鉄筋降伏荷重 (Py) 到達時に一度除荷し，最終的に破壊荷重 (Pu) まで荷重した．この静的荷重試験における荷重位置および各種計測機器の計測位置の詳細を Fig. 8 に示す．

### 4.2 変位・ひずみ計測

切断桁の変位・ひずみの計測位置を Fig. 8 に示す．変位計測では DICM，ひずみ計測では DICM，SVS（タイプ A, B : Photo. 4）を用いた．DICM は，変形前後の計測物をデジタルカメラで撮影したデジタル画像を用い，解析することで広範囲の変位分布やひずみ分布が計測できる．SVS（タイプ A, B）は構造材料の塑性変形によるひずみやひび割れを構造色変化により可視化することができる<sup>2)</sup>．

各桁の中央部における変位に関して，接触式変位計，と DICM での計測結果を比較したものを G1 に関しては Fig. 9 に，G3 に関しては Fig. 10 に示す．G1 に関しては，鉄筋降伏荷重 (Py) に達した後除荷し，無荷重時から破壊までの計測を載せているため，残留ひずみが反映されている．荷重点上の鉄筋位置におけるひずみに関して，ひずみゲージ，DICM および SVS（タイプ A）を比較したものを G1 に関しては Fig. 11 に，G3 に関しては Fig. 12 に示す<sup>3)</sup>．DICM によって得られた各荷重段階における主ひずみ分布を Fig. 13 に示す．Fig. 13 におけるコンター図のレンジは 0 から 15000 に統一している．また，SVS（タイプ B）の変色の様子とその際の近傍にある鉄筋ひずみを Fig. 14, Fig. 15 に示す<sup>4)</sup>．

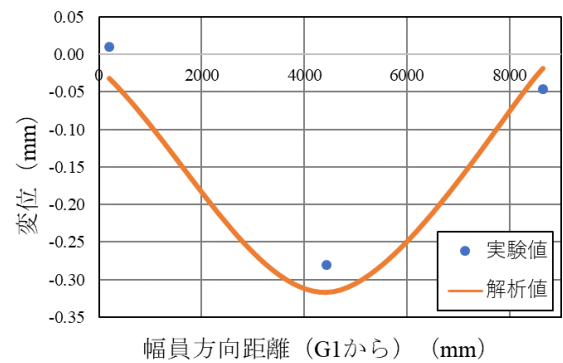


Fig. 6 主桁の変位分布（荷重ケース 1）

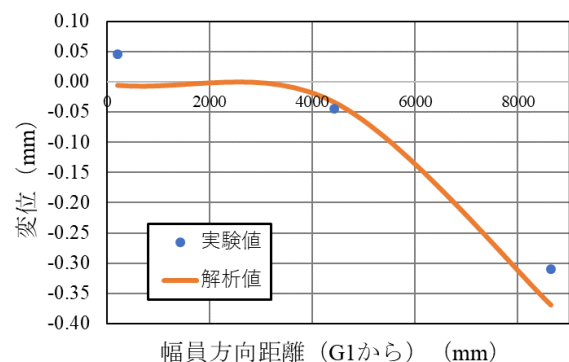


Fig. 7 主桁の変位分布（G7 荷重時）

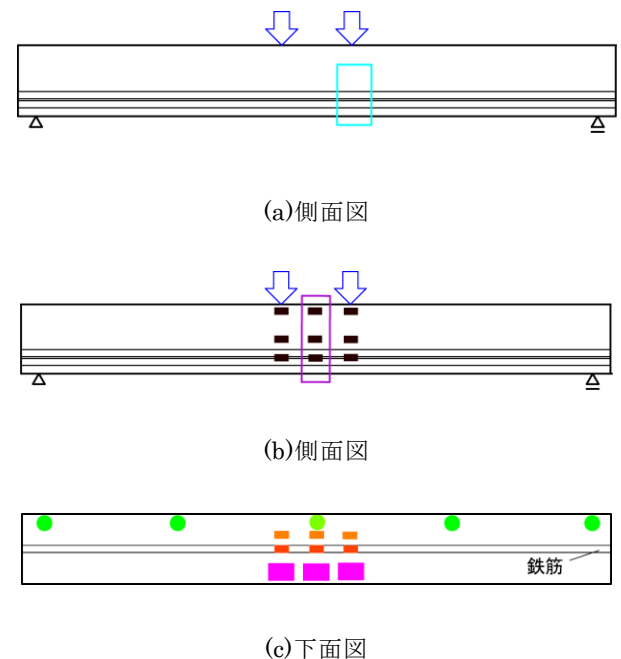


Fig. 8 切断桁の荷重位置および各種計測位置



Photo. 4 SVS (タイプ B)

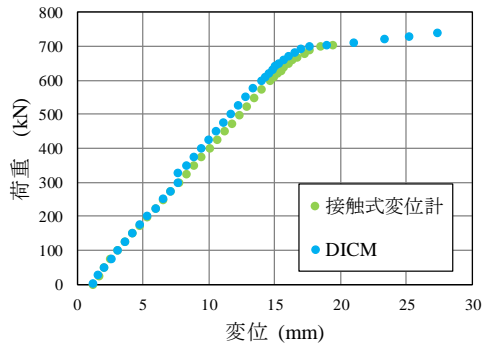


Fig. 9 荷重-変位関係 (G1)

