大加速度の 3 方向地震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　○水島千賀子　　元防衛大学校　正会員　森　雅美
東京都市大学　正会員　白旗弘実　　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，単柱式鋼製円筒橋脚の環状の軸対称局部座屈現象をはじめとする軸方向に卓越した特異な損傷例が見受けられた．既往研究 [1)-4)]では，神戸海洋気象台で観測された水平動と上下動の加速度記録（JMA KOBE）[5)]を入力した被災橋脚の損傷解析から，局部座屈の発生原因は水平動に起因するという見解が大方を占めている．しかし，それらの研究では震災の帯（震度 7）の外である神戸海洋気象台の地震記録を損傷解析に用いており，必ずしも損傷原因が完全に解明されたとは言えない状況にある．

近年の，2008 年岩手・宮城内陸地震 [6)]では約 3.9*g*（*g*：重力加速度），2011 年 Christchurch 地震 [7)]では約 1.9*g* と約 0.3*g* の JMA KOBE 地震記録の約 6~13 倍もの大加速度の上下地震動（直下型地震）が観測された．これらは，現行の道路橋示方書 [8)]での認識である上下水平最大加速度比 *V*/*H*＜0.5 という前提条件を大きく覆すものであった．

本報告は，鋼製円筒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，水平 2 方向地震動と組み合わせ，局部座屈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.Marc 2013[9)]を用いた．解析対象は，阪神高速神戸 3 号線の鋼製円筒橋脚であり，**図-1 と図-2** に解析モデルを示す．鋼管部（鋼管とダイアフラム）には 4 節点シェル要素（#75）を用い，局部座屈波形が発生する可能性のある構造弱点部 3 箇所（2 箇所の板厚変化部（*t*=19mm→21mm と *t*=21mm→28mm）とコンクリート充填境界部近傍）の軸方向は細分割した．上部工（橋桁：重量 4,727kN）は，鋼管部天端から高さ 3,500mm の位置（文献 [10)] を参考）に offset（tying 機能：rbe2）し，以下の 2 種類にモデル化した．**図-1** の Type A（集中質量モデル）では集中質量（conm2）に，**図-2** の Type B（はりモデル）では弾性体と仮定し，Saint-Venant のねじりを考慮した 3 次元 Timoshenko はり要素（#98）で置換した．Type B の上部工の橋軸方向は EW 方向から 37° とした．鋼管部の物性値は，縦弾性係数 *E*=206GPa，ポアソン比 *ν*＝0.3，降伏後の接線係数比 E_t/E=1/100，質量密度 ρ=7,850kg/m^3 とし，降伏応力 σ_y は電力中央研究所の単調引張試験結果 [11)]を基に設定した．コンクリート充填部の物性値は，この部分をシェル要素でモデル化するため *E*=275GPa，ρ=29,415kg/m^3（文献 [2)] を参考）と設定した．境界条件は，鋼管下端部の全節点と Type B（はりモ

