

地震動を受ける無充填円形鋼製橋脚の倒壊挙動の特性

名古屋工業大学 学生会員 ○Nguyen Van Bach  
 岐阜工業高等専門学校 正会員 水野 剛規

名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顕  
 名古屋工業大学 正会員 海老澤 健正

1. はじめに:

現在の橋梁の耐震性能は過去最大級の地震動をもとに設定された設計地震動に対して損傷制御の考え方に基づき照査される。しかしながら、設計地震動を越える地震動が作用する場合の耐震性能については照査されておらず、このような場合には構造系の崩壊が生じる可能性も否定できない。想定外の被害を極力防ぐためには崩壊までを視野に入れた照査が必要になる。そこで、本研究では、単一の無充填円形断面鋼製橋脚を対象にした加振による倒壊実験とともに複合非線形動的解析による倒壊解析を実施し、地震動による倒壊時の挙動特性と倒壊の判定法について検討した。

2. 橋脚の倒壊挙動とその判定法:

一定死荷重が作用する単一円形断面鋼製橋脚柱の Pushover 解析による柱頂部の水平変位  $u$  と水平復元力  $F$  の関係を図-1(a)に示す。この図でピーク点までは安定つり合い状態、ピーク点は臨界点、ピーク点以降は不安定つり合い状態である。この領域で水平復元力が  $F < 0$  となると橋脚は自立できず倒壊する。

一方、動的な地震力を受ける場合の倒壊挙動は図-1(b)に示すように繰り返し荷重により履歴ループにおける復元力のピーク点が徐々に低下していき、最終的には軟化領域の復元力  $F$  が  $|F| < |m\ddot{u}_g|$  となると橋脚は地震力を支えることができず倒壊挙動が生じる可能性がある。ここに、 $m$  は橋脚頂部質点の質量、 $\ddot{u}_g$  は橋脚基部の水平地震加速度成分である。以上のように地震動加速度と載荷履歴の影響で地震動による動的な倒壊挙動は Pushover 解析による静的な倒壊挙動とは厳密には異なる。このため、地震動下の倒壊挙動を正確に知るには大変形領域まで考慮した複雑な複合非線形動的解析によらなければならない。しかしながら、実験での観察から倒壊直前では橋脚基部は大きく損傷し、剛性が大幅に低下しているので橋脚のゆれはゆっくりとしたものになる。すなわち、図-2に例を示すように、倒壊点近傍では質点の絶対加速度  $\ddot{u} + \ddot{u}_g$  や相対速度  $\dot{u}$  は十分小さく、作用する慣性力  $m(\ddot{u} + \ddot{u}_g)$  や粘性減衰力  $C\dot{u}$  が倒壊に与える影響も小さくなる。結果として倒壊点近傍では Pushover 解析の場合と同様に  $F \approx 0$  となると考えられる。

以上から、地震動下での復元力の軟化挙動(図-1(b))が Pushover 解析による軟化挙動(図-1(a))で近似できれば倒壊挙動の予測を静的解析に基づく簡易な手法で行うことも可能になる。よって、本研究では図-1(b)に示す動的解析における橋脚頂部の水平復元力(全等価水平復元力<sup>2)</sup>)に関する軟化挙動が Pushover 解析のそれで近似できるか否かについて基本的な検討を行う。一般に橋脚頂部には水平復元力のみならず復元モーメントも作用するので、水平復元力成分としては復元モーメント成分を等価水平復元力成分に置換して考慮した全等価水平復元力を用いる。

