

# 鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂照査法における ひずみ集中補正係数の精度向上に関する再検討

田口 実季<sup>1</sup>・藤江 渉<sup>2</sup>・伊藤 諒祐<sup>3</sup>・葛 漢彬<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名城大学大学院 理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻  
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)  
E-mail: 193433004@ccmailg.meijo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名城大学大学院 理工学研究科社会環境デザイン工学専攻  
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)  
E-mail: 183443503@ccmailg.meijo-u.ac.jp

<sup>3</sup>名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)  
E-mail: 160448017@ccmailg.meijo-u.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)  
E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

鋼製補剛箱形断面橋脚を対象に、ひずみ集中補正係数の定式化について、板厚が薄い場合の解析ケースを増やし、ひずみ集中補正係数の精度向上を図った。まず、幅厚比パラメータ、板厚、細長比パラメータがひずみ集中補正係数に及ぼす影響について検討し、薄肉断面と厚肉断面に分けて、重回帰分析により、ひずみ集中補正係数の定式化を新たに行った。そこで、shell 解析とひずみ集中補正係数を適用した beam 解析による損傷度履歴と延性き裂発生時期の比較を行い、既往の研究で-30%の誤差があることにに対し、本研究では±20%以内となり、新しいひずみ集中補正係数を用いた場合延性き裂発生時期の予測精度が向上したことを確認した。

**Key Words:** ductile crack initiation, steel bridge pier, stiffened box section, strain concentration modification coefficient

## 1. 序論

1995年1月の兵庫県南部地震において、鋼製橋脚の基部や隅角部などのひずみ集中部に、低サイクル疲労により生じたと思われる脆性的な破壊が確認された<sup>1)</sup>。各設計指針において、脆性的な破壊を考慮した耐震設計法の整備が進められている<sup>2), 3)</sup>。耐震設計においては、脆性的な破壊のプロセスの第一段階に相当する、延性き裂発生を防止することが重要と考えられる。土木学会の2018年制定鋼・合成構造標準示方書[耐震設計編]<sup>3)</sup>(以降、学会示方書と略称)では、レベル2地震動に対する耐震性能Ⅱ、Ⅲの照査法の中で、地震動に対する構造安全性の照査項目の1つに低サイクル疲労破壊を挙げ、Miner則とManson-Coffin則による累積疲労損傷度(以降、損傷度と略称)を用いて照査を行うこととしている。また、鋼製橋脚に対しては、beam要素を用いたファイバーモデルによる有限要素解析(以降、beam解析と略

称)に適用可能な照査法が示されている<sup>3)</sup>。beam解析では、一般に局所的なひずみを得ることは難しいため、塑性ひずみ範囲にひずみ集中補正係数を乗じる方法が提案されており<sup>4)-6)</sup>、学会示方書においても同様の手法が推奨されている<sup>3)</sup>。ひずみ集中補正係数を導入した損傷度は次式で表される。

$$D = C \sum (\beta \cdot \varepsilon_{pr})^m \quad (1)$$

ここで、 $C$ 、 $m$ は材料定数であり鋼種により決定される。なお、本研究はSM490材を用いており、 $C = 9.69$ 、 $m = 1.86$ である<sup>3)</sup>。 $\varepsilon_{pr}$ は塑性ひずみ範囲であり、本研究ではレンジ法により算出する<sup>4)-6)</sup>。 $\beta$ はひずみ集中補正係数である。ひずみ集中補正係数について既往の研究がされており、無補剛箱形断面橋脚に対するひずみ集中補正係数の一般式が提案され<sup>4)</sup>、学会示方書にも示されており<sup>3)</sup>、次式で表される。

表-1 既往の研究<sup>6)</sup>の各解析パラメータ

| モデル名<br>$\bar{\lambda}$ - $R_f$ - $t$ | $\bar{\lambda}$ | $R_f$ | $t, t_s$<br>(mm) |
|---------------------------------------|-----------------|-------|------------------|
| 20-25-4                               | 0.20            | 0.25  | 4                |
| 20-35-4                               |                 | 0.35  |                  |
| 30-25-4                               | 0.30            | 0.25  |                  |
| 30-35-4                               |                 | 0.35  |                  |
| 40-25-4                               | 0.40            | 0.25  |                  |
| 40-35-4                               |                 | 0.35  |                  |
| 30-25-10                              | 0.30            | 0.25  | 10               |
| 30-35-10                              |                 | 0.35  |                  |
| 30-45-10                              |                 | 0.45  |                  |
| 40-25-10                              | 0.40            | 0.25  |                  |
| 40-35-10                              |                 | 0.35  |                  |
| 40-45-10                              |                 | 0.45  |                  |
| 50-25-10                              | 0.50            | 0.25  |                  |
| 50-35-10                              |                 | 0.35  |                  |
| 50-45-10                              |                 | 0.45  |                  |
| 30-25-20                              | 0.30            | 0.25  | 20               |
| 30-35-20                              |                 | 0.35  |                  |
| 30-45-20                              |                 | 0.45  |                  |
| 40-25-20                              | 0.40            | 0.25  |                  |
| 40-35-20                              |                 | 0.35  |                  |
| 40-45-20                              |                 | 0.45  |                  |
| 50-25-20                              | 0.50            | 0.25  |                  |
| 50-35-20                              |                 | 0.35  |                  |
| 50-45-20                              |                 | 0.45  |                  |
| 30-25-30                              | 0.30            | 0.25  | 30               |
| 30-35-30                              |                 | 0.35  |                  |
| 30-45-30                              |                 | 0.45  |                  |
| 40-25-30                              | 0.40            | 0.25  |                  |
| 40-35-30                              |                 | 0.35  |                  |
| 40-45-30                              |                 | 0.45  |                  |
| 50-25-30                              | 0.50            | 0.25  |                  |
| 50-35-30                              |                 | 0.35  |                  |
| 50-45-30                              |                 | 0.45  |                  |

$$\beta_u = 11.1R_f + 1.18\left(\frac{t}{9.0}\right) - 1.34\bar{\lambda} - 0.0751 \quad (2)$$

