論文　コンクリート充填鋼管柱の保有変形性能に関する研究

城戸　將江[*1]・津田　惠吾[*2]

要旨：性能設計に関する資料を得る目的で，実験変数として，軸力比，幅厚比・径厚比，コンクリート充填の有無，を選んで行われた既往のコンクリート充填鋼管柱の実験資料を用いて，４つの損傷限界部材角，すなわち a) 軸縮み限界部材角，b) 局部座屈発生限界部材角，c) 耐力保証限界部材角，d) 全塑性限界部材角，に達した時，および e) 実験終了時の累積塑性回転角を求めた。また，累積塑性回転角におよぼす軸力比，幅厚比・径厚比の影響，充填コンクリートの効果について検討を行った。

キーワード：性能設計，累積塑性回転角，鋼・コンクリート合成柱

1. はじめに

建築構造設計は，2000 年の建築基準法の改正以降，従来の仕様規定型の設計に加えて性能指向型の設計も行われるようになりつつある。これまでに性能設計に関する研究が行われ，性能評価法についても提案がなされている。文献 [1)] では，性能指向型設計法の考え方および性能評価の指針案が述べられており，文献 [2)] では鉄筋コンクリート造建物に対する具体的な適用例が示されている。また，文献 [3)] においても建築構造の性能設計指針が示されている。桑村ほかは，鋼構造建築物の性能の表示方法を検討し [4)]，岩田ほかは実際に被災した鋼構造建築物の実績データより，修復限界を明らかにしている [5)]。

性能設計では，要求される事項より目標性能を設定し，設計された構造物の保有性能が目標性能を上回ることを検証することが必要であり，今後，合理的な設計を行うには，建築構造物の保有性能を明らかにすることが必要である。また，構造性能を適切な工学量で定義する必要がある。

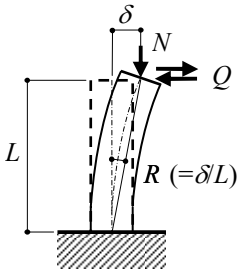
コンクリート充填鋼管部材については，CFT 部材の限界変形や累積塑性変形量といった工学量で定義する必要があるが，これまでに CFT 部材の累積塑性回転角について検討を行った研究はほとんどない。

本論文では，コンクリート充填鋼管柱の保有変形性能を明らかにすることを目的とし，既往の実験資料を用いて，累積塑性回転角と軸縮み量，局部座屈発生などの損傷限界との関係について検討した。また，これらの関係に及ぼす軸力比，幅厚比・径厚比の影響，充填コンクリートの効果について検討を行った。

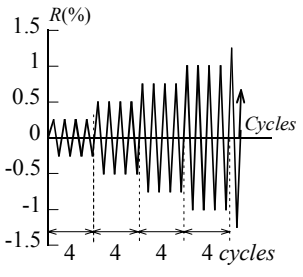
2. 検討に用いた実験の概要

2.1 対象とした実験（文献 [6)，7)]）

文献 [6)] は角形断面，文献 [7)] は円形断面の実験について記している。荷重条件は**図－１**に示すように，一定軸力 N と繰返し水平力 Q を受ける，



図－１ 荷重条件



図－２ 載荷プログラム

*1 北九州市立大学大学院　国際環境工学研究科環境工学専攻　(正会員)
*2 北九州市立大学　国際環境工学部教授　工博　(正会員)

表－１ 実験変数の範囲

		角形	円形
幅厚比 径厚比	B/t D/t	22, 31, 43	33, 39, 77
軸力比	n	0.2，0.3，0.4，0.5，0.6，0.7，0.8	
コンクリート充填		有， 無（D/t=31のみ）	有， 無（D/t=33のみ）

表－２ 鋼管の実測寸法

	幅厚比 径厚比	断面せい D (cm)	板厚 t (mm)	D/t	断面積 ${}_sA$ (cm^2)
円形	22		4.40	22.7	16.3
	31	10.0	3.21	31.1	12.2
	43		2.24	44.6	8.6
角形	33	100.0	3.01	33.3	920
	39	99.0	2.55	38.8	770
	77	96.0	1.25	76.7	370

材長 L で一端固定，他端自由の片持柱である。

載荷プログラムは**図－２**に示すように，柱の部材角 R (=δ/L，δ: 柱頭の水平変位)を 0.25%刻みで増加させ，同一変位振幅で 4 回の繰返し載荷を行っている。