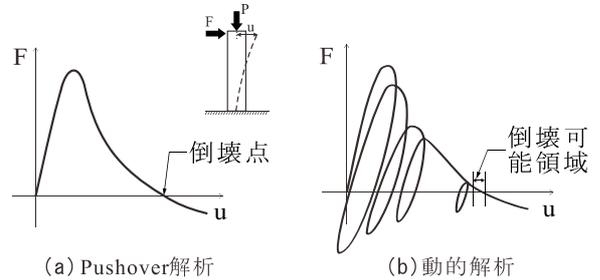


図-1 各種解析による倒壊挙動

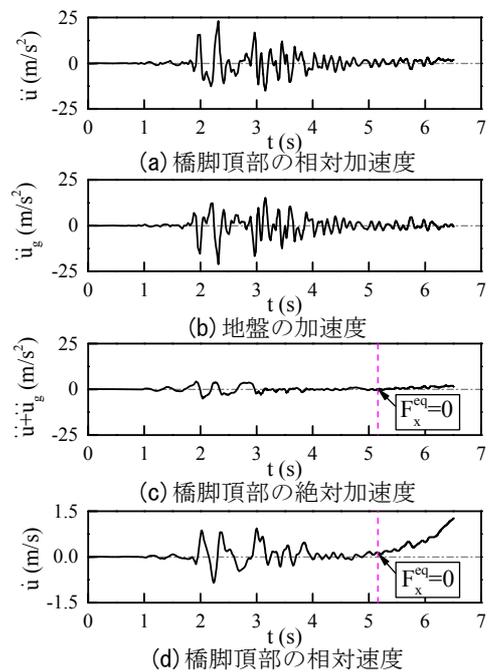


図-2 橋脚に作用する加速度と速度

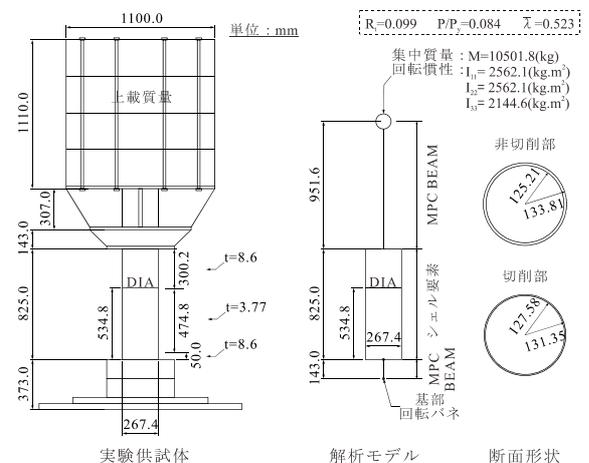


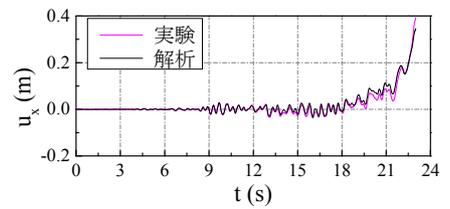
図-3 加振実験供試体と解析のモデル化

キーワード: 崩壊制御, 崩壊解析, 崩壊判定法, 鋼製橋脚

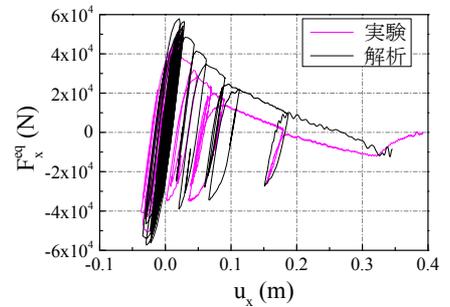
連絡先: 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学

**3. 複合非線形動的解析に基づく橋脚の倒壊解析：**

地震動下の橋脚の倒壊挙動を検討するには動的複合非線形解析に基づく精緻な倒壊解析法を準備する必要がある。精緻な倒壊解析法としては大変形領域までの局部座屈挙動を精度よく表現できるように橋脚躯体(ダイヤフラムを含む)を材料構成則に三曲面モデル<sup>3)</sup>を導入したシェル要素で離散化した複合非線形動的解析を用いる。この解析の精度を実験橋脚の1/8スケールの無充填円形断面鋼製橋脚供試体(図-3)に対してTsugaru(LG成分)×3.0の地震波を入力した水平1方向加振による倒壊実験により検討する。解析モデルでは上載質量部分を柱に剛結した剛体要素によりモデル化し、その上載質量中心に集中質量と回転慣性要素を考慮する。解析と実験の比較として、図-4(a)に橋脚頂部水平変位の時刻歴応答を示しているが、倒壊に至るまで実験結果と解析結果はよく一致している。また、図-4(b)には質量中心の全等価水平復元力と水平変位の履歴挙動を示す。等価水平復元力の解析値は実験値を多少上回っているが、荷重変位関係の履歴挙動はよく再現されている。以降、この解析モデルを用いて地震動下の橋脚の倒壊挙動を検討する。