ここで、 $R_f$ = 幅厚比パラメータ、 $t$ = 板厚(mm)、 $\bar{\lambda}$ = 細長比パラメータである。これらのパラメータの詳細は後述する。また、無補剛箱形断面のひずみ集中補正係数を、補剛箱形断面に適用した場合、危険側に予測することが分かっているため<sup>5)</sup>、著者らは、補剛箱形断面橋脚に適用可能な、次式で表されるひずみ集中補正係数の一般式の提案を行った<sup>6)</sup>。

$$\beta_s = 37.0R_f + 1.78\left(\frac{t}{4.0}\right) - 16.3\bar{\lambda} + 1.02 \quad (3)$$

ここで、適用範囲は、 $0.25 \leq R_f \leq 0.45$ 、 $0.20 \leq \bar{\lambda} \leq 0.50$ 、 $4\text{mm} \leq t \leq 30\text{mm}$ である。

上記の補剛箱形断面橋脚に対するひずみ集中補正係数の一般式<sup>6)</sup>は、板厚  $t = 4 \sim 5\text{mm}$  のケースにおいて、後述

する図-10 に示すように、shell 解析結果と提案手法との誤差が、安全側ではあるが 30%程度となる場合があるなど、精度に課題がある。そのため、本研究では、板厚  $t = 4, 7\text{mm}$  といった、比較的薄い板厚の解析ケースを増やして、補剛箱形断面橋脚に対するひずみ集中補正係数の一般式の再検討を行い、精度向上を図る。

## 2. ひずみ集中補正係数の再検討

### (1) 解析概要

解析対象は、頂部に上部工重量に相当する一定圧縮力  $P$  および変動変位振幅の繰り返し水平変位  $\delta$  を受ける一様断面の単柱式鋼製補剛箱形断面橋脚である。表-1 に、既往の研究<sup>6)</sup>で検討した各解析パラメータをあらためて示す。寸法等は文献 6)を参照されたい。また、表-2 に、本研究で追加検討した解析パラメータと寸法等の具体的な数値を示す。本研究では、shell 解析において、損傷度が 1 に達するケースを対象とするため、幅厚比パラメータ  $R_f$ 、細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  の上限はそれぞれ 0.45、0.50 とした。しかし、板厚  $t = 4\text{mm}$ 、幅厚比パラメータ  $R_f = 0.45$  の場合の shell 解析において、局部座屈が早期に進展し、橋脚基部のひずみ集中が緩和され、損傷度が 1 に達しなかった。そのため本研究では、板厚  $t = 4\text{mm}$  の場合、幅厚比パラメータの上限を 0.40 としている。

幅厚比パラメータ  $R_f$ 、細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  は次のように表される。

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 \cdot k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (4)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (5)$$

ここで、 $b$ =フランジ幅 ( $B-t$ )、 $h$ =橋脚高さ、 $\sigma_y$ =降伏応力、 $E$ =弾性係数、 $\nu$ =ポアソン比、 $k$ =フランジ板の座屈係数  $= 4n^2$  ( $n$  はサブパネル数であり本研究では  $n = 3$ )、 $r$ =断面 2 次半径である。 $t_s$ =補剛材板厚  $= t$ 、 $b_s$ =補剛材長さである。軸圧縮力  $P$  と全断面降伏荷重  $P_y$  の比である軸力比  $P/P_y$  は、すべての解析モデルにおいて 0.1 とした。また、縦横比  $\alpha$  ( $= a/b$ 、 $a$  = ダイアフラム間隔、 $b$  = フランジ幅) は 0.5、補剛材の剛比  $\gamma/\gamma^*$  ( $\gamma$  = 縦補剛材剛比、 $\gamma^*$  = 線形座屈理論から求められる最適剛比) は 3.0 で統一した。 $\bar{\lambda}_s$  = 補剛材の細長比パラメータであり、次に示す式(6)~(8)で表される。

$$\bar{\lambda}_s = \frac{1}{\sqrt{Q}} \frac{a}{r_s} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (6)$$