実験変数は，1) 鋼管の幅厚比・径厚比 B/t, D/t （B，D : 断面の幅・径， t : 板厚），2) 軸力比 n (=N/N_0, N: 載荷軸力, N_0 : 圧縮耐力），3) コンクリート充填の有無，である。実験変数の範囲を**表－１**に示す。

実験で用いられた鋼管は，STKR400 の角形鋼管，STK400 の円形鋼管である。コンクリートの設計強度は 29.4MPa である。鋼管の実測寸法を**表－２**に，引張試験の結果およびコンクリート強度を**表－３**に示す。

2.2 損傷限界部材角

文献 [6), 7)]では，損傷限界部材角として，以下の 4 つの限界部材角を定義している。本論文では，これらの損傷限界部材角を用いて各試験体における累積塑性回転角の評価を行う。

a) 軸縮み限界部材角 : 軸ひずみ度が 0.2%を超える部材角。
b) 局部座屈発生限界部材角 : 視察により局部座屈発生が確認された部材角，つまり実際に試験体の鋼管表面に触れてみて変化が確認された最初の部材角。
c) 耐力保証限界部材角 : せん断力 Q－部材角 R 関係の正側の除荷点を結んで得られた包絡線上で，耐力が最大耐力の 95%に低下したときの部材角。
d) 全塑性限界部材角 : 柱脚のモーメントが全塑性モーメントまで低下したときの部材角。

表－３ 引張試験結果およびコンクリート強度

	幅厚比 径厚比	降伏応力度 σ_y (N/mm^2)	引張強さ σ_u (N/mm^2)	コンクリート強度 ${}_c\sigma_B$ (N/mm^2)
角形	22	407	463	34.1
	31	449	505	36
	43	415	465	36.2
円形	33	406	488	33.4 (n=0.2, 0.7, 0.8) 31.9 (n=0.3~0.6)
	39	391	477	30.9 (n=0.2, 0.3, 0.7, 0.8) 33.5 (n=0.4~0.6)
	77	410	490	32.4

各損傷限界部材角の相互の関係は，角形の場合，局部座屈発生限界部材角と耐力保証限界部材角はよく対応しており，軸縮み限界部材角はそれらより小さい。円形の場合，軸縮み限界部材角，局部座屈発生限界部材角は耐力保証限界部材角より小さく，全塑性限界部材角は耐力保証限界部材角より大きいことが示されている[6),7)]。

2.3 試験体の終局状態

角形の場合，試験体の終局状態は，部材角の繰返しと共に材軸の縮みが累積し，それに伴って履歴曲線が徐々に劣化していく場合がほとんどで鋼管の亀裂が発生したものは 1 体のみであった。円形の場合は，角形で見られたように履歴曲線が徐々に劣化していく場合と，溶接熱影響部あるいは局部座屈の山に亀裂が生じる場合とがあった。亀裂発生は軸力比が小さい範囲において発生していた。

3. コンクリート充填鋼管柱の保有変形性能

3.1 累積塑性回転角

CFT 柱の保有変形性能を示す指標として，累積塑性回転角$\Sigma\theta_{pl}$ を用いる。累積塑性回転角は，**図－３**に示す曲げモーメント M－部材角 R 関係の模式図において，θ_{pi}^{+}と｜θ_{pi}^{-}｜の総和で表される。各ステップの変化量をΔとすると，累積塑性回転角は式(1)で定義される。

$$\Sigma\theta_{pl} = \Sigma \mid \Delta\theta_{pl} \mid \quad (1)$$

θ_{pl} は，塑性回転角（部材角の塑性成分）であり，$\theta_{pl}=R-M/k'$ で定義される。ここで，R：部材角，M：柱脚モーメント，k'：せん断変形を無視した弾性剛性，である。

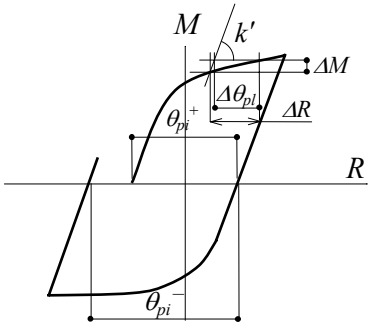
本論文では，実験で得られた柱脚モーメント M－部材角 R 関係（**図－４**(a)）より M－塑性回転角 θ_{pl} 関係（**図－４**(b)）を求め，θ_{pl} の変化量を総和することで$\Sigma\theta_{pl}$を得た。

