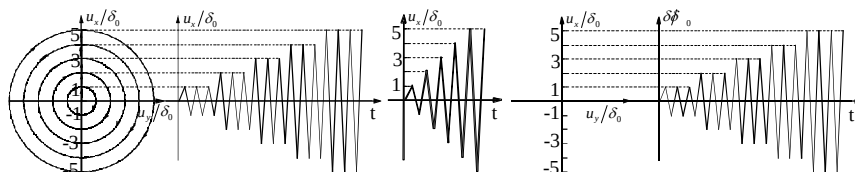


2 方向繰り返し载荷を受ける円形断面鋼脚柱の履歴特性の検討

鹿島建設（株）
名古屋工業大学正会員 佐藤 崇洋
正会員 後藤 芳顕名古屋工業大学 学生会員 江坤生
名古屋工業大学 正会員 小畑 誠

(1)はじめに： 橋脚柱に要求される耐震性能をより確実に照査するためには、少なくとも水平2方向成分の地震動の連成を考えた検討を行うことが重要である。ここでは、まず、名古屋工業大学で開発した精密な3次元载荷装置¹⁾



(a)円形3回繰り返し载荷 (b)円形1回繰り返し载荷 (c)1方向3回繰り返し载荷
図-1 载荷プログラム

いて、一定軸力下の最も厳しい2方向载荷の一つである変位制御による円形繰り返し载荷と比較のため1方向繰り返し载荷実験を行い2方向载荷での終局挙動特性を検討した。また、鋼材の繰り返し構成則として3曲面モデル²⁾とシェル要素を用いた複合非線形FEM解析の2方向繰り返し载荷での終局挙動予測への適用性についても確認した。

(2)载荷プログラム： 2方向繰り返し载荷実験での载荷経路については数多く行われてきた一定軸力下での1方向漸増繰り返し载荷と直接的に対照でき、さらに、現実的で厳しいものが望ましい。円形断面柱の場合、断面に方向性がないため、厳しい载荷経路として漸増型の円形繰り返し载荷を選択する。漸増型の円形繰り返し载荷（1回繰り返し、3回繰り返し）での振幅の増加方法については、図-1に示すように制御する方法を採用する。ここで、 $\delta_0 = H_0 h^3 / (3EI)$ 、 $H_0 = (\sigma_y - P/A)Z/h$ で降伏水平変位と降伏水平荷重ある。

(3)供試体： 供試体として用いる円形薄肉断面鋼脚柱の形状および寸法を図-2に、構造パラメータの値を表-1にまとめる。径厚比パラメータ R_t が薄肉断面鋼管の終局挙動に大きな影響を与えるため、ここでは実構造に合わせるように、ベースプレート上部から50～500mmの範囲で圧力配管用炭素鋼管STPG370の内外面を板厚が $t=3.5$ と $t=4.5$ となるように切削する。鋼管STPG370の長手方向に関する材料の1軸真応力-対数ひずみ関係をPT4.5-1、PT4.5-2の素材を例に図-3に示す。この図中には3曲面モデルに用いた応力-ひずみ関係の曲線近似も示している。

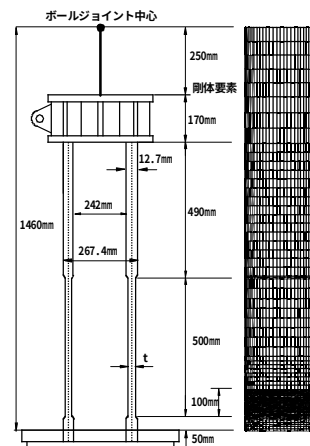


図-2 実験供試体と解析モデル

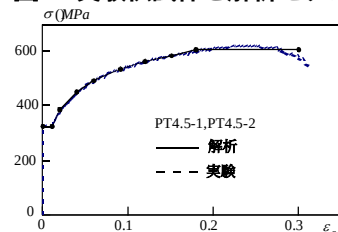


図-3 鋼管素材の1軸真応力-塑性対数ひずみ関係

表-1 供試体の幾何学的定数

供試体	t (mm)	R_t	λ	α	H_0 (kN)	δ_0 (mm)	鋼種	载荷プログラム
PT4.5-1	4.698	0.0682	0.270	0.129	44.0	5.34	STPG370	1方向3回繰り返し
PT4.5-2	4.634	0.0714	0.260	0.126	46.6	5.24	STPG370	円形3回繰り返し
PT4.5-3	4.470	0.0731	0.263	0.137	43.9	5.07	STPG370	円形1回繰り返し
PT3.5-1	3.500	0.0934	0.263	0.136	34.5	4.92	STPG370	円形1回繰り返し