表-2 本研究で追加検討した各解析パラメータ

| モデル名<br>$\overline{\lambda}-R_f-t$ | $\overline{\lambda}$ | $R_f$ | $t, t_s$<br>(mm) | $\alpha$ | $\gamma\gamma^*$ | $h$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $b_s$<br>(mm) | $\overline{\lambda}_s$ | $\overline{t}_f$<br>(mm) | $\overline{t}_w$<br>(mm) | $P/P_y$ | $H_y$<br>(kN) | $\delta_y$<br>(mm) |
|------------------------------------|----------------------|-------|------------------|----------|------------------|-------------|-------------|---------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|---------------|--------------------|
| 20-40-4                            | 0.20                 | 0.40  | 4                | 0.50     | 3.0              | 643         | 217         | 21            | 0.236                  | 4                        | 5                        | 0.10    | 117           | 1.64               |
| 25-25-4                            | 0.25                 | 0.25  |                  |          |                  | 494         | 136         | 19            | 0.149                  | 4                        | 6                        |         | 65            | 1.62               |
| 25-35-4                            |                      | 0.35  |                  |          |                  | 700         | 190         | 20            | 0.207                  | 4                        | 5                        |         | 87            | 2.34               |
| 25-40-4                            |                      | 0.40  |                  |          |                  | 803         | 217         | 21            | 0.236                  | 4                        | 5                        |         | 99            | 2.69               |
| 30-40-4                            | 0.30                 |       |                  |          |                  | 964         | 217         | 21            | 0.236                  | 4                        | 5                        |         | 85            | 4.02               |
| 40-40-4                            | 0.40                 |       |                  |          |                  | 1285        | 217         | 21            | 0.236                  | 4                        | 5                        |         | 67            | 7.50               |
| 50-25-4                            | 0.50                 | 0.25  |                  |          |                  | 988         | 136         | 19            | 0.149                  | 4                        | 6                        |         | 36            | 7.25               |
| 50-35-4                            |                      | 0.35  |                  |          |                  | 1401        | 190         | 20            | 0.207                  | 4                        | 5                        |         | 49            | 10.47              |
| 50-40-4                            |                      | 0.40  |                  |          |                  | 1607        | 217         | 21            | 0.236                  | 4                        | 5                        |         | 55            | 12.08              |
| 20-25-7                            | 0.20                 | 0.25  | 691              |          |                  | 237         | 33          | 0.149         | 8                      | 10                       | 235                      |         | 1.73          |                    |
| 20-35-7                            |                      | 0.35  | 980              |          |                  | 332         | 36          | 0.207         | 8                      | 9                        | 318                      |         | 2.49          |                    |
| 20-45-7                            |                      | 0.45  | 1269             |          |                  | 427         | 38          | 0.269         | 8                      | 9                        | 399                      |         | 3.24          |                    |
| 25-25-7                            | 0.25                 | 0.25  | 864              |          |                  | 237         | 33          | 0.149         | 8                      | 10                       | 198                      |         | 2.84          |                    |
| 25-35-7                            |                      | 0.35  | 1225             |          |                  | 332         | 36          | 0.207         | 8                      | 9                        | 268                      |         | 4.09          |                    |
| 25-45-7                            |                      | 0.45  | 1586             |          |                  | 427         | 38          | 0.269         | 8                      | 9                        | 336                      |         | 5.32          |                    |
| 30-25-7                            | 0.30                 | 0.25  | 1037             |          |                  | 237         | 33          | 0.149         | 8                      | 10                       | 171                      |         | 4.23          |                    |
| 30-35-7                            |                      | 0.35  | 1471             |          |                  | 332         | 36          | 0.207         | 8                      | 9                        | 231                      |         | 6.10          |                    |
| 30-45-7                            |                      | 0.45  | 1904             |          |                  | 427         | 38          | 0.269         | 8                      | 9                        | 290                      |         | 7.95          |                    |
| 40-25-7                            | 0.40                 | 0.25  | 1383             |          |                  | 237         | 33          | 0.149         | 8                      | 10                       | 134                      |         | 7.88          |                    |
| 40-35-7                            |                      | 0.35  | 1961             |          |                  | 332         | 36          | 0.207         | 8                      | 9                        | 182                      |         | 11.38         |                    |
| 40-45-7                            |                      | 0.45  | 2538             |          |                  | 427         | 38          | 0.269         | 8                      | 9                        | 228                      |         | 14.83         |                    |
| 50-25-7                            | 0.50                 | 0.25  | 1728             |          |                  | 237         | 33          | 0.149         | 8                      | 10                       | 110                      |         | 12.68         |                    |
| 50-35-7                            |                      | 0.35  | 2451             |          |                  | 332         | 36          | 0.207         | 8                      | 9                        | 150                      |         | 18.32         |                    |
| 50-45-7                            |                      | 0.45  | 3173             |          |                  | 427         | 38          | 0.269         | 8                      | 9                        | 188                      |         | 23.88         |                    |
| 20-25-10                           | 0.20                 | 0.25  | 988              |          |                  | 339         | 47          | 0.149         | 11                     | 15                       | 479                      |         | 2.47          |                    |
| 20-35-10                           |                      | 0.35  | 1401             |          |                  | 474         | 51          | 0.207         | 11                     | 13                       | 649                      |         | 3.55          |                    |
| 20-45-10                           |                      | 0.45  | 1813             |          |                  | 610         | 55          | 0.269         | 11                     | 13                       | 814                      |         | 4.63          |                    |
| 25-25-10                           | 0.25                 | 0.25  | 1235             |          |                  | 339         | 47          | 0.149         | 11                     | 15                       | 403                      |         | 4.05          |                    |
| 25-35-10                           |                      | 0.35  | 1751             |          |                  | 474         | 51          | 0.207         | 11                     | 13                       | 546                      |         | 5.84          |                    |
| 25-45-10                           |                      | 0.45  | 2266             |          |                  | 610         | 55          | 0.269         | 11                     | 13                       | 686                      |         | 7.61          |                    |
| 25-25-20                           |                      | 0.25  | 0.25             |          |                  | 2540        | 687         | 94            | 0.149                  | 22                       | 29                       |         | 1571          | 8.25               |
| 25-35-20                           |                      |       | 0.35             |          |                  | 3601        | 962         | 103           | 0.207                  | 22                       | 27                       |         | 2129          | 11.89              |
| 25-45-20                           |                      |       | 0.45             |          |                  | 4662        | 1237        | 110           | 0.269                  | 22                       | 25                       |         | 2672          | 15.48              |
| 25-25-30                           |                      | 0.25  | 0.25             |          |                  | 3811        | 1031        | 141           | 0.149                  | 34                       | 43                       |         | 3534          | 12.37              |
| 25-35-30                           |                      |       | 0.35             |          |                  | 5402        | 1443        | 154           | 0.207                  | 33                       | 40                       |         | 4790          | 17.83              |
| 25-45-30                           |                      |       | 0.45             |          |                  | 6993        | 1855        | 165           | 0.269                  | 33                       | 38                       |         | 6013          | 23.22              |

$$Q = \frac{1}{2R_f}(R_0 - \sqrt{R_0^2 - 4R_f}) \leq 1.0 \quad (7)$$

$$R_0 = 1.33R_f + 0.868 \quad (8)$$

ここで、 $r_s = 1$  本の補剛材と隣接パネルからなる T 型断面において板パネルに平行な主軸周りの断面 2 次半径、 $Q$  = 縦補剛材で囲まれた板パネルの局部座屈強度である。降伏水平荷重  $H_y$  と降伏変位  $\delta_y$  は次のように求めた。 $H_y$  は次の式(9)、(10)から求められたもののうち、小さい方の値とした。

