

地震荷重相当の载荷履歴を受けた後の単柱式 RC 橋脚の履歴特性

株式会社熊谷組 技術本部技術研究所（筑波大学博士後期課程在学中） 正会員 ○大越 靖広
筑波大学教授 システム情報系 正会員 庄司 学

1. はじめに

RC 橋脚の履歴特性には、Takeda モデル¹⁾等が採用されることが多いが、一方で一度载荷履歴を受けた RC 橋脚に対する履歴特性モデルに関する研究は少ない。複数回の地震作用に対する耐震性能を検討するためには残存耐震性能の把握が必要となるが、この場合は通常正負交番载荷実験後に再载荷^{例えば2)}の実施が必要となる。著者らは、道路橋示方書³⁾の限界状態を参考に初期载荷の変位振幅の大きさや回数をパラメータにした载荷と再载荷実験⁴⁾を行い、残存耐震性能について検討してきた。本稿では、文献⁴⁾の実験で得られた 1 回目の载荷範囲による 2 回目の 1 回目に対する等価剛性の割合を用いて、一度载荷を受けた橋脚の载荷範囲による 2 回目の履歴の予測について検討した結果を報告する。

2. 载荷実験結果

文献⁴⁾の実験結果のうち、ケース 1～3 の結果を図-1 に示す。ケース 1 は 1 回目に限界状態 3 を超える範囲の $8\delta_y$ まで载荷し、2 回目も $8\delta_y$ まで载荷されたものである。ケース 2 は 1 回目に限界状態 2 の $5\delta_y$ まで载荷した後 2 回目は $8\delta_y$ まで载荷され、ケース 3 は 1 回目に限界状態 2 と 3 の間である $3\delta_y$ まで载荷した後 2 回目は同様に $8\delta_y$ まで载荷されたものである。図-1 より、ケース 1 については 2 回目の载荷時の水平荷重は $1\sim 8\delta_y$ まで小さい。ケース 2,3 に関しては、1 回目の履歴の影響により 2 回目の载荷時の水平荷重が定性的に低下していることがわかる。

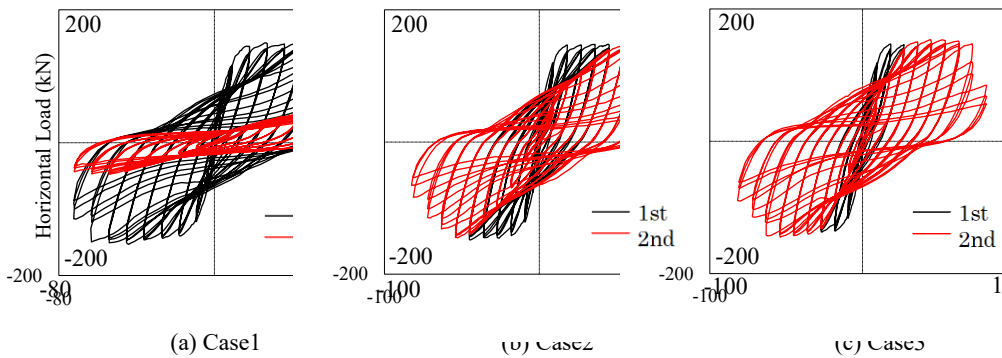


図-1 ケース 1～3 の水平荷重－水平変位の履歴

図-2 に等価剛性の 1 回目に対する 2 回目の割合と 1 回目の载荷範囲の関係を示す。横軸は 1 回目の载荷範囲を示しており、3 は 1 回目の载荷範囲が $3\delta_y$ であるケース 3 を、同様に横軸の 5 はケース 2 を、8 はケース 1 のデータを示す。この図より、1 回目の载荷範囲が $3\delta_y$ までであれば $3\delta_y$ で、 $5\delta_y$ までであれば $5\delta_y$ で割合は 1 に近付き、1 回目の等価剛性を E_q^1 、2 回目の等価剛性を E_q^2 とすれば、1 回目に対する 2 回目の等価剛性の割合 E_q^2/E_q^1 はほぼ線形の右肩下がりの関係を有していることがわかる。