表-2 供試体の材料定数

供試体	鋼種	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_{su}	f_u/σ	β	ρ	κ	ξ
PT4.5-1,PT4.5-2	STPG370	206	0.3	324.6	592.4	0.0104	0.65	150	2	2	0.3
PT4.5-3,PT3.5-1	STPG370	206	0.3	320.5	578.5	0.0110	0.65	150	2	2	0.3

(4)履歴挙動特性の検討

a.実験結果： 载荷実験結果として x 方向成分の水平荷重-水平変位関係ならびに鉛直方向変位- x 方向水平変位関係を図-4(a)～(d)に示す。つぎに、1方向繰り返しと円形繰り返しの履歴曲線に関する比較を示すために3回繰り返しにおける y 方向の水平荷重-水平変位関係から

求めた包絡線を図-5に示す。円形繰り返し载荷は1方向繰り返し载荷に較べ供試体を受ける塑性履歴が大きくなるので、図-5のように包絡線で表すと振幅と復元力の関係に塑性履歴の大きさが正確に反映されない。したがって、ここでは、円形载荷の载荷パターン自体が復元力低下の原因になっていることをより明確に確認するために塑性吸収エネルギー A_E と水平方向復元力の合力 H の変動関係を図-6に示す。ここに、 $A_{E0} = 0.5H_0\delta_0$ 。また、図-4、6には比較のために鋼材の構成則として3曲面モデルを用いてABAQUSのシェル要素(S4R)により解析した結果も示している。

b.一方向繰り返しと円形繰り返しの履歴挙動比較： 1方向繰り返し载荷と円形繰り返し载荷による履歴挙動の差異を図-4(a)、(b)および図-5により比較してみると、円形载荷では1方向载荷に較べ包絡線の最大

キーワード 2方向繰り返し载荷、三曲面モデル、吸収エネルギー、復元力、有限要素法

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

荷重以降の荷重低下が大きい。荷重低下は終局状態において生ずる基部の提灯座屈に起因している。とくに、円形繰返し載荷の場合は局部座屈変形が生じると周方向に提灯座屈が急速に進展して大きな座屈変形となる。この結果、図-4(b)のごとく鉛直変位も大きくなる。一方、1方向繰返し載荷では、圧縮力により局部座屈が生じて逆方向の載荷で座屈変形部分に引っ張り荷重が作用し引き伸ばされるため提灯座屈の進行が遅く荷重の低下も小さい。提灯座屈変形が小さいことで、図-4(a)のように鉛直方向変位も小さい。このように、従来の1方向繰返し載荷では円形断面鋼製橋脚の復元力や変形能を過大に評価する可能性がある。

c. 吸収エネルギーと復元力： 1方向繰返しに比べ円形繰返しでは同じ振幅において復元力の低下が大きい。円形繰返しは1方向繰返し載荷に比べ同じ振幅において供試体が受ける塑性履歴はかなり大きくなる。したがって、円形繰返し載荷ではこの大きな塑性履歴により復元力低下が大きく生じた可能性もある。ここでは、円形載荷の載荷パターン自体が復元力低下の原因になっているか否かを確認するために図-6に示す鋼製橋脚の吸収エネルギーと水平復元力の関係をもとに検討する。図-6(a), (b)より、1方向繰返し載荷と比べると円形繰返し載荷では明らかに同じ吸収エネルギーでの荷重低下が大きく、円形載荷の載荷パターン自体が復元力の低下に影響していることが確認される。一方、円形載荷どうしでは図-6(b), (c)のように同じ振幅での繰返し回数によらず吸収エネルギーと復元力低下の関係はほぼ一定である。

d. 3曲面モデルを用いた FEM 解析の適用性： 2方向繰返し載荷をうける円形薄肉断面鋼脚柱の終局挙動予測へのFEM解析の適用性を確認するために図-4, 6には鋼材の構成則として3曲面モデルを用いてABAQUSのシェル要素(S4R)による複合非線形解析で得た結果も示している。図-4からわかるように全般的に履歴挙動は実験値と良く一致している。特に、円形1回繰返しについては図-4(c), (d)のように解析結果は実験結果と非常に良く一致している。また、図-6からわかるように水平復元力と吸収エネルギーの関係も三曲面モデルを用いた解析では比較的精度良く予測されている。以上の結果より2方向繰返し載荷をうける円形薄肉断面鋼脚柱の終局挙動予測へのFEM解析の適用性が確認される。