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_u}\right) \quad (9)$$

$$H_y = \frac{M_y}{0.85h} \left(1 - \frac{P}{P_E}\right) \left(1 - \frac{P}{P_u}\right) \quad (10)$$

ここで、 $M_y$  = 降伏モーメント、 $P_E$  = 片持柱のオイラー座屈荷重、 $P_u$  = 中心軸圧縮柱の強度である。 $\delta_y$  は次式より求めた。

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (11)$$

材料定数を表-3 に示す。鋼材は SM490Y とし、降伏応力と引張強さについては材料の公称値を使用した。載荷パターンは図-1 に示すように、1 Cycle ごとに  $1\delta_y$  ずつ頂部変位を増加させる、漸増変位振幅繰り返し載荷とした。解析には、汎用解析プログラム ABAQUS(ver. 6.13)を使用し、材料構成則は修正二曲面モデルを適用した<sup>7)</sup>。

表-3 材料特性

|                      | $\sigma_y$ (MPa) | $\varepsilon_y$ (%) | $E$ (GPa) | $\nu$ | $\sigma_u$ (MPa) | $\varepsilon_u$ (%) | $E_s$ (GPa) | $\varepsilon_s$ (%) |
|----------------------|------------------|---------------------|-----------|-------|------------------|---------------------|-------------|---------------------|
| $t < 16\text{mm}$    | 365              | 0.17                | 206       | 0.3   | 490              | 25                  | 6.86        | 1.2                 |
| $t \geq 16\text{mm}$ | 355              | 0.17                | 206       | 0.3   | 490              | 25                  | 6.86        | 1.2                 |

Note:  $\sigma_y$ =降伏応力,  $\varepsilon_y$ =降伏ひずみ,  $E$ =ヤング率,  $\nu$ =ポアソン比,  $\sigma_u$ =引張強さ,  $\varepsilon_u$ =破断ひずみ,  
 $E_s$ =ひずみ硬化開始時の硬化係数,  $\varepsilon_s$ =ひずみ硬化開始時ひずみ.

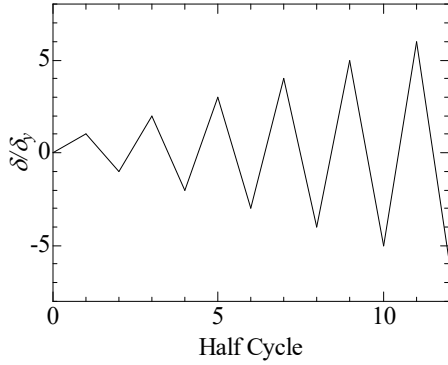


図-1 荷重パターン

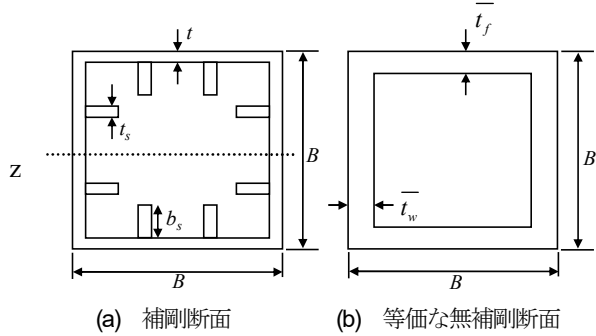


図-3 断面図

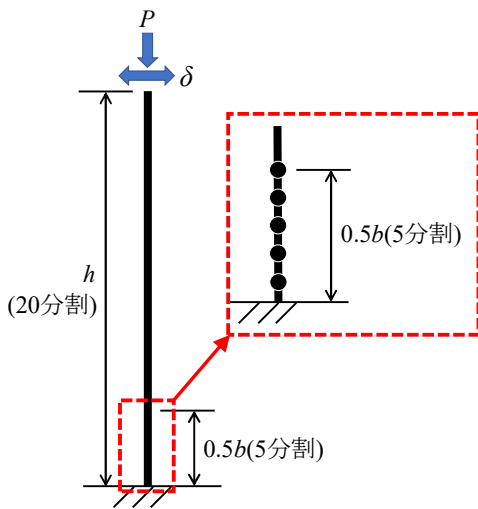


図-2 beam 解析モデル概要図

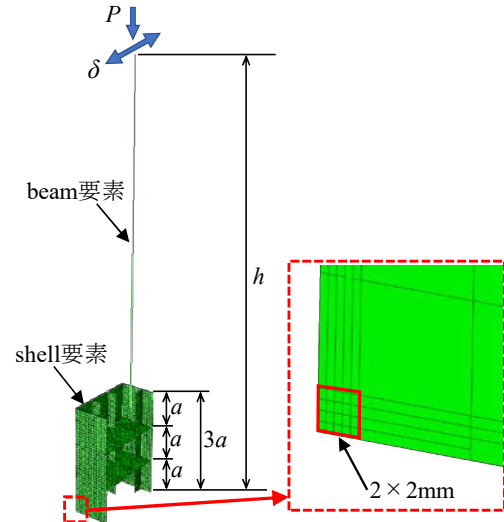


図-4 shell 解析モデル概要図

#### a) beam 解析モデル

beam 解析モデルの概要図を図-2 に示す。既往の研究と同様に<sup>6)</sup>、Timoshenko のはり理論に基づく beam 要素 B31OS を用いてモデル化した。メッシュ分割は、橋脚高さ  $h$  を 20 分割、有効破壊長領域  $0.5b$  を 5 分割した。ひずみは、有効破壊長最下部の 1 要素から出力した。

