

大加速度の上下動を受ける鋼製円筒橋脚の局部座屈現象に関する解析的検討

東京都市大学 学生会員 ○岡本翔太 防衛大学校 正会員 森 雅美
東京都市大学 正会員 増田陳紀

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震（都市直下型地震）では，鋼製円筒橋脚の軸対称局部座屈現象が見受けられた．この損傷の原因として，水平動に起因するとの見解が大方を占めている．しかし，これ以降の 2008 年岩手・宮城内陸地震¹⁾では $3,866\text{gal}(\text{gal}=\text{cm/s}^2)\div 3.9g$ (g :重力加速度)，2011 年 Christchurch 地震 (New Zealand)²⁾では $1,851\text{gal}\div 1.9g$ と約 $2g$ 以上にも達する大加速度の上下動が観測され，従来の耐震基準の認識（上下水平最大加速度比 $a_v/a_h < 0.5$ ）を大きく超える $a_v/a_h > 2.5$ となり，その前提条件を覆すものであった．このような近年の地震観測例を踏まえ，上下動の構造物への影響は無視できず，今後懸念される 3 大都市圏での内陸直下型地震に対しては，水平動だけでなく上下動に対する対策を併せて考える必要があるとの見解³⁾が示されている．

本報告は，橋脚が上記のような大加速度の上下動を受ける場合を想定し，局部座屈現象の発生条件等を数値解析的に検討したものである．

2. 数値解析概要

数値解析には汎用非線形構造解析プログラム MSC.Marc⁴⁾を用い，鋼製円筒橋脚の塑性局部座屈挙動を考慮した複合非線形動的解析を行った．

(1) 解析対象

解析対象は，阪神高速神戸 3 号線の鋼製円筒橋脚である．この橋脚の特徴は，中間部分にダイアフラムを持つ長さ $h=1,800\sim 2,000\text{mm}$ の鋼管セグメントを突き合わせ溶接により継ぎ合わせたものであること，鋼管の管種および板厚がセグメント毎に変化していること，また橋脚基部に車両衝突時の変形防止用のコンクリートが充填（フーチング基礎上の固定端から $2,628\text{mm}$ まで）されていることである⁵⁾．円筒部の主要な寸法は，外径 $D=2,200\text{mm}$ ，高さ $H=14,377.6\text{mm}$ （固定端から）であり，2 箇所の板厚変化部 ($t=19\text{mm}\rightarrow 21\text{mm}$ と $t=21\text{mm}\rightarrow 28\text{mm}$) のうち，後者の薄肉側直上で局部座屈が生じている．

(2) 解析モデル

円筒部（鋼管セグメント）とダイアフラム並びに想定座屈様式の軸対称性を考慮し，かつ解析上の境界条件処理の都合を考慮して，図-1 に示す 1/4 モデルを解析モデルに設定した．円筒部，ダイアフラムと円筒部上端に上載される上部工（重量：4,727kN）には 4 節点シェル要素を用いた．

円筒部とダイアフラムの管壁の中立軸の

節点座標が異なるため，これらに配置する 4 節点シェル要素の接合部に

存在しない仮想の 8 節点ソリッド要素を挿入し，要素の連続性を確保した．コンクリート充填部の縦弾性係数 E と質量密度 ρ は，文献⁶⁾と同じくそれぞれ梁としての弾性曲げ剛性と回転慣性が等価な鋼管のものと等しくなるよう調整した．上部工，円筒部とダイアフラムの各鋼材とコンクリートの材料諸元を表-1 に示す．円筒部に対し土木学会式⁷⁾，ダイアフラム，上部工とコンクリートに対しては Bilinear 型の弾塑性構成則を用いた．

(3) 入力地震波

入力地震波は，図-2 に示す 1995 年兵庫県南部地震の (a) KOBE⁸⁾，2008 年岩手・宮城内陸地震の (b) IWTH25 と 2011 年 Christchurch 地震の (c) PRPC の上下動の記録を用いた．時間積分にあたっては，減衰は無視し，時間刻みは 0.01 秒で，single step Houbolt 法より 10 秒間応