図－５に累積塑性回転角$\Sigma\theta_{pl}$－部材角 R 関係の例を示す。右縦軸には累積塑性変形倍率η（$=\Sigma\theta_{pl}/\theta_{pc}$）も示した。ここで，$\theta_{pc}$は$M_{pc}$（柱の全塑性モーメント）に対応する弾性限回転角である。

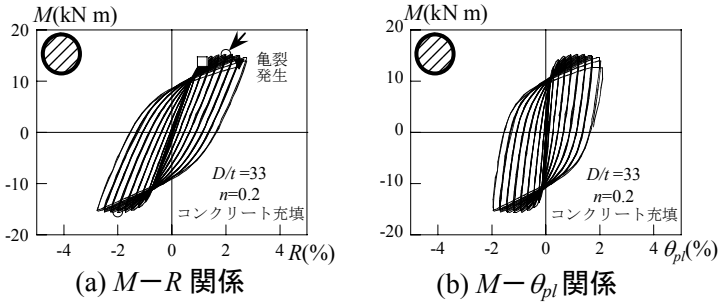
図中に，2.2 節で示した損傷限界部材角に達した点を矢印で示しているが，このときの累積塑性回転角$\Sigma\theta_{pl}$を各試験体について求め，さらに，実験終了時の$\Sigma\theta_{pl}$も求めた。

3.2 軸力比および径厚比・幅厚比の影響（充填試験体）

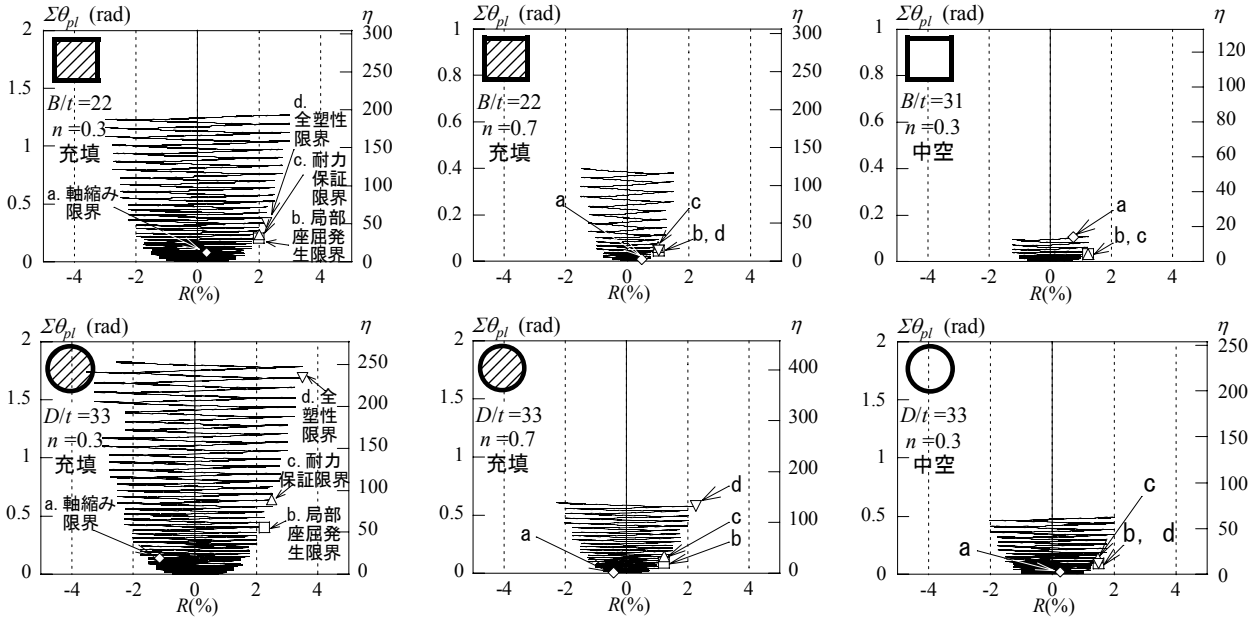
図－６に，軸力比 n－累積塑性回転角$\Sigma\theta_{pl}$ 関係を示す。(a)～(e) にそれぞれ，軸縮み限界，局部座屈発生限界，耐力保証限界，全塑性限界，に達したとき，実験終了時のときの値，を示した。図中，充填試験体は実線で，中空試験体は点線で示している。また，幅厚比，径厚比が B/t =22，D/t =33 の場合を太線で，31，39 を中線で，43，77 を細線で示している。また，**表－４**に求めた$\Sigma\theta_{pl}$を，(A) 角形，(B) 円形の場合について，(a) 軸縮み限界，(b) 局部座屈限界，(c) 実験終了時の場合を示した。表中，*印をつけたものは亀裂が発生し実験が終了した試験体である。また，軸力比が等しい場合における累積塑性回転角の