図-3 に解析モデルの断面図を示す。本研究では、補剛断面を、等価な無補剛断面<sup>8)</sup>に換算し、解析を行った。 $\bar{t}_f$ =フランジの換算板厚、 $\bar{t}_w$ =ウェブの換算板厚であり、本研究で追加検討した解析モデルの換算板厚の値は表-2 に示している。表-1 の解析モデルの換算板厚は文献 6) と同様である。なお、等価な無補剛断面へは次のような条件で置換している<sup>8)</sup>。

- (1) 断面の外形は変わらない (断面の幅、高さが不変)
  - (2) 断面積は変わらない
  - (3)  $z$  軸まわりの全塑性モーメントは変わらない
- 換算板厚の具体的な導出方法は文献 8) を参照されたい。

#### b) shell 解析モデル

shell 解析モデルの概要図を図-4 に示す。shell 解析においては、局部座屈の発生や、橋脚基部の角部の要素から局所的なひずみを出力することを考慮して、柱基部から  $3b$  の高さまでを 4 節点低減積分有限膜ひずみ shell 要素 S4R を用いてモデル化した。同図に示すように、既往の研究<sup>6), 9), 10)</sup>と同様、基部角部の要素が  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  となるように分割した。shell 要素部分については、解析モデルの対称性から、フランジ中心から半分をモデル

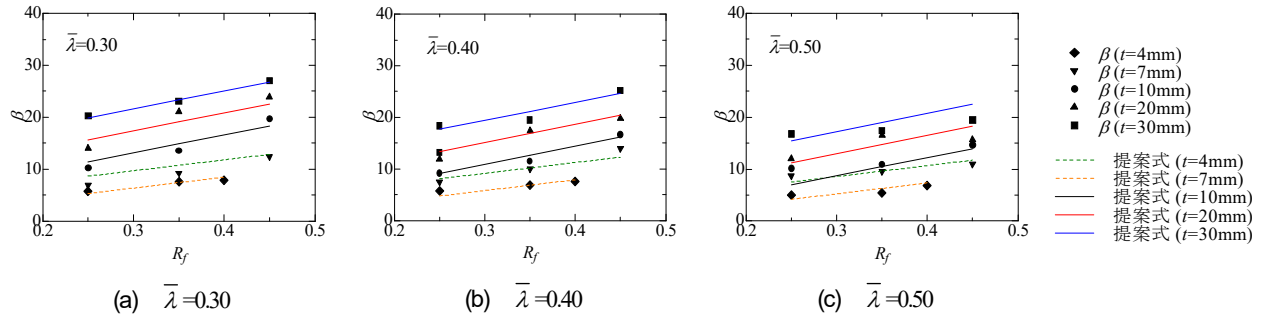


図-5 幅厚比パラメータがひずみ集中補正係数に及ぼす影響

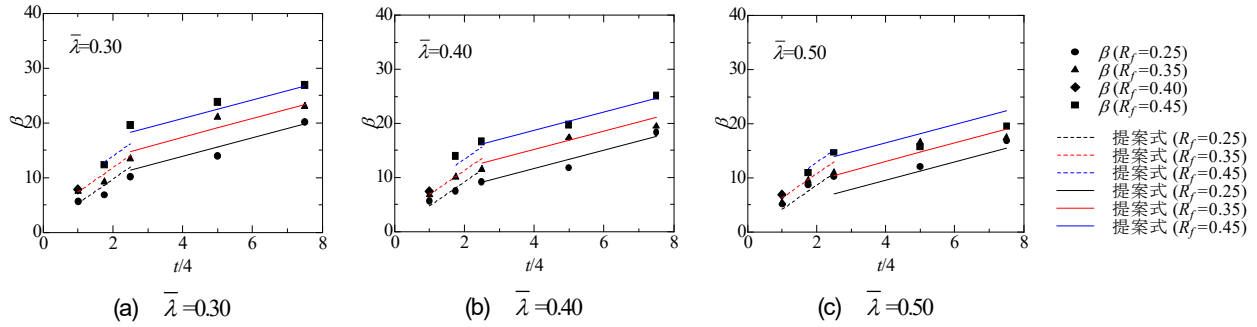


図-6 板厚がひずみ集中補正係数に及ぼす影響

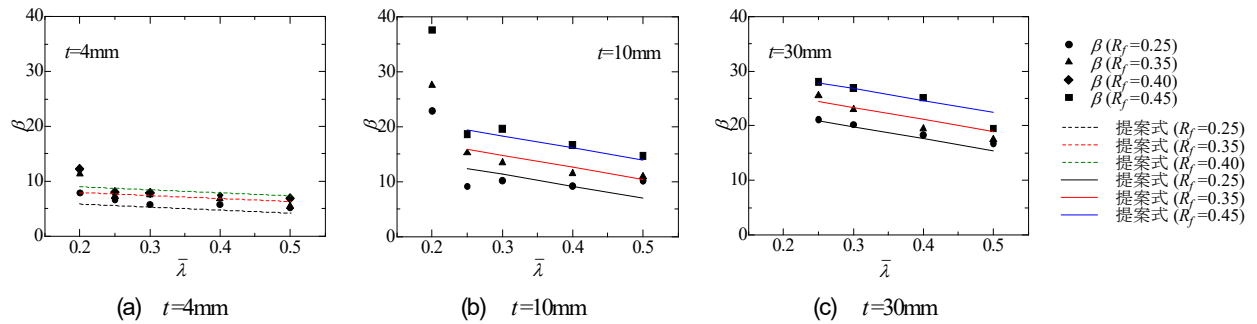


図-7 細長比パラメータがひずみ集中補正係数に及ぼす影響

化し、フランジ中心部の境界面には対称条件を与えた。また、基部は完全固定とした。ひずみは、shell 要素の初載荷時に圧縮側になるフランジの、基部最角部の要素から出力した。なお、解析の効率化のために、shell 要素上端から橋脚上端までは beam 要素でモデル化し、断面は等価な無補剛断面<sup>8)</sup>に置換している。beam 要素の下端と shell 要素の上端は剛結合とした。

