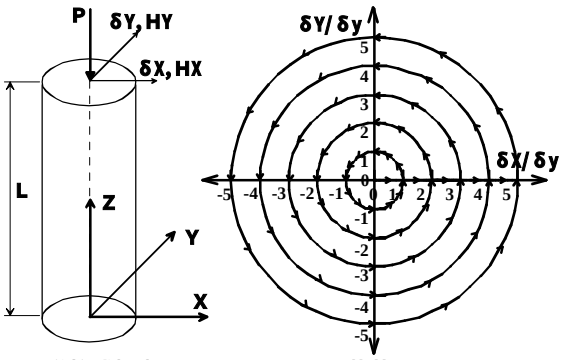
円形繰り返し載荷を受ける円形断面薄肉鋼製橋脚の三次元終局挙動と変形能

名古屋高速道路公社　正会員　桑原　史晃　名古屋工業大学　正会員　後藤　芳顯
名古屋工業大学　正会員　小畑　誠

1．はじめに：　円形断面鋼製橋脚の耐震性能は兵庫県南部地震直後に行われた一軸方向の静的繰り返し実験ならびにシェル要素を用いた複合非線形解析により検討されている[1)2)]．しかしながら，実情に即した耐震性を検討するには入力地震波として，少なくとも水平２方向成分の連成を考えた検討を行うことが重要である．事実，矩形断面橋脚を対象とした２軸の繰り返し載荷実験から，１軸載荷に較べ最大荷重や変形能などの耐震性能が著しく低下する場合があることが報告されている[3)]．ここでは，まず，名古屋工業大学で開発した精密な３次元擬似動的載荷実験装置[4)]を用いて，円形断面橋脚を対象に一定軸力下で最も厳しい２軸載荷の一つと考えられる変位制御による繰り返し円形載荷と従来の一軸載荷を行いその性状を比較する．つぎに，このような３次元繰り返し挙動予測への材料構成則である３曲面モデルを用いた複合非線形解析の適用性について検討する．さらに，複合非線形解析によるパラメトリックスタデイを実施して最大荷重と変形能の観点から２軸載荷による耐震性能低下について考察する

2．円形繰り返し載荷実験と複合非線形解析：　３次元載荷装置による円形載荷実験としては一定軸力下で，**図１**に示す降伏水平変位δ_yの整数倍の振幅(円形載荷の半径)で各振幅３サイクルの頂部水平変位に関する繰り返し円形載荷を$5\delta_y$の振幅まで行う．また，比較のために，同じ振幅とサイクル数で１軸の繰り返し載荷を行う．供試体としては単柱形式の橋脚を想定して，圧力配管用炭素鋼管STPG370(　$267.4\phi\times12.7t\times1460l$　，　$\sigma_y=304Mpa$　，$\sigma_u=610Mpa$)の径厚比パラメータを$R_t=0.07$に調整するために，鋼管の基部を 500mm にわたり切削し肉厚を 4.5mm としたものを用いる．実験結果として繰り返し載荷における Y 軸方向成分に関する水平荷重－水平変位関係($H_Y-\delta_Y$)の３サイクル目の包絡線を，降伏水平荷重H_yである$5\delta_y$の場合を除き，いずれも実験結果と良く一致しており，このような鋼製橋脚の３次元繰り返し挙動を十分な精度で予測できるものと考えられる．



a 単柱式橋脚　　b 円形載荷パターン

図１　円形断面単柱式橋脚と繰り返し載荷パターン

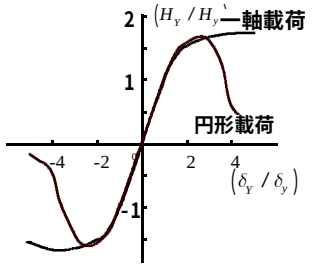
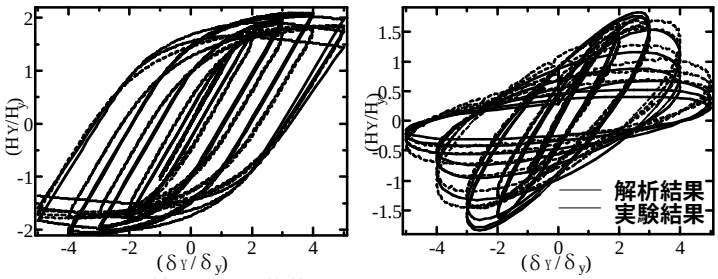