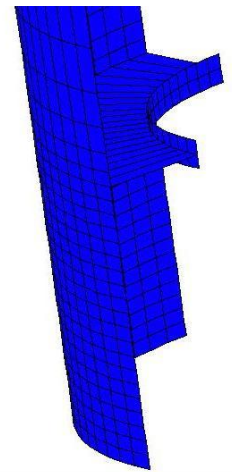


図-1 解析モデル
(断面変化部近傍のみ表示)

表-1 材料諸元

材料		鋼	コンクリート
要素		4節点シェル	
縦弾性係数	$E[\text{GPa}]$	206	275
ポアソン比	ν	0.30	
降伏応力	$\sigma_y[\text{MPa}]$	SS400	235
		SM400A	257
		SM490A	327
		SM490B	
		コンクリート	327
質量密度	$\rho[\text{kg/m}^3]$	7850	29415
備考	円筒・ダイアフラム接合部: 8節点ソリッド要素 上部工: 4節点シェル要素		

キーワード 上下動，鋼製円筒橋脚，ダイアフラム，局部座屈現象，複合非線形動的解析

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 TEL: 03-5707-0104 FAX: 03-5707-2222

答解析した。

3. 解析結果

(1) 全般状況

KOBE を入力した解析では、発生ひずみは弾性領域内で、局部座屈は生じなかった。約 4g を観測した

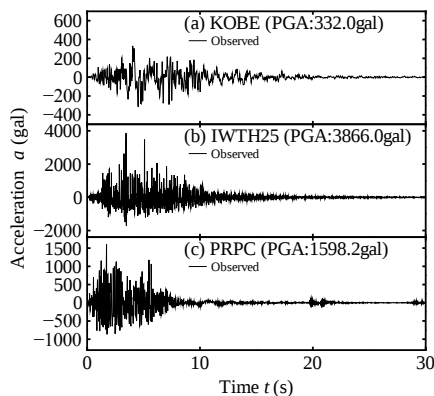


図-2 入力地震動の種別 (上下動)

Iwth25 と同程度の加速度レベル (10 倍) にしても、断面変化部 ($t=19\text{mm} \rightarrow 21\text{mm}$) において局部座屈が生じなかった。さらに、質量密度 ρ を 1.4 倍にすると、実被害例と同じく断面変化部 ($t=21\text{mm} \rightarrow 28\text{mm}$) の薄肉側の直上において、図-3 に示す環状の軸対称 bulge 型の局部座屈が生じた。

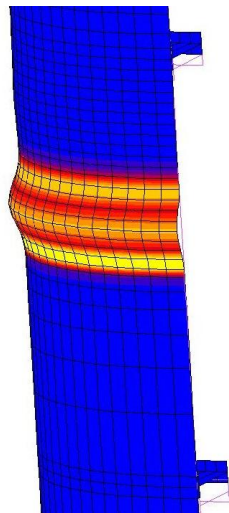


図-3 bulge 型 局部座屈

Iwth25 と PRPC に対して、質量密度 ρ を 1.4 倍にすると KOBE の場合と同様の環状の軸対称局部座屈が生じた。

(2) Christchurch 地震

前節の 3 つの地震動に対する解析結果の中で、Christchurch 地震での時刻歴応答を図-4 に示す。図中、(a)は平均軸ひずみ u_a/H (u_a : 円筒部の右端境界面での上下端 (節点 42 と 2730) の軸方向変位の差)、(b)は半径方向変位比 u_r/D (u_r : 板厚変化部 ($t=19\text{mm} \rightarrow 21\text{mm}$; 節点 168) と板厚変化部 ($t=21\text{mm} \rightarrow 28\text{mm}$; 節点 1120) での半径方向変位)、(c)は下端部の全節点 (2626~2646) の反力の和より算定した荷重、(d)と(e)はそれぞれ(b)で示した節点近傍の要素 (119 と 1065) 積分点での相当塑性ひずみと相当応力である。また、(c)と(e)の点線はそれぞれ、文献⁹⁾に掲載されている等断面の中心軸圧縮鋼管短柱に対する種々の機関の無次元化静的塑性局部座屈強度算定式

$$\frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_y} = 1, \quad \alpha \geq 8.0 \quad (1)$$