## (2) 構造パラメータが \$\beta\$ に及ぼす影響

図-5～7 に構造パラメータがひずみ集中補正係数に及ぼす影響を示す。縦軸にひずみ集中補正係数 \$\beta\$、横軸に各構造パラメータをとり、プロットしている。ひずみ集中補正係数は、shell 解析および beam 解析から得られる塑性ひずみ履歴の比較から、既往の研究と同様の手法で算出した<sup>6)</sup>。また、同図には、後述する、本研究で新たに提案する \$\beta\$ による直線も併記している。図-5 より、\$\beta\$ と幅厚比パラメータ \$R\_f\$ には正の相関が見られ、板厚の増加に伴い、その傾きは若干大きくなるようである。図-6 より、\$\beta\$ と板厚 \$t\$ には正の相関が読み取れる。概ね、

\$t = 10\$ mm を境として相関の傾きに違いが見られ、\$t = 4 \sim 10\$ mm の場合の傾きの方が、\$t = 10 \sim 30\$ mm の場合の傾きより大きいようである。図-7 より、\$\beta\$ と細長比パラメータ \$\bar{\lambda}\$ には負の相関がみられ、その傾きは、\$t = 4\$ mm の場合の方が、\$t = 10, 30\$ mm の場合に比べ小さいようである。また、図-7(b)より、\$\bar{\lambda} = 0.20\$ の場合に、急激に \$\beta\$ の値が増加していることが分かる。

## (3) 新たに提案するひずみ集中補正係数の一般式

前節の検討を受け、本研究では特に、概ね \$t = 10\$ mm を境にひずみ集中補正係数の傾きが変化することに着目した。このことから、板厚によって場合分けをして重回帰分析を行い、ひずみ集中補正係数の近似式を導出することを試みた。本研究で新たに提案するひずみ集中補正係数の一般式は、次のとおりである。

$$\beta_{s,thin} = 21.0R_f + 4.45\left(\frac{t}{4.0}\right) - 5.47\bar{\lambda} - 2.77 \quad (12)$$

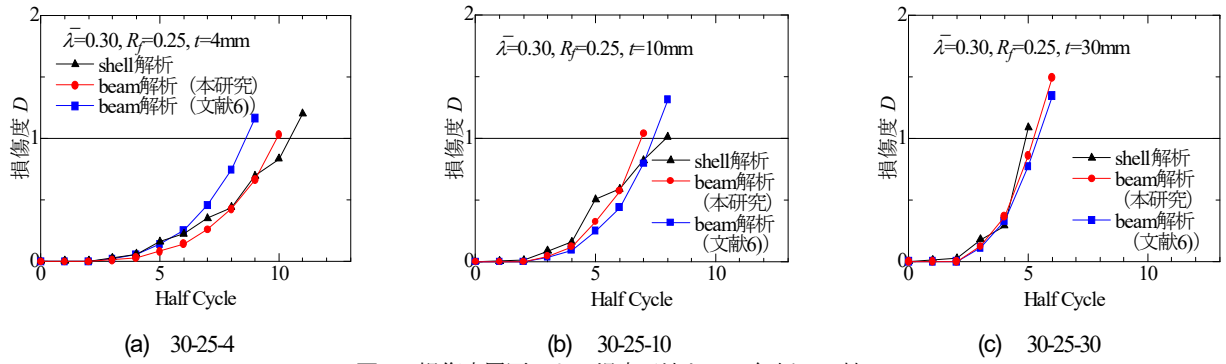


図-8 損傷度履歴による提案手法と shell 解析の比較

$$\beta_{s,thick} = 34.9R_f + 1.70\left(\frac{t}{4.0}\right) - 21.8\bar{\lambda} + 4.90 \quad (13)$$

ここで、 $\beta_{s,thin}$  は補剛断面の薄肉断面、 $\beta_{s,thick}$  は補剛断面の厚肉断面のひずみ集中補正係数の一般式であることを示している。式(12)の適用範囲は、 $0.25 \leq R_f \leq 0.45$ 、 $0.20 \leq \bar{\lambda} \leq 0.50$ 、 $4\text{mm} \leq t < 10\text{mm}$  とし、式(13)の適用範囲は、 $0.25 \leq R_f \leq 0.45$ 、 $0.25 \leq \bar{\lambda} \leq 0.50$ 、 $10\text{mm} \leq t \leq 30\text{mm}$  とする。なお、 $t = 10\text{mm}$  の場合については、予備検討の結果、式(13)を用いた方が予測精度が高かったため、式(13)の適用範囲に含めることとした。

式(12)については、次のことに留意する。図-7(b)から分かるように、 $\bar{\lambda} = 0.20$  における  $\beta$  は、その他の場合の  $\beta$  に比べ、特異的に大きな値を示した。そのため、予測精度への影響を検討した結果、近似式の導出は、 $0.25 \leq \bar{\lambda} \leq 0.50$  の範囲で行うこととした。しかし、後述する図-9 に示すように、 $\bar{\lambda} = 0.20$  のケースについても式(12)を適用したところ、その他のケースと同等の精度であることを確認したため、 $\bar{\lambda} = 0.20$  を適用範囲に含めることとした。また、 $R_f = 0.45$  および  $t = 4\text{mm}$  の shell 解析については、前述したように、延性き裂発生よりも局部座屈の進展が先行し、 $D = 1$  に達しなかった。したがって、 $t = 4\text{mm}$  程度でかつ、 $R_f = 0.45$  程度と比較的幅厚比パラメータが大きい場合、beam 解析だけではなく、shell 解析や実験を併用するなど、提案手法の適用に注意した方がよいであろう。また、どのような構造パラメータの場合に、局部座屈の進展が先行し損傷度が 1 に達しないのか、今後詳細に検討したい。