図２　一軸繰り返し載荷実験と円形載荷実験による包絡線の比z較



a　一軸繰り返し載荷　　b　円形載荷

図３ 構成則に三曲面モデルを用いた複合非線形解析の精度

表１　解析モデルの諸元(軸力比α=0.15)

供試体	①	②	③	④	⑤	⑥
橋脚高さ L (m)	8.0	8.0	8.0	11.0	11.0	11.0
板厚 t (m)	0.0449	0.0337	0.0270	0.0449	0.0337	0.0270
径厚比パラメータ Rt	0.06	0.08	0.1	0.06	0.08	0.1
細長比パラメータ λ	0.293	0.291	0.290	0.402	0.400	0.399
降伏水平変位 δy (m)	0.0362	0.0362	0.0362	0.0648	0.0648	0.0648
軸力 P (kN)	13459.0	10151.5	8149.7	13459.0	10151.5	8149.7

キーワード：鋼製橋脚，耐震，変形能，３次元繰り返し載荷
連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町　名古屋工業大学

る．橋脚の材質は SM490 とし**図４**に示す１軸の真応力－対数ひずみ関係を持つものとし，これに対応した３曲面モデルのパラメータを**表２**に示す．繰り返し載荷の方法は先の実験で説明したとおりであるが，各振幅での載荷サイクルは従来の検討で採用されているように１サイクルとする．解析モデルの形状とシェル要素 S4R による分割を**図２**に示す．解析モデルは無補剛の円筒で外形を 2.0m に固定し，板厚変化の際は内径を変化させるものとする．上部のはり要素は橋脚の横ばりに相当し，剛体はり要素を用い境界で断面不変・平面保持の仮定の下にシェル部分と連結している．橋脚下端部は剛結としている．

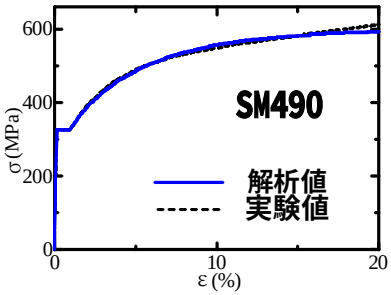


図４　真応力対数ひずみ関係

４．三次元繰り返し荷重下の耐震性能に関する考察：　耐震性能を評価する上で重要な指標として，繰り返し載荷の Y 成分に関する $H_Y-\delta_Y$ 関係の包絡線の最大荷重 H_{Ym}/H_y，最大荷重時の変位 δ_{Ym}/δ_y，荷重が $0.95H_{Ym}$ に低下した点での変位 δ_{Y95}/δ_y を選び，３次元円形載荷による特性を１軸載荷とを比較することで検討する．文献 2)には１軸載荷について，上記３つの指標を構造パラメータにより予測する実験式が誘導されているので，今回の円形載荷と１軸載荷の解析結果についても同様の整理を行い，結果を**図６**に示す．この図より１軸載荷に較べ円形載荷では H_{Ym}/H_y ならびに δ_{Y95}/δ_y がかなり低下することがわかる．とくに，最大荷重到達後の荷重の低下は大きい．一方，δ_{Ym}/δ_y は円形載荷の方が逆に増加している．これは，円形載荷では最大荷重 H_{Ym} が低下するのに加えて，最大荷重到達までに剛性低下も生じる結果として δ_{Ym} が増加することによる．なお，文献 2)に示されている１軸載荷における予測式は H_{Ym}/H_y，δ_{Y95}/δ_y についてはばらつきがあるものの比較的良い結果となっているが，δ_{Ym}/δ_y については過大評価している．以上の結果より，３次元円形繰り返し載荷は非常に厳しい載荷様式ではあり，従来耐震性能の評価に用いられた１軸繰り返し載荷にくらべ，円形断面橋脚の耐震性能はかなり低下することが判明した．とくに，δ_{Y95}/δ_y を限界点とする耐震設計方法では，３次元載荷の影響が大きく現れる可能性がある．