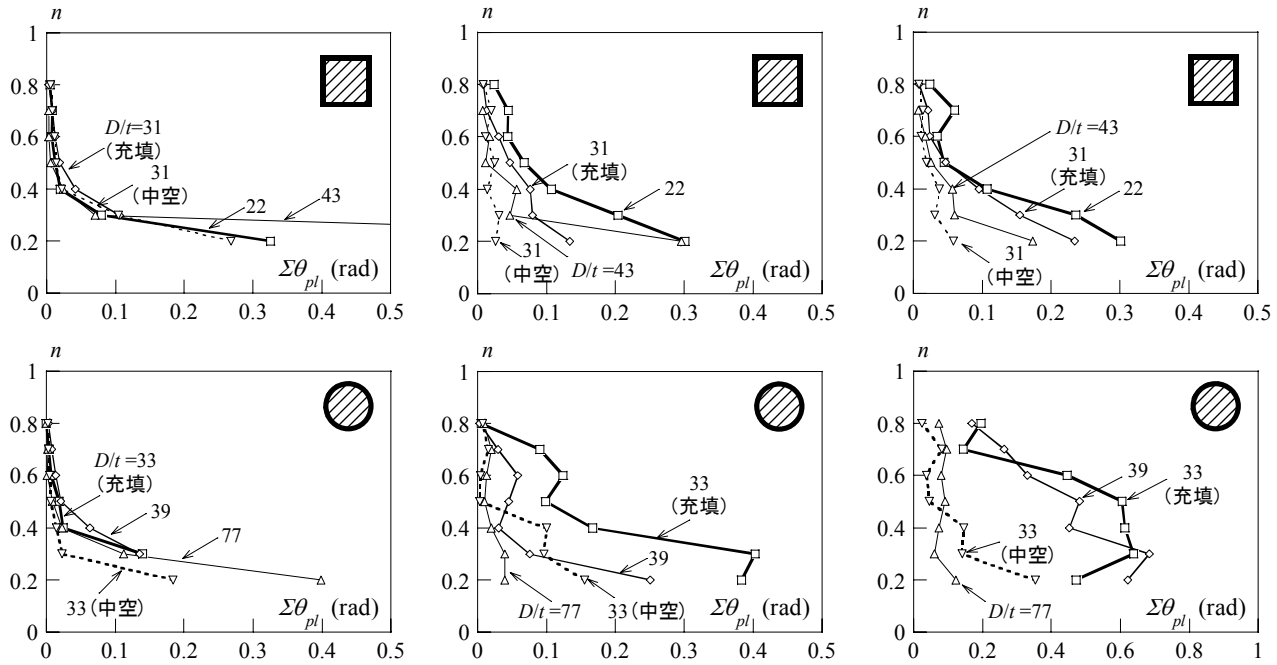
図－３累積塑性回転角の定義



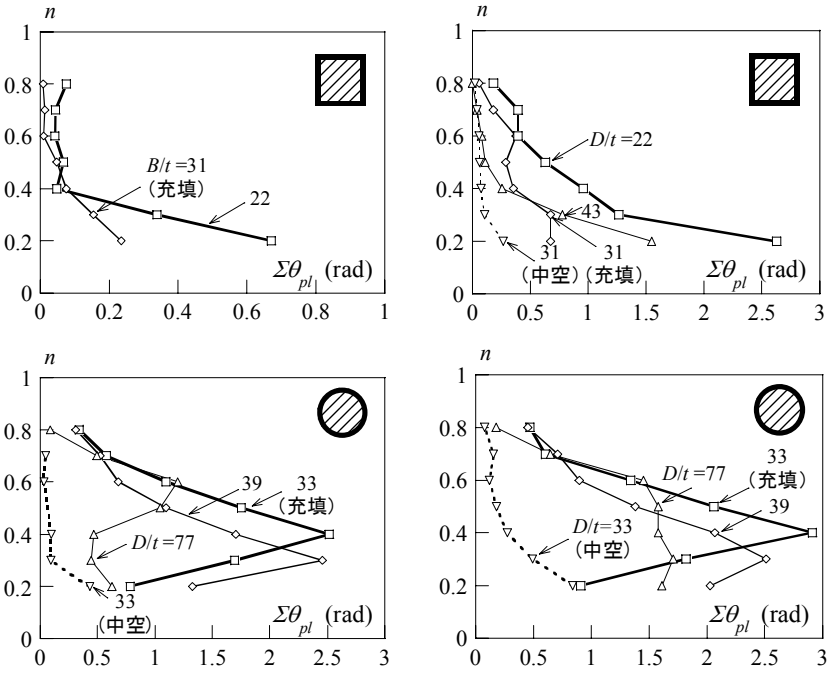
図－４ 実験結果の例と塑性回転角



図－５ 累積塑性回転角－部材角関係



(a) 軸縮み限界　(b) 局部座屈発生限界　(c) 耐力保証限界



(d) 全塑性限界　(e) 実験終了時

図－６ 軸力比－累積塑性変形角関係

最大値を太字で表し，最小値を網掛けとした。

角形で D/t =43，n =0.8 の試験体は，軸力載荷時に局部座屈が発生し所定の軸力を導入できず，実験が行われていないため，値を記していない。

(a) 軸縮み限界

角形の場合，B/t =31，n =0.2 のとき，円形の場合，D/t =33，39，n =0.2 のときは，実験終了時までに軸縮み限界に達していないため，値を記していない。

角形の場合，n =0.2，0.3 のときの$\Sigma\theta_{pl}$とn =0.4～0.8 の範囲の$\Sigma\theta_{pl}$を比較すると差が大きくなっている。円形の場合もほぼ同様の傾向が観察される。角形，円形いずれの場合も，幅厚比・径厚比が同じとき，n =0.3 の場合の値は，0.4 の場合の 2 倍以上の値となっている。

また，幅厚比・径厚比の影響は顕著ではない。

(b) 局部座屈発生限界

角形，円形いずれの場合も，軸力比が小さいほど，幅厚比・径厚比が小さいほど$\Sigma\theta_{pl}$は大きくなっている。

(c) 耐力保証限界

角形の場合は，局部座屈発生限界のときと同様の傾向がみられ，値についてもほぼ同じとな

表－４ 充填試験体の累積塑性回転角 $\Sigma\theta_{pl}$ (rad)

(A) 角形

(a) 軸縮み限界

n	B/t =22（充填）	B/t =31（充填）	B/t = 43（充填）	B/t =31（中空）