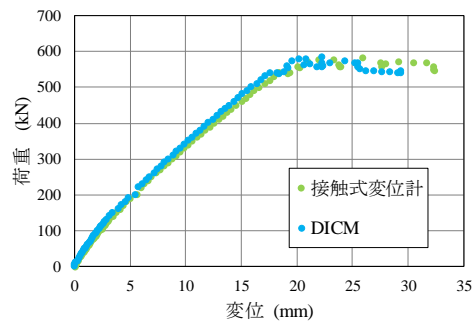


Fig. 10 荷重-変位関係 (G3)

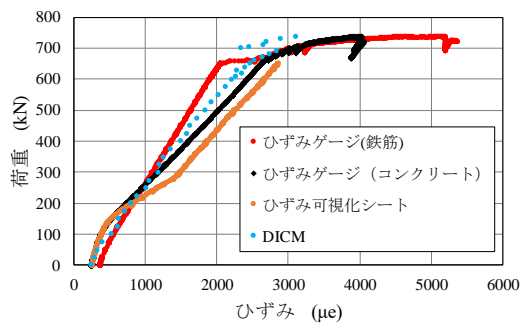


Fig. 11 荷重-ひずみ関係 (G1)

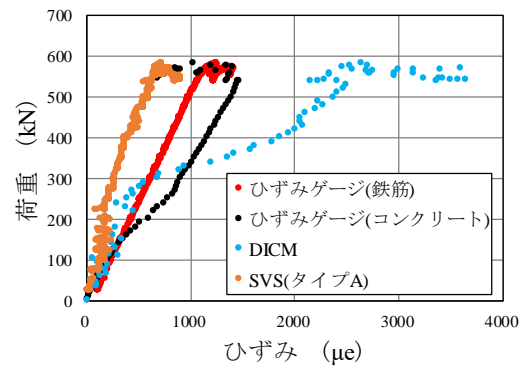
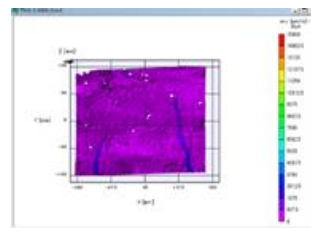
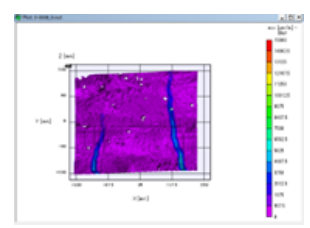


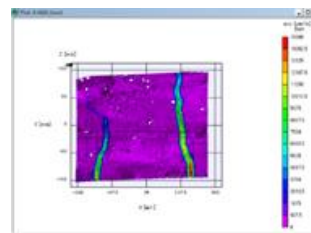
Fig. 12 荷重-ひずみ関係 (G3)



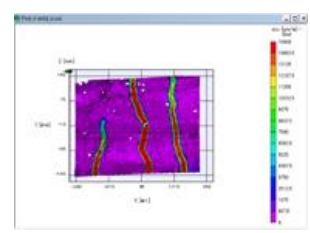
(a)100kN



(b)200kN



(c)500kN



(d)730kN

Fig. 13 コンター図

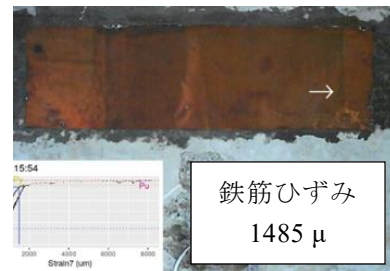


Fig. 14 ひずみによる変色出現時

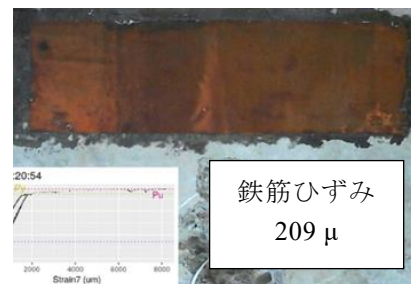


Fig. 15 ひずみによる変色消失時



#### 4.3 数値解析

切断桁を詳細にモデル化した 1/4 ソリッド解析モデルを作成した。また、材料特性は実橋梁と同様に Table. 3 と塑性域を考慮するために Table. 4 を用いた<sup>5)</sup>。G1, G3 のひび割れ発生荷重 (Pcr)、鉄筋降伏荷重 (Py)、破壊荷重 (Pu) に関して実験値、解析値を比較したものを Fig. 16, Fig. 17 に示す。