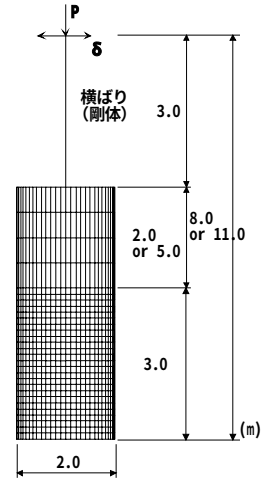


図５　解析モデルの要素分割

表２　三曲面モデルのパラメータ

鋼種	SM490
$E(\times10^5 MPa)$	2.058
$\sigma_y(MPa)$	325.0
$\sigma_u(MPa)$	600.0
ν	0.3
ε_{yp}	0.00784
f_b/σ_y	0.65
β	100
H_{dci}/E	0.05
ξ	0.4

謝辞：本研究をまとめるにあたり，名古屋工業大学大学院博士前期課程佐藤崇洋氏の協力を得た．また，本研究は科学研究費基盤 B(2)14350242 の援助を受けている．

参考文献：1)後藤ら：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-43,1998 ，2)Gao et al.: Numerical study on seismic performance evaluation of steel structures, NUCE Research Report, No.9801, Nagoya Univ. 1998, 3)Watanabe et al.: Effects of multi-directional displacement paths on the cyclic behavior of rectangular hollow steel columns, 土木学会論文集，No.647/I-51,2000, 4)Obata et al.: Multi-directional pseudo dynamic experiment of steel bridge pier, Proc. ICASS'02, Hong Kong, 2002.

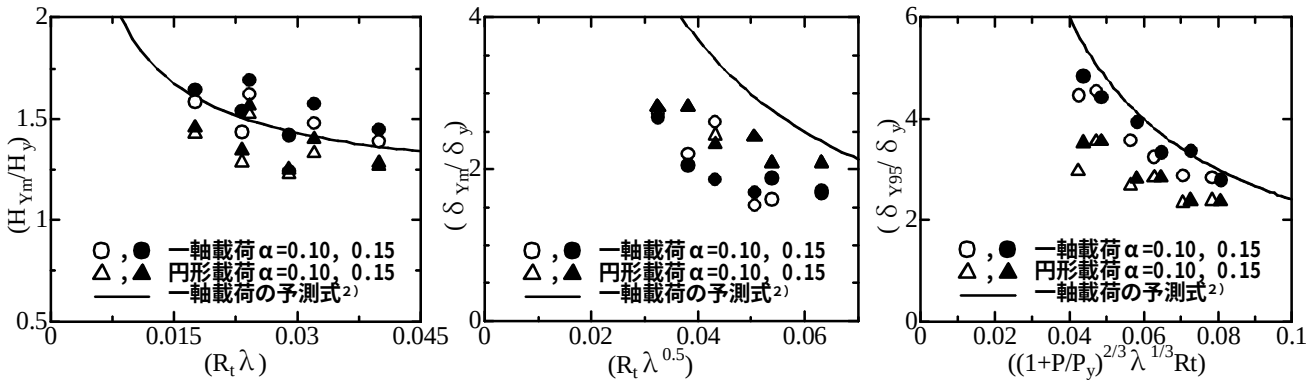


図６　H_{Ym}/H_y，δ_{Ym}/δ_y，δ_{Y95}/δ_y と構造パラメータの関係