3. 2 回目の等価剛性の予測

前述のように、1 回目の载荷範囲と E_q^2/E_q^1 には線形の関係があり、2 回目の载荷範囲毎に線形で近似した場合の近似式は図-2 に示すとおりである。これらの 5 つの式において E_q^2/E_q^1 を 1 回目の载荷範囲の関数で 1 つの式に表すことができれば、2 回目の载荷履歴の予測が可能となる。本研究では、1 回目に対する 2 回目の等価剛性の低減率 R_{ES} (図-2 の縦軸) を 1 回目の载荷範囲 i の関数で以下の式(1)のように示す。なお、 α と β は等価剛性を求めたい 2 回目の振幅変位 j の関数である。

$$R_{ES}(i) = \alpha(j)i + \beta(j) \tag{1}$$

ここで、 i : 1 回目の载荷範囲(δ_y)

j : 等価剛性を求めたい 2 回目の振幅変位(δ_y)

式(1)の α と β は、図-2 の各直線の傾きと切片であることから、ケース 1～3 の 5 つの式を用いて回帰的に求めることができる。縦軸に傾き α と切片 β を、横軸に

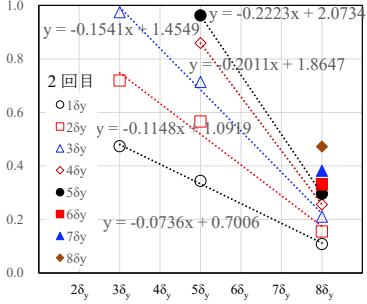


図-2 等価剛性の 1 回目に対する 2 回目の割合

キーワード 载荷履歴、残存耐震性能、複数回の地震、限界状態、正負交番载荷実験

連絡先 〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1043 (株)熊谷組技術本部技術研究所 TEL 029-847-7505

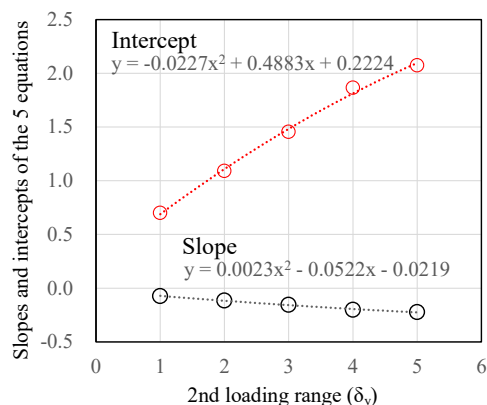


図-3 傾きおよび切片と2回目の载荷範囲

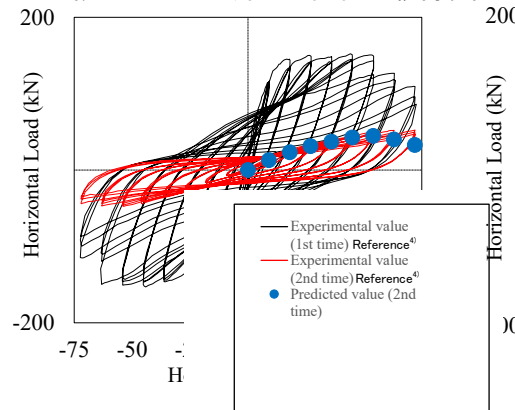


図-4 荷

等価剛性を求めたい2回目の振幅変位 j をプロットして5つの式の傾きと切片をまとめた結果が図-3である。図中に示す式はこれらの5点の近似式を傾きと切片の各々に対して2次関数で回帰したものである。

以上より、 α と β は等価剛性を求めたい2回目の振幅変位 j の関数であり、図-3に示すように式(2)、(3)のように求めることができる。

$$\alpha(j) = 0.0023j^2 - 0.0522j - 0.0219 \quad (2)$$

$$\beta(j) = -0.0227j^2 + 0.4883j + 0.2224 \quad (3)$$

式(1)~(3)により、1回目の载荷範囲による等価剛性の低減率 R_{ES} を求めることができた。この提案式を用いて実際に著者らが実施した载荷実験の E_q^1 から E_q^2 を算出し、2回目の履歴を予測した。図-4にケース1~3の载荷履歴の予測を示す。黒実線と赤実線は各々のケースの水平荷重と水平変位の履歴を、青点は提案式による2回目の载荷履歴の予測値を示す。また、参考のため予測値と比較するケース2と3の1回目および2回目における $5\delta_y$ と $3\delta_y$ の終了時のひび割れ図を図-5に示す。図-4によれば、ケース2、3については2回目の载荷履歴と予測値がよく一致しているが、ケース1の7~ $8\delta_y$ については、予測値が実験値を下回っている。これは、図-2で線形と評価した1回目の载荷範囲と等価剛性の低減率が、限界状態2を超える範囲で不連続の可

