

構造全体系としての終局限界の評価に関する数値解析的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○和田一範, 室野剛隆

1. はじめに

鉄道構造物に関する現行の耐震設計標準¹⁾では、想定される最大規模の地震に対して、構造物を構成する部材単位で終局限界に至らないように設計される。しかし、ラーメン高架橋のような不静定構造物は、一部材が終局限界に達しても構造全体系としては耐力を保持している場合もあり、一部材の終局限界と構造全体系の終局限界とは必ずしも一致しない。また、今後も発生が危惧される想定を超える巨大地震に対して、構造全体系として破滅的な状態に陥らないために、構造全体系としての終局限界を適切に評価した設計体系を構築することが重要となっている。

そこで、本研究では、構造全体系の終局限界を数値解析的に評価する手法を橋脚モデルとラーメン構造モデルに適用し、現行の耐震設計による評価結果と比較した。

2. 構造全体系の終局限界評価のための解析概要

本研究では、構造全体系の終局限界の評価として中村、田辺²⁾が提案しているプッシュ・オーバー解析(変位増分法)と逐次固有値解析を組合せた手法を適用する。本手法では、増分変位に対する剛性方程式を各変位段階で解きつつ、構造物の接線剛性マトリクス([K])を用いて固有値・固有ベクトルを求める。増分剛性方程式の求解を進めると、接線剛性マトリクスの行列式が零、すなわち、 $\det([K]) = 0$ で定義されるような状態に達する。これは、少なくとも1つの固有値が零であることを示す。この状態は、限界荷重点と呼ばれ、構造物が不安定な状態にあると判断できる。ただし、限界荷重点は図1のように「極限点」と「分岐点」の2種類がある。本手法では、構造全体系の振動モードと局所構造系の振動モードを整理して、後者の限界荷重点を「極限点」、前者の限界荷重点を「分岐点」とみなし、分岐点を構造物の終局限界と判断する。

3. 試算による現行の耐震設計と本手法の評価結果の比較

(1) 橋脚-杭基礎モデル

図2に示す諸元の杭基礎形式の橋脚を2次元の梁-ばね要素でモデル化した。橋脚、杭基礎および地盤ばねについて非線形性を考慮した。本モデルについて、構造物天端の水平変位を制御したプッシュ・オーバー解析を行った。

図3に構造物天端の水平変位と柱のせん断力(水平荷重)の関係と損傷過程を示す。ここでは、橋脚を線形部材とした場合の結果も合わせて示す。水平変位が約0.09mで橋脚く体が降伏し、剛性が低下し、約0.24mになると最大耐力に達し、剛性は負勾配となる。その後、水平変位が約0.26mで橋脚く体が現行の耐震設計上の終局点に達し、約0.4mで完全に荷重に抵抗できなくなる。なお、橋脚が線形の場合は、杭基礎の損傷に応じて剛性が低下するものの、大きな荷重低下は生じない。

図4に①初期、②橋脚く体が降伏点(以下、Y点)に達した段階、③橋脚く体が最大耐力点(以下、M点)に達した段階における固有振動数および水平1次モードを示す。Y点到達後の剛性低下に伴い、固有振動数が大きく低下し、M点到達後に1次モードの固有振動数が零となり、限界荷重点となる。振動モードを見ると、この状態で、橋脚く体全体としての形状が保てないので、分岐点と考えられる。つまり、橋脚のような静定構造物の場合

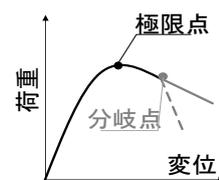


図1 極限点と分岐点

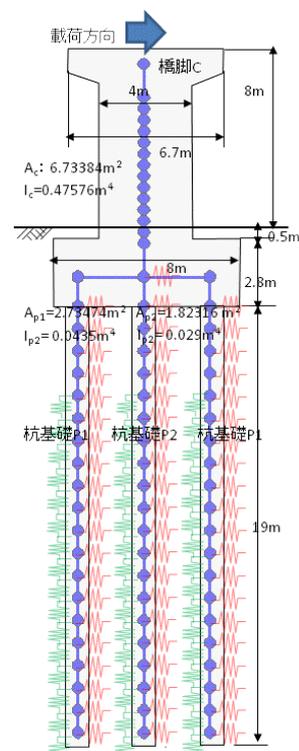


図2 解析モデル
(橋脚-杭基礎)

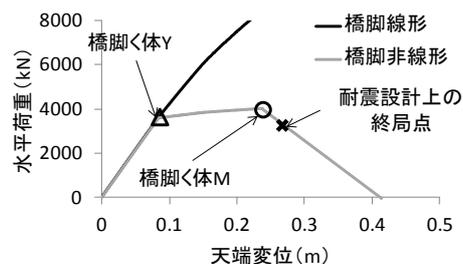


図3 荷重-変位曲線と損傷過程
(橋脚-杭基礎モデル)

キーワード 構造全体系, 終局限界, 逐次固有値解析, プッシュ・オーバー解析, 分岐点

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 地震応答制御 TEL 042-573-7336

合、本手法で評価される終局限界は、現行の耐震設計における終局限界よりも小さくなる。これは、部材の非線形性を現行の耐震設計で設定されるM点到達直後から剛性が負勾配となる骨格曲線で表現しているためである。また、橋脚が線形の場合は、M点相当の段階となっても限界荷重点とならない。