0.2	0.326	—*	**1.26**	0.268
0.3	0.0800	**0.106**	0.0712	0.105
0.4	0.0199	**0.0423**	0.0239	0.0220
0.5	0.0120	**0.0189**	0.00585	0.0141
0.6	0.00768	**0.0127**	0.00359	0.0114
0.7	**0.00812**	0.00785	0.00359	0.00834
0.8	**0.00496**	0.00348	—	0.00568

(b) 局部座屈発生限界

n	B/t =22（充填）	B/t =31（充填）	B/t = 43（充填）	B/t =31（中空）
0.2	**0.301**	0.134*	0.296	0.0264
0.3	**0.204**	0.0798	0.0472	0.0317
0.4	**0.107**	0.0765	0.0569	0.0143
0.5	**0.0678**	0.0472	0.0114	0.0246
0.6	**0.0432**	0.0308	0.0174	0.0114
0.7	**0.0444**	0.0136	0.00769	0.0197
0.8	**0.0237**	0.00803	—	0.00809

(c) 実験終了時

n	B/t =22（充填）	B/t =31（充填）	B/t = 43（充填）	B/t =31（中空）
0.2	**2.63**	0.674*	1.55	0.268
0.3	**1.27**	0.674	0.778	0.105
0.4	**0.957**	0.355	0.259	0.0771
0.5	**0.628**	0.289	0.111	0.0647
0.6	**0.393**	0.376	0.0824	0.0593
0.7	**0.396**	0.182	0.0415	0.0393
0.8	**0.184**	0.0583	–	0.0206