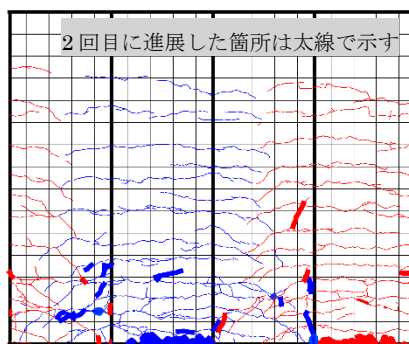
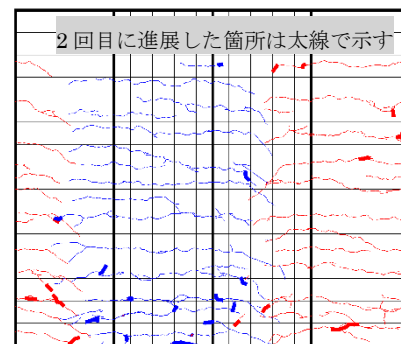
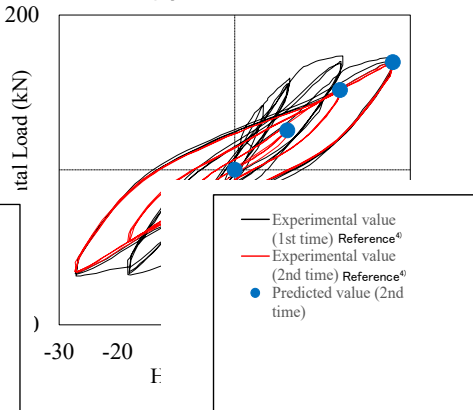
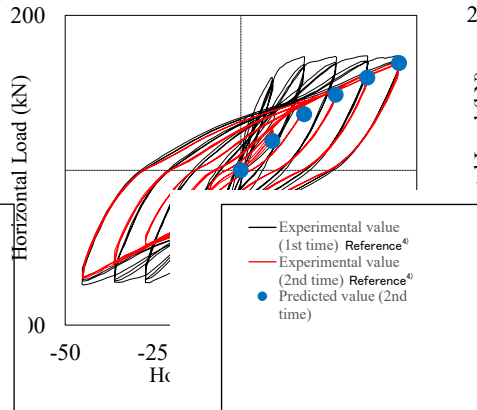
(a) Case1 End of $5\delta_y$ (b) Case2 End of $3\delta_y$

図-5 ケース2とケース3のひび割れ図



能性があることや、現状では限界状態2前後のデータが不足していることに起因しているものと考えられる。

4. まとめ

著者らは、橋脚の残存耐震性能について、正負交番载荷実験後に再载荷を行って検討してきた。1回目の载荷範囲と2回目の1回目に対する等価剛性の割合には一定の関係があり、1度载荷を受けた橋脚の载荷範囲による2回目の履歴の予測は提案式により可能であることを示した。ただし、今回の予測は、3体の試験体による実験結果をもとに行ったものであり、今後は汎用性についての検討が必要となる。RC橋脚が本来有する履歴については、Takedaモデル¹⁾等が多く提案されており、精度よく荷重と変位の関係を求めることができることから、本研究の提案式のように2回目の载荷履歴の予測ができれば、一度载荷履歴を受けたRC橋脚の挙動を検討する一助となるものと考えられる。

参考文献 1) Takeda et al.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake, *Proceedings of the 3rd Japan Earthquake Symposium*, pp.357-364, 1970.

2) 中尾・宮田・大住: 超過作用により限界状態3に至ったRC橋脚の耐荷能力に関する評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4 (地震工学論文集第38巻), pp.I_294-I_305, 2019.

3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2017.

4) 大越・庄司: 正負交番载荷実験に基づく単柱式RC橋脚の残存耐震性能メカニズムに関する考察(採択), 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.79, No.4 (地震工学論文集第42巻), 2023.