(a) 水平変位の時刻歴応答



(b) 全等価水平復元力と水平変位の関係

**4. 地震動下の動的崩壊挙動と Pushover 解析による静的崩壊挙動の比較：**

複合非線形動的応答解析による動的な倒壊解析は、図-3と同じモデルを対象に、水平1方向入力地震波としてはJMA(NS成分)およびJRT(EW成分)に一定の倍率を乗じた複数の地震波を用いる。一方、静的な倒壊解析は質量中心の水平変位を単調に増加させるいわゆる Pushover 解析による。

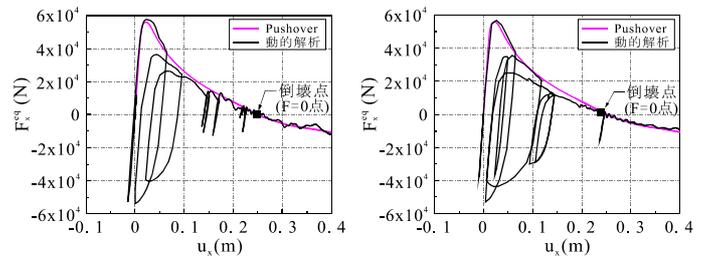
複合非線形動的解析結果と Pushover 解析結果の比較として、まず、代表的なケースである JMA\_NS×2.60, JRT\_EW×1.80 の場合について全等価水平復元力と水平変位の履歴挙動と Pushover 解析による水平復元力と水平変位の関係を図-5(a)に比較している。これより Pushover 解析による軟化曲線は動的解析による履歴曲線の軟化域での包絡線になっており地震動下の倒壊挙動を良く表現しているといえる。また、同じケースについて質量中心の水平変位  $u_x$  と鉛直変位  $u_y$  の関係ならびに軟化域での水平復元力の零点  $F=0$  を動的解析と Pushover 解析について図-5(b)に比較しているが両者はほぼ一致している。さらに、表-1には軟化域での  $F=0$  点での水平変位成分と鉛直変位成分の値について動的解析値に対する Pushover 解析値の誤差を各種入力地震動下について示しているが、その差はいずれも 10%以下である。これらの結果は、地震動による動的倒壊挙動を静的な問題に置き換えることが可能であることを示唆している。

**5. まとめ：**

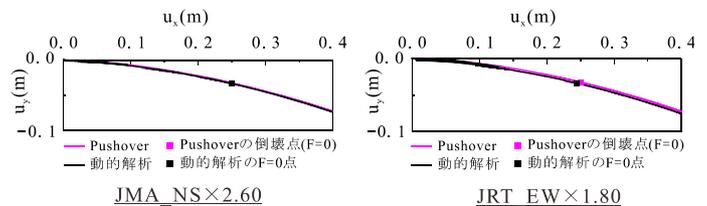
単柱の無充填円形断面鋼製橋脚を対象とした加振による倒壊実験と精緻な複合非線形動的解析による倒壊解析より、橋脚の倒壊時の挙動特性を検討した。その結果、実験供試体の範囲ではあるが橋脚の動的な倒壊挙動は静的な Pushover 解析でかなりの精度で予測できることが明らかとなった。

【参考文献】 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012。 2) 後藤芳顕ら：2 方向水平力と 2 軸曲げを受ける鋼製橋脚の限界状態と連続高架橋の耐震安全性の検討，構造工学論文集，Vol.57A，pp490-499，2011。 3) 後藤芳顕ら：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.189-206，1998。

図-4 解析モデルの精度



(a) 全等価水平復元力と水平変位の関係



(b) 鉛直変位と水平変位の関係

図-5 動的解析と Pushover 解析の比較

表-1 倒壊点の水平変位と鉛直変位

|          | Pushover 解析結果との差 (%) |            |
|----------|----------------------|------------|
|          | 水平変位 $u_x$           | 鉛直変位 $u_y$ |
| JMA×2.50 | -3.20                | -1.54      |
| JMA×2.55 | -0.88                | 1.85       |
| JMA×2.60 | 0.00                 | 3.08       |
| JRT×1.80 | -2.40                | 4.31       |
| JRT×1.85 | -4.85                | -1.54      |
| JRT×2.00 | 2.72                 | 7.69       |