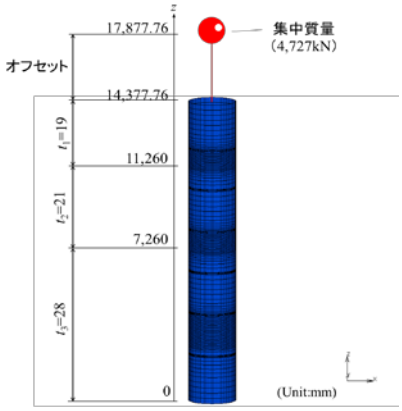

図-1 解析モデル（Type A）

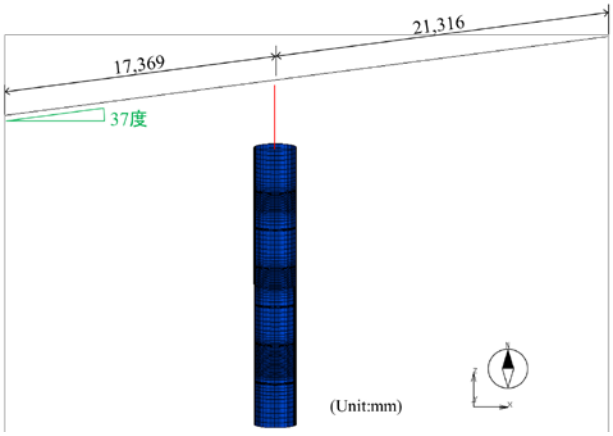

図-2 解析モデル（Type B）

表-1　解析方法

解析種別	複合非線形動的解析
・材料非線形：von Mises降伏条件と関連流動則に従う移動硬化則	
・幾何学的非線形：Updated Lagrange法	
材料構成則	接線係数比 E_t/E=1/100 のbilinear型
収束計算	Newton-Raphson法
収束判定	残差力と残差変位の相対誤差（許容値=1%）
減衰評価	なし
解析ステップ	0ステップ：初期応力解析（静的自重解析：重力加速度）
	1ステップ以降：地震応答解析（地震加速度）

キーワード　3 方向地震動，鋼製円筒橋脚，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 東京都市大学 世田谷キャンパス TEL:03-5707-0104

デル）のはり両端節点の自由度を全固定とした．**表−1** に解析方法を示す．なお，残留応力と幾何学的初期不整の影響は無視した．

入力地震動は，**図−3** に示す Christchurch 地震の PRPC 観測地点での水平 2 方向（EW，NS）と上下方向（UP）の加速度記録 [7]（主要部分の 10 秒間を取り挙げる）であり，橋脚下端部の全節点に入力した．図中，赤丸印と赤矢印は最大加速度を示す．

3. 解析結果と考察

図−4 と**図−5** は，それぞれ水平 2 方向地震動（EW+NS : 現行の道路橋示方書 [8] に準拠して上下動を考慮しない）入力の場合と 3 方向地震動（EW+NS+UP : 上下動を考慮）入力の場合の 3 箇所の構造弱点部における Type A と Type B の相当塑性ひずみの時刻歴を示している．図中，点線（青色）は上部の断面変化部を，実線（赤色）は中間部の断面変化部を，また破線（黒色）はコンクリート充填境界部での解析結果を表す．

水平 2 方向地震動入力（**図−4**）の場合では，相当塑性ひずみはコンクリート充填境界上部約 90cm の位置で最終的に Type A で約 16%，と Type B で約 19%に達して局部座屈波形が発生するが，発生位置は被災橋脚のもの（中間部の断面変化部）を再現できていない．

一方，3 方向地震動（**図−5**）入力の場合では，相当塑性ひずみは中間部の断面変化部直上 10cm の位置において最終的に Type A で約 21% , Type B で約 30%に達し , 局部座屈発生位置は被災橋脚のものを再現し得ている．時間の経過に伴う塑性域は，Type A では上部の断面変化部から中間部の断面変化部へと上から下へ，Type B ではコンクリート充填境界部から中間部の断面変化部へと下から上へと推移し，両者で逆向きになった．中間部の断面変化部での局部座屈波形は，Type A（**図−6**）では水平 2 方向の加速度の合成ベクトル方向のみが膨らむ半周 bulge 型となった．一方，Type B（**図−7**）では合成ベクトル方向に加え，その逆方向の膨らみも生じ，被災橋脚と類似したほぼ軸対称の周回 bulge 型となった．

4. まとめ

以上より，上下動は水平動と連成して被災橋脚の局部座屈発生位置の特定に決定的な影響を及ぼし，上下動を考慮した 3 方向地震動入力により被災橋脚の局部座屈波形の形状と発生位置を再現できることが示された．このことは，現行の道路橋示方書 [8] の耐震規定において，上下動を考慮する見直しが必要となることを示している．