(B) 円形

(a) 軸縮み限界

n	D/t =33（充填）	D/t =39（充填）	D/t =77（充填）	D/t =33（中空）
0.2	—*	—*	**0.399***	0.184
0.3	**0.140***	0.136*	0.113*	0.0230
0.4	0.0251	**0.0631**	0.0230*	0.0152
0.5	0.0191	**0.0214**	0.00935*	0.00689
0.6	0.00736	**0.0137**	0.00172*	0.00513
0.7	0.00453	**0.00848**	0.00287	0.00344
0.8	0.0000907	**0.00357**	0.0000815	0.00294

(b) 局部座屈発生限界

n	D/t =33（充填）	D/t =39（充填）	D/t =77（充填）	D/t =33（中空）
0.2	**0.383***	0.251*	0.0394*	0.156
0.3	**0.403***	0.0754*	0.0393*	0.0966
0.4	**0.167**	0.0307	0.0198*	0.101
0.5	**0.0985**	0.0452	0.00989*	0.00367
0.6	**0.124**	0.0588	0.013*	0.00391
0.7	**0.0906**	0.0295	0.0194	0.0155
0.8	0.00521	0.00321	**0.00903**	0.00734

(c) 実験終了時

n	D/t =33（充填）	D/t =39（充填）	D/t =77（充填）	D/t =33（中空）
0.2	0.909*	**2.03***	1.61*	0.840
0.3	1.82*	**2.51***	1.71*	0.491
0.4	**2.91**	2.07	1.58*	0.274
0.5	**2.06**	1.38	1.58*	0.182
0.6	1.34	0.895	**1.45***	0.120
0.7	0.602	**0.712**	0.648	0.155
0.8	**0.471**	0.454	0.180	0.0812

＊：溶接熱影響部あるいは局部座屈の山に亀裂が生じて実験が終了した試験体。
太字：最大値，網掛け：最小値（いずれも同一軸力比での比較）

っている。

円形の場合，D/t =33，39 については，n =0.3 のときが最も$\Sigma\theta_{pl}$ の値が大きくなっており，n =0.3 より軸力比が大きくなると$\Sigma\theta_{pl}$ の値が小さくなっている。D/t =77 の場合は，軸力比の影響はあまり見られない。D/t =33，39 の場合は D/t =77 の場合と比較すると$\Sigma\theta_{pl}$の値がかなり大きくなっており，n =0.3 の場合，D/t =33，39 のときの値は, D/t =77 のときの 10 倍以上の値を示している。

(d)全塑性限界

角形の場合，B/t =43，31（中空）の試験体では，実験値が計算による全塑性モーメントに達していないため，B/t =22，31（充填）の場合のみでしか検討できないが，局部座屈発生限界のときとほぼ同様の傾向を示していることが観察される。

円形の場合，径厚比によって，軸力比の影響が異なっている。

D/t =33 の場合は n =0.4 のときが最も$\Sigma\theta_{pl}$が大きく，2.5(rad)となっており，n が 0.4 より大きい場合は，軸力比が大きくなるにつれ，0.4 より小さい場合は, 軸力比が小さくなるにつれ$\Sigma\theta_{pl}$は小さくなる。

n =0.2 の試験体は，部材角 2.75%載荷時に，n =0.3 の試験体は部材角 3.5%載荷時に溶接熱影響部に亀裂が生じ，実験が終了している。一方，n =0.4 の試験体では，部材角 4%まで安定した挙動を示している。したがって，全塑性限界部材角はそれぞれ, R_u =2.75%, 3.5%, 4%となっており，

n =0.4のときの$\Sigma\theta_{pl}$が最も大きな値となっていると考えられる。

D/t =39 の場合は n =0.3 のときが最も$\Sigma\theta_{pl}$が大きく 2.5(rad)となっており, n =0.4 以上のときは, 軸力比が大きくなるにつれ小さくなる。これも D/t =33 の場合と同様に，亀裂が生じたときの部材角と関係があると考えられる。n =0.2 の試験体は，部材角 3.5%載荷時に，n =0.3 の試験体は部材角 4%載荷時に亀裂が生じ, 実験が終了している。