#### (4) 新たに提案するひずみ集中補正係数の精度検証

式(12)および式(13)を用いた延性き裂発生の評価手法（以降、本提案手法と略称）を文献 6)の提案手法との比較を行い、妥当性を検証する。

##### a) 提案手法と shell 解析の損傷度履歴の比較

図-8 に、板厚を変化させた解析モデルにおいて、本研究および文献 6)の提案手法と shell 解析の損傷度履歴の比較を示す。同図では、縦軸に損傷度  $D$ 、横軸に

Half Cycle をとっている。縦軸の損傷度は、文献 6)の式 (3)、本提案手法の式(12)および式(13)から算出したひずみ集中補正係数を、式(1)に導入して得られた結果である。同図より、いずれの板厚においても、shell 解析結果と提案手法の損傷度が 1 に達する Half Cycle が概ね一致していることが分かる。特に、図-8(a)より、板厚  $t = 4\text{mm}$  の解析ケースで損傷度が 1 に達する Half Cycle を見ると、本提案手法は文献 6)の提案手法に比べ精度良く評価できている。

##### b) 提案手法と shell 解析の全ケースによる比較

図-9 に、すべての解析ケースについて、本提案手法と shell 解析結果の比較を示す。同図では、縦軸に本提案手法における  $D = 1$  時の Half Cycle である  $H.C_{dc,pre}$ 、横軸に shell 解析における  $D = 1$  時の Half Cycle である  $H.C_{dc,shell}$  をとっている。また、 $\pm 20\%$  および  $-30\%$  の誤差を示す破線を併せて示す。これは、shell 解析結果に対する提案手法の誤差を示しており、マイナス側は安全側の評価となり、プラス側は危険側の評価となることを示している。 $t = 4, 7\text{mm}$  は式(12)を適用し、 $t = 10, 20, 30\text{mm}$  は式(13)を適用した。同図より、本提案手法と shell 解析結果の誤差は、概ね  $\pm 20\%$  以内であることが分かる。ちなみに、図-10 に板厚  $t = 4, 7\text{mm}$  について文献 6)の提案手法と shell 解析の比較を示す。同図より、式(3)のひずみ集中補正係数を適用した場合、 $t = 10\text{mm}$  未満の解析ケースが少なく、板厚  $t = 4, 7\text{mm}$  のケースでは、 $-30\%$  程度の誤差が生じる場合があることがわかる。本研究では、 $t = 4, 7\text{mm}$  の解析ケースを増やし、ひずみ集中補正係数の一般式を新たに提案したため、特に、薄い板厚の場合の精度に改善がみられ、shell 解析結果を良い精度で模擬することが可能であると言える。