(2) ラーメン構造モデル

図5に示す高さ8mで構造物前後にゲルバー桁を支持する形式を対象とし、2次元の梁要素でモデル化した。非線形性は柱のみに考慮した。C1柱は鉄筋量が多く、C2柱に比べて耐力が大きく、じん性が小さくなるように設定した。なお、本検討では上部構造物と地中梁のみをモデル化し、柱の下端位置でピン支持とした。本モデルについて、(1)と同様に構造物天端の水平変位を制御したプッシュ・オーバー解析を行った。

図6に構造物天端の水平変位と2本の柱のせん断力の合計（水平荷重）の関係と損傷過程を示す。水平変位が約0.2mでC1柱上部（以下、C1上のように表記）がM点に達し、その後、C2上、C1下、C2下の順にM点に達する。

図7に①初期、②C1上がM点に達した段階、③C2下がM点に達した段階における固有値振動数および水平1～3次モードを示す。②の段階で、1次モードの固有振動数が零となり限界荷重点となる。この状態は、C1柱が終局限界となることによる局所振動モードにより極限点であり、構造全体系はC2柱を中心とした系が剛性を維持しているため、2次モードに非零な固有振動数を有する。③の段階では、2本の柱が剛性を失い、構造全体として不安定となるため、構造全体系の振動モード（3次モード）の固有振動数も零となっている。この状態が分岐点であり、構造全体系の終局限界である。一方、現行の耐震設計での終局限界は、水平変位が約0.25mの状態であり、本手法による構造物の終局限界（水平変位約0.35m）よりも小さく評価される。このように、ラーメン構造のような不静定構造物は、本手法により終局限界を合理的に評価できる。

4. おわりに

構造全体系としての終局限界を数値解析的に評価する手法を橋脚-杭基礎モデルとラーメン構造モデルに適用し、現行の耐震設計による評価結果と比較した。その結果、ラーメン構造のような不静定構造物は、本手法を用いることで、終局限界を合理的に評価できることがわかった。一方で、橋脚のような静定構造物に本手法を適用すると、部材の非線形性をM点到達直後から剛性が負勾配となる骨格曲線で表現しているために、現行の耐震設計の評価結果よりも小さい変位段階（M点）で終局限界と評価されることがわかった。しかし、M点到達直後の負勾配は、繰返し作用で耐力低下する部材の荷重-変位曲線を包絡線で近似的に表現することにより現れる見かけの勾配であり、履歴曲線としては、M点到達後も負勾配にならないことが、これまでの様々な実験結果等から確認されている。そのため、今後は、部材の非線形性をより精緻にモデル化して終局限界を評価する必要があると考えられる。

参考文献

1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012. 2) 中村光，田辺忠顕：鉄筋コンクリートはりのポストピーク挙動に関する解析的研究，土木学会論文集 No.490/V-23, pp.81-90, 1994.5.

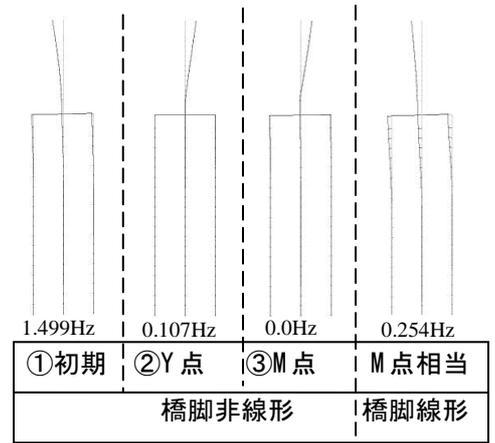


図4 固有振動数と1次モード (橋脚-杭基礎モデル)

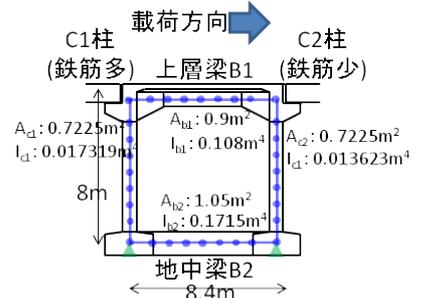


図5 解析モデル(ラーメン構造)

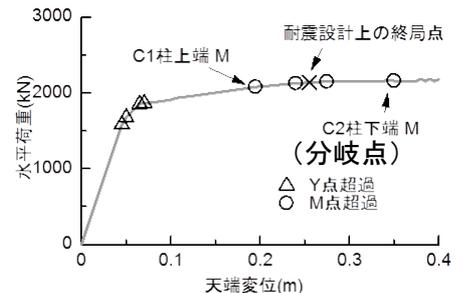


図6 荷重-変位曲線と損傷過程

(ラーメン構造モデル)

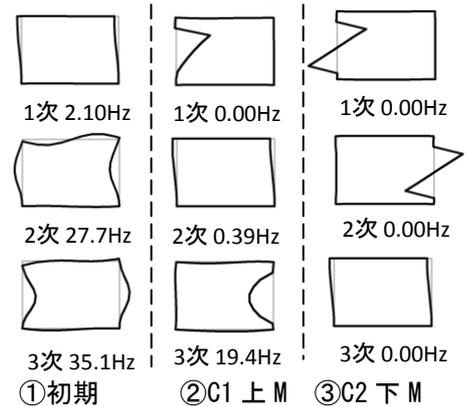


図7 固有振動数と振動モード (ラーメン構造モデル)