#### 4.4 結果および考察

Fig. 9, Fig. 10 より、接触式変位計と DICM の変位はほぼ一致しており、DICM は精度よく計測を行えたと判断できる。Fig. 11, Fig. 12 より、ひずみゲージ、SVS (タイプ A) 及び DICM のひずみは貼付位置が鉄筋上かコンクリート上かの違いによって多少の差は生じているが、同じ挙動であることから SVS (タイプ A) と DICM は精度よく計測できたと考えられる。Fig. 13 より、DICM を用いることによってひび割れの発生箇所やひび割れの進展方向、終局時のひび割れを可視化することができた。また、ひずみゲージでは計測不能の大ひずみを計測することができた。Fig. 14, Fig. 15 より、SVS (タイプ B) を用いることによって、ひび割れによる変色を約 1000 $\mu\epsilon$ で確認することができた。ひび割れによる変色後、除荷によって変色が消失してしまい、残留しなかった。変色が残留すれば、活荷重による瞬時に発生したひび割れを検知でき、点検・診断の際、ひび割れの発生箇所の把握に繋がると考えられる。Fig. 16, Fig. 17 より、実験値と解析値を比較すると、G1, G3 とともに約 10%の差であり、切断桁を解析上で再現できたと考えられる。また、実験値が解析値より大きいことから、G1, G3 とともに損傷による耐力力への影響が小さいと考えられる。

#### 5. 結果及び今後の展望

実橋梁載荷試験の結果から、橋梁 A の弾性域において解析上で再現でき、構造特性同定が適用できた。本研究では、荷重制限による通行の安全性を判断することを一つの目的としており、塑性域における破壊のメカニズムを把握する必要がある。そのために実橋梁の非線形解析を行い、変形状や破壊荷重を検討する。また、解析モデルの作成において精度向上を図るために、断面欠損などの損傷を考慮できる 3D 計測からのモデルを作成し、構造特性同定の適用性を再検討する。

切断桁載荷試験の結果から、G1, G3 とともに損傷による耐力力への影響が小さいと考えられる。これより実橋梁においても変位・ひずみ・耐力力の観点から、構造上問題がないことがわかった。

新技術による計測法において、従来の計測機器と概ね同じ精度で計測できたため、実橋梁を対象に新技術による計測が可能であるとわかった。しかし、野外で計測する際、日光など環境条件の影響によって SMC や DICM の計測ができなかった場合があったため、環境条件に対する対策を施す必要がある。

Table. 4 材料特性 2

主桁	臨界応力(N/mm <sup>2</sup> )	軟化係数(N/mm <sup>2</sup> )	圧壊ひずみ	せん断保持
G1	2	9710	0.0035	0.5
G3	1.88	10560	0.0035	0.5

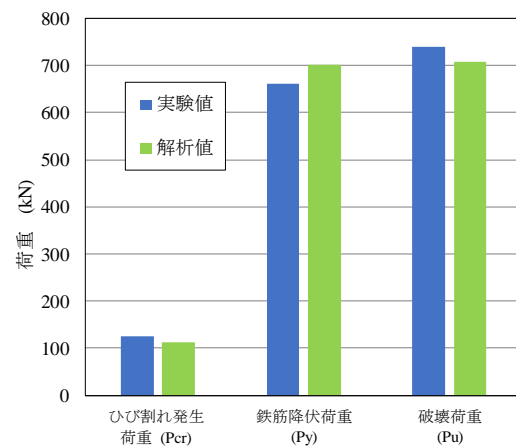


Fig. 16 耐力力の比較 (G1)

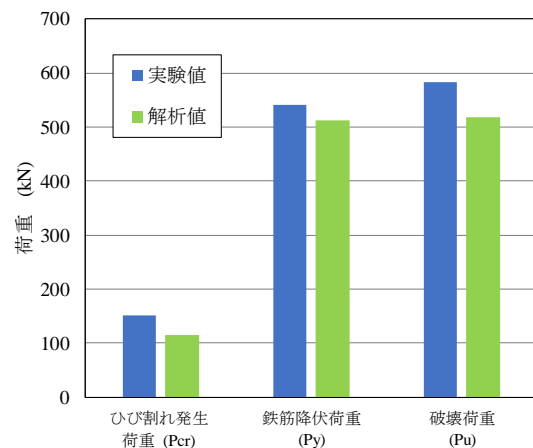


Fig. 17 耐力力の比較 (G3)

## 参考文献

- 1) 国土交通省 HP  
<https://www.kkr.mlit.go.jp/road/maintenance/roukyu/genjyou.html>
- 2) 不動寺浩：ひずみ可視化シートの社会インフラ分野への応用, Polymer Preprints, Japan Vol167, No.2, 2018
- 3) 国道34号線高縄手橋主桁の曲げ載荷試験ひずみ可視化シートによるひずみ計測, 2018.6
- 4) 高縄手橋切断桁載荷試験（G3）におけるひずみ可視化シートの変色挙動, 2019.1
- 5) 松田浩, 崎山毅, 森田千尋, 出水亨, 平嶋健太郎, 上野信一郎, 高崎憲太郎, 鶴田健：高耐久性埋設型枠を設置したRC梁の男性挙動解析, 長崎大学工学研究報告, 第30巻, 第55号, 平成12年7月