D/t =77 の場合は, n =0.6 のときが最も大きく，n =0.6 より大きい範囲では軸力比が大きくなるにつれ値が小さくなる。また，n =0.5，0.4 と軸力が小さくなるにつれ値が小さくなっていくが，n =0.2～0.4 の範囲では軸力比の影響をあまり受けていない。

この場合は，n = 0.2～0.6 の試験体で局部座屈の山の上で亀裂が生じている。n =0.5，0.6 の場合よりも n =0.2～0.4 のほうが$\Sigma\theta_{pl}$が小さくなっているが，局部座屈，亀裂との関係については今後の検討課題としたい。

(e) 実験終了時

角形の場合，他の損傷限界部材角のときと同様に，軸力比が小さくなるほど，幅厚比が小さくなるほど累積塑性回転角が大きくなる傾向にある。また，B/t=22 で n =0.2 のとき，$\Sigma\theta_{pl}$ の値は 2.6(rad)となっており全塑性限界のときと比較すると，4 倍程度となっている。

円形の場合は，(d)項で述べたように，径厚比によって軸力比の影響が異なっており，亀裂が発生した試験体については，亀裂発生時の部材角によって$\Sigma\theta_{pl}$の値が決まっている。

3.3 充填コンクリートの効果

中空試験体は充填試験体と比較すると，角形，円形いずれの場合も，$\Sigma\theta_{pl}$が小さい。しかし，**図－6**や，**表－4**の網掛け部分をみると，すべての場合において中空試験体のほうが値が小さいわけではなく，局部座屈発生限界では，B/t =43, D/t =77 の試験体と比較すると，中空試験体のほうが$\Sigma\theta_{pl}$の値が大きい場合もある。

4. まとめ

コンクリート充填鋼管柱および中空鋼管柱の既往の実験資料を用いて，損傷限界部材角に達したときおよび実験終了時の累積塑性回転角の値を求めた。

1) 軸縮み限界に達したとき，角形，円形いずれの場合も，幅厚比・径厚比が同じとき，n =0.3 の場合の累積塑性回転角$\Sigma\theta_{pl}$の値は，0.4 の場合の 2 倍以上の値となっている。
2) 局部座屈発生限界に達したとき，角形，円形いずれの場合も，軸力比が小さいほど，幅厚比・径厚比が小さいほど$\Sigma\theta_{pl}$ の値は大きくなっている。
3) 耐力保証限界に達したとき，円形では，n =0.3 の場合，D/t =33，39 のときの$\Sigma\theta_{pl}$の値は，D/t =77 のときの 10 倍以上の値を示している。
4) 全塑性限界に達したとき，円形では，軸力比が小さい範囲で亀裂が発生している試験体があることにより，径厚比によって，軸力比の影響が異なっている。

謝辞

本研究は，平成 17 年度科学研究費補助金（基盤研究(c)，研究代表者：津田惠吾）の援助を受けた。ここに，関係各位に感謝します。

参考文献

1) 建設省大臣官房技術調査室監修，建築研究振興協会：建築構造における性能指向型設計法のコンセプトー仕様から性能へー，技報堂出版，2000.8.
2) 建築研究振興協会：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン，技報堂出版，2000.8.
3) 日本建築構造技術者協会編：建築の構造設計，オーム社，2002.7.
4) 桑村仁，田中直樹，杉本浩一，向野聡彦：鋼構造躯体の性能表示 ー鋼構造建築物の性能設計に関する研究 その 1ー，日本建築学会構造系論文集，第 562 号，pp.175-182，2002.12.
5) 岩田善裕，杉本浩一，桑村仁：鋼構造建築物の修復限界 ー鋼構造建築物の性能設計に関する研究 その 2ー，日本建築学会構造系論文集，第 588 号，pp.165-172，2005.2.
6) 松井千秋，津田惠吾，山地雄二郎，藤永隆：コンクリート充填角形鋼管柱の構造性能と軸力制限値，日本建築学会構造系論文集，第 504 号，pp.103-110，1998.2.
7) 松井千秋，津田惠吾，河野昭彦，山地雄二郎，藤永隆：コンクリート充填円形鋼管柱の構造性能と軸力制限値，日本建築学会構造系論文集，第 512 号，pp.181-188，1998.10.