参考文献

- 1) 小畑, 後藤: 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.253-266, 2004.
- 2) 後藤, 王, 高橋, 小畑: 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.189-206, 1998

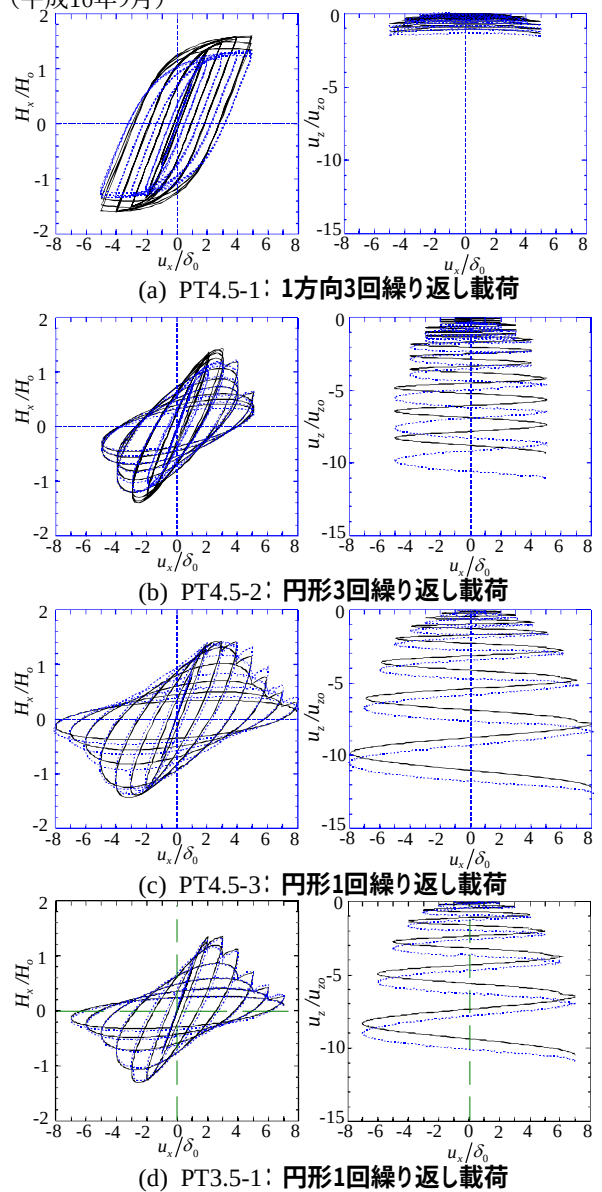


図-4 X方向水平荷重 - 水平変位曲線ならびに鉛直変位(z方向成分) - X方向水平変位曲線 (.....実験 —— 解析)

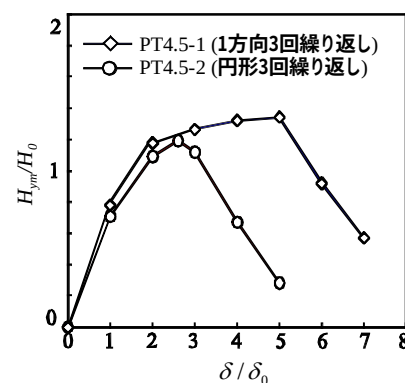


図-5 水平荷重 - 水平変位関係の包絡線

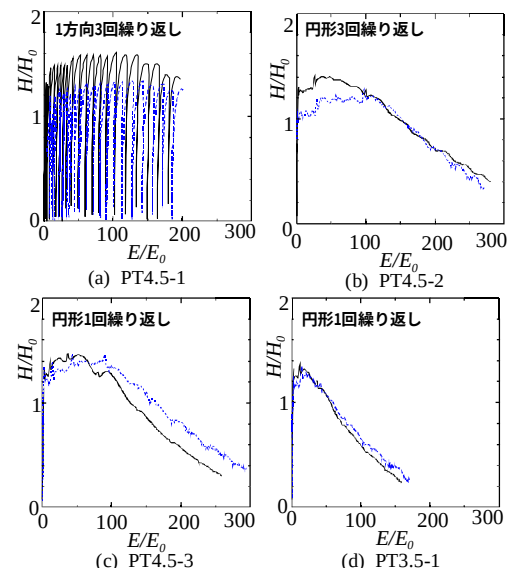


図-6 吸収エネルギーと水平復元力の関係 (.....実験 —— 解析 $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$)