より求められる塑性局部座屈荷重 P_{cr} と塑性局部座屈強度 $\sigma_{cr,p}$ であり、無次元化局部座屈パラメータ α は次式で

表される。

$$\alpha = \frac{E / \sigma_y}{D / t} \quad (2)$$

本橋脚の断面変化部の板厚 ($t=21\text{mm}$ と 28mm) に対する α は 8.4 と 11.1 となり、式(1)の適用範囲を満たす。

図-4 より、時刻 1.7s で断面変化部 ($t=19\text{mm} \rightarrow 21\text{mm}$) において、約 1.3%の塑性ひずみが発生するが、それ以上に進展し

ない。時刻 2.6s になると、断面変化部 ($t=21\text{mm} \rightarrow 28\text{mm}$) において半径方向変位比が増大して塑性ひずみが発生し、座屈による板曲げにより約 6.0s で約 31.5%まで急増している。この部分の鋼材 SS400 の破断ひずみが 40% 程度であることから、局部座屈頂部で割れの発生する手前まで塑性ひずみが進展したことがわかる。荷重は約 1.8s で概ね塑性局部座屈荷重と一致し、式(1)による塑性局部座屈荷重 P_{cr} の算定式の妥当性が確認される。

4. おわりに

本報告の解析結果は、近年観測されるようになった大加速度の上下動を受ける橋脚では、軸力比 P/P_y が現行の設計より 40~50%程度高くなるような設計をした場合、上下動のみでも断面変化部で軸対称座屈が生じる可能性を、また現状の設計においても、水平動と上下動の連成効果を考慮すべきことを、示唆している。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所, 強震観測網 (K-net, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- 2) GeoNet-Strong Motion Data, <http://www.geonet.org.nz/resources/basic-data/strong-motion-data/>.
- 3) 五十嵐俊一: 連発・直下型 Christchurch 地震と CTV ビル崩壊が示した課題「次の地震」に対して安全な構造物を確保する建物のシートベルトの必要性, http://www.sqa.co.jp/opinion/seat_belt.pdf.
- 4) エムエスシーソフトウェア(株): MSC.Marc2001 日本語オンラインマニュアル, A~E 編.
- 5) 池内智行, 谷口直子, 西村宣男, 中川知和: 兵庫県南部地震における鋼管橋脚損傷の数値シミュレーション, 鋼構造論文集, 第 4 巻第 14 号, pp.29-38, 1997.6.
- 6) 後藤芳顕・王慶運・高橋宣男・小畑誠: 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, 1998.4.
- 7) 宇佐美 勉編著: 鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 技報堂出版, pp.104-105, 2006.9.
- 8) 気象庁| 強震波形 (兵庫県南部), http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/table.htm
- 9) Galambos, T.V.ed: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 5th ed., John Wiley & Sons, New York, pp.533-536, 1998.

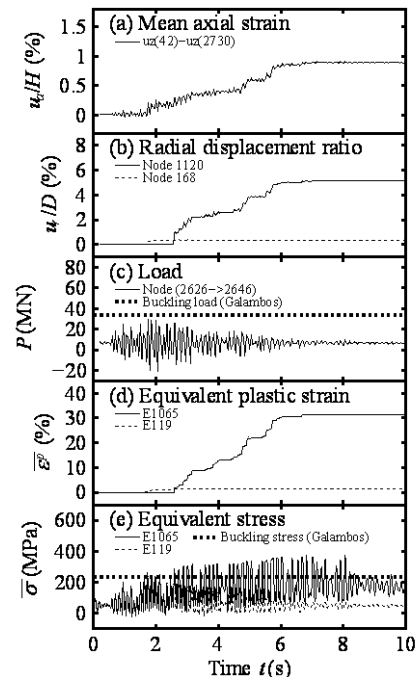


図-4 時刻歴応答