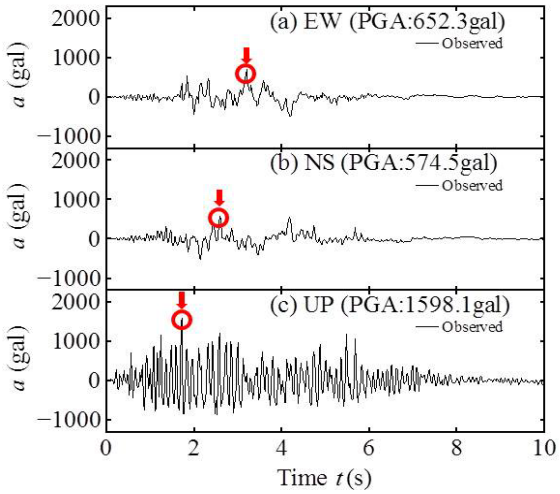

図-3 入力地震動（Christchurch，PRPC）

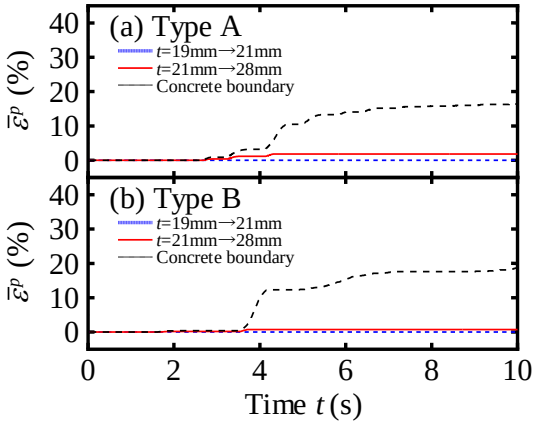

図-4 時刻歴応答（水平 2 方向地震動入力）

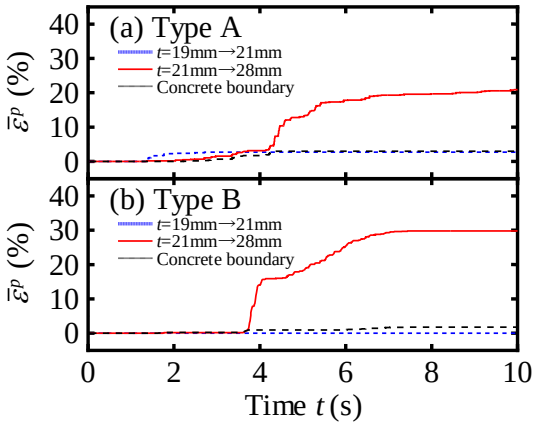

図-5 時刻歴応答（3 方向地震動入力）

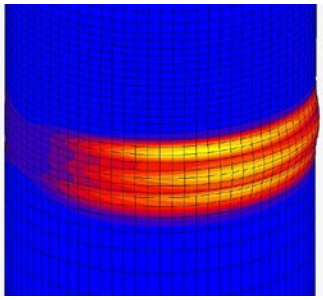

図-6 半周 bulge 型局部座屈（Type A）

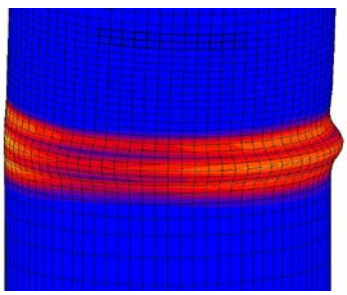

図-7 周回 bulge 型局部座屈（Type B）

参考文献

1)中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集，No.549/ I-37, pp.205-219, 1996.10. 2)後藤芳顯・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. 3)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. 4)伊藤義人・森正樹：極大地震時の円形断面鋼製橋脚の挙動に関する研究，鋼構造年次論文報告書，第4巻，pp.33-40, 1996.11. 5)気象庁 強震波形（平成7年(1995年)兵庫県南部地震），http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html. 6)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/. 7)GeoNet-Quakes，http://www.geonet.org.nz/resources/basic-data/strong-motion-data/. 8)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2012.3. 9)エムエスシーソフトウェア(株)：汎用非線形構造解析プログラム MSC.Marc/Mentat 2013 日本語オンラインマニュアル，A～E 編. 10)後藤芳顯，海老澤健正：3 方向地震動を受ける正方形断面鋼製橋脚の限界状態の評価法，構造工学論文集，Vol.58A, pp.399-412, 2012.3. 11)中村秀治：阪神高速神戸線P-584, P-585橋脚の材料試験結果，震災調査特別小委員会，pp.1-22, 1996.8.3.