## 5. 結論

本研究では、鋼製補剛箱形断面橋脚を対象に、延性き裂発生の評価法について再検討を行った。まず、比較的薄い板厚の解析ケースを増やして、beam 解析および



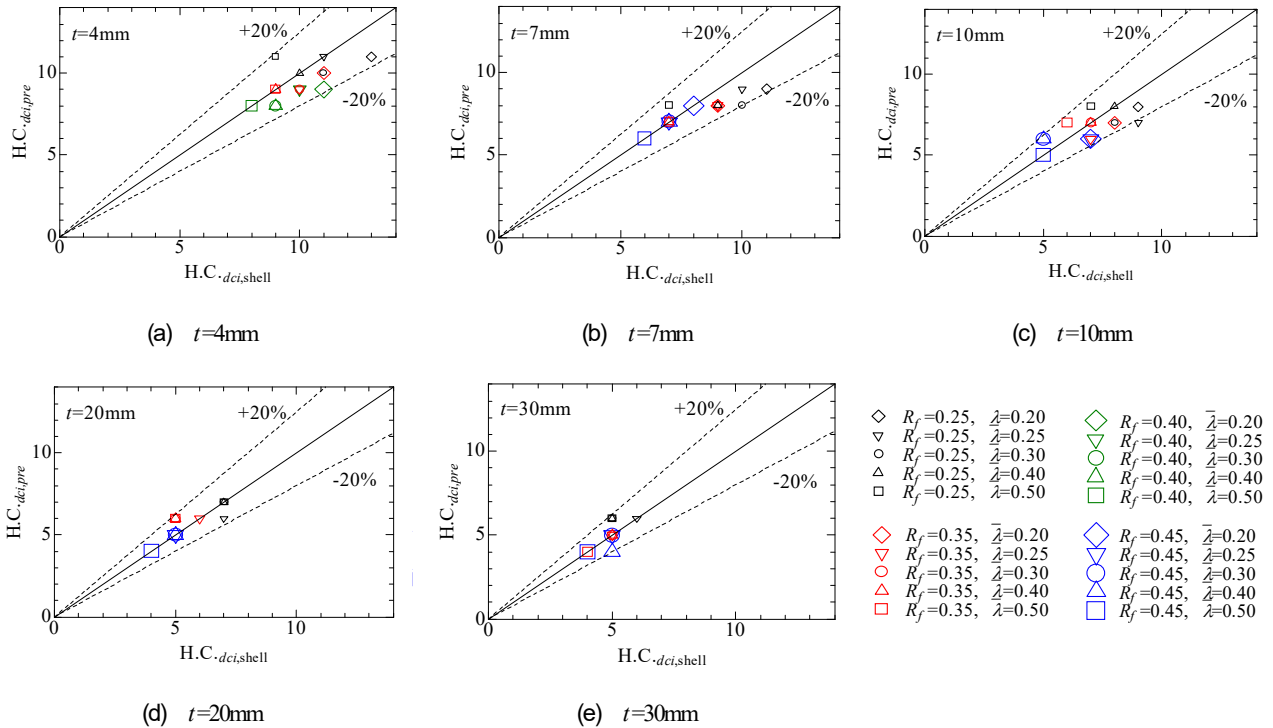


図-9 全ケースによる提案手法と shell 解析結果の比較

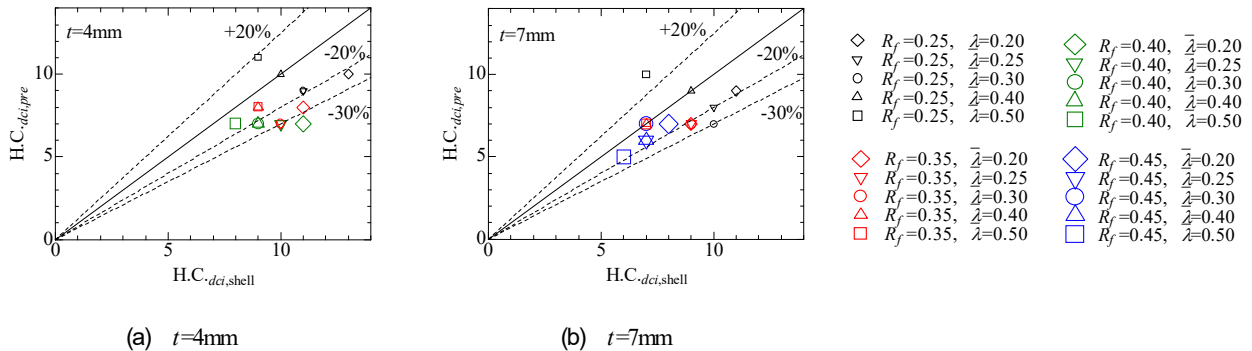


図-10 文献 6)の提案手法と shell 解析結果の比較

shell 解析を行い、補剛箱形断面橋脚を対象とした、新たなひずみ集中補正係数の一般式の提案を試みた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1)  $t = 4, 7\text{mm}$  の解析ケースを増やし、繰り返し载荷の beam 解析を追加実施して、ひずみ集中補正係数と各構造パラメータの関係を再検討した。その結果、概ね  $t = 10\text{mm}$  を境に、ひずみ集中補正係数と板厚との相関に変化が見られることが分かった。
  - 2) ひずみ集中補正係数を  $t = 10\text{mm}$  を境に場合分けして導出し、新たに  $\beta_{s,thin}$ ,  $\beta_{s,thick}$  を提案した。
  - 3)  $\beta_{s,thin}$ ,  $\beta_{s,thick}$  を導入した損傷度を用いて延性き裂発生評価を行った結果、shell 解析結果を概ね  $\pm 20\%$  以内の精度で模擬することが可能であることを示した。板厚  $t = 4, 7\text{mm}$  のケースで、既往の研究で提案されたひずみ集中補正係数の一般式による予測結果よりも、精度が向上することを示した。
- ひずみ集中補正係数の適用範囲を、さらに実際の構造

物に即したものとするため、より厚い板厚のケースも追加検討するなど、改善を行っていく必要がある。また、ひずみ集中補正係数の適用の拡大として、Pushover 解析において、延性き裂発生を評価することができるか検討する。

**謝辞：**本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(C)（研究代表者：葛 漢彬；課題番号：18K04333）の助成を受けて実施されたものである。

#### 参考文献

- 1) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.243-261, 1998.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017.

- 3) 土木学会：2018 年制定 鋼・合成構造標準示方書，耐震設計編，2018.
- 4) 森翔吾，葛漢彬，萩野勝哉，康瀾：無補剛断面鋼製橋脚の延性き裂に対する簡易照査法の再検討ー構造パラメータがひずみ集中補正係数に及ぼす影響ー，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4，pp.I\_517-I\_527，2013.
- 5) 葛漢彬，藤江渉，津村康裕：鋼製橋脚の延性き裂照査法の開発に関する一検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.65，No.1，pp.368-377，2009.
- 6) 藤江渉，田口実季，鈴木元哉，葛漢彬：鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂照査法におけるひずみ集中補正係数に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75，No.4，2019.
- 7) Shen, C., Mamaghani, I. H. P., Mizuno, E. and Usami, T.: Cyclic behavior of structural steels. II: Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.121, No.11, pp.1165-1172, 1995.
- 8) 宇佐美勉，鈴木森晶，Iraj H. P. Mamaghani，葛漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.69-82，1995.
- 9) 葛漢彬，津村康裕：鋼製厚肉断面橋脚における延性き裂発生の評価に関する実験的および解析的研究，構造工学論文集，Vol.55A，pp.605-616，2009.
- 10) 葛漢彬，藤江渉，田島僚：鋼構造物の延性き裂発生の評価法の実験データによる検証，構造工学論文集，Vol.55A，pp.617-628，2009.

## A STUDY ON THE IMPROVEMENT OF STRAIN CONCENTRATION MODIFICATION COEFFICIENT USED IN DUCTILE CRACK INITIATION EVALUATION METHOD FOR STIFFENED BOX-SECTIONAL STEEL BRIDGE PIERS

Miki TAGUCHI, Wataru FUJIE, Ryosuke ITO and Hanbin GE

This study is aimed at re-examining an evaluation method of ductile crack initiation for stiffened box-sectional steel bridge piers when the plate thickness is relatively thin. The influence of structural parameters such as plate width-thickness ratio parameter, column slenderness ratio parameter, and plate thickness on strain concentration modification coefficient is discussed. The strain concentration modification coefficient is formulated by multiple regression analysis for thin and thick sections. Comparisons of damage history and ductile crack initiation point by shell analysis and beam analysis applying strain concentration correction coefficient showed that errors are within  $\pm 20\%$ . It was confirmed that the prediction accuracy of ductile crack initiation point is improved when the new strain concentration modification coefficient is used.