

## 鋼管杭 杭頭部 圧縮・曲げ試験

### [概要]

鋼管杭の杭頭部構造は、鋼管内面に「ずれ止め」と称するリング状のプレートを2段取り付け、そこに中詰めコンクリートを鋼管径分打設するのが一般的である。既往の試験・研究では、鋼管内に中詰めコンクリートを打設すれば、鋼管の局部座屈による曲げ耐力の低下を軽減できることが確認されている。しかしながら、これらの試験・研究では鋼管内面に「ずれ止め」が取り付けられておらず、また、高軸方向力下での終局曲げ耐力や変形性能は確認されていない。

本レポートは、「ずれ止め」の取り付けによる鋼管と中詰めコンクリートとの一体化、また、それに伴う終局曲げ耐力や変形性能の向上、終局状態に至るまでの部材性能を確認するために実施した杭頭部 圧縮・曲げ試験の結果を報告するものである。

2017年3月



一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会

Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles

※本資料は、協会で実施した研究活動等から広く公開することが望ましいと思われるものを選び、テクニカル・レポートとして刊行するものです。記載された内容は、実験解析等の結果を示したものであり、具体的な製品の特性や性能を保証するものではありません。

本文書の複製、本文書からの引用・転載にあたっては本会からの許諾を得てください。

## 鋼管杭 杭頭部 圧縮・曲げ試験

1. はじめに .....	1
2. 杭頭部 圧縮・曲げ試験 .....	2
2.1 試験概要 .....	2
2.2 試験結果 .....	10
2.3 試験結果のまとめ .....	12
2.4 試験体の解体調査 .....	12
3. 終局曲げ耐力と変形角の算定式に対する検討 .....	14
3.1 終局曲げ耐力 .....	14
3.2 変形角 .....	15
参考資料（試験体製作図） .....	19

## 1. はじめに

鋼管杭・鋼矢板技術協会では、2013年4月より『建築基礎構造設計指針（日本建築学会）』の改定作業に参画し、鋼管杭に対する技術評価の適正化と建築分野における鋼管杭の認知度向上などの活動を展開している。

『建築基礎構造設計指針（日本建築学会）』は2019年に改定版の出版が予定されているが、今回の改訂においては、レベル2荷重（設定した再現期間での最大荷重＝大地震時の荷重）に対して基礎構造に3つの性能グレードが規定されることが大きな特徴となっている。

これに伴って、設計者は建物の重要度を考慮して設定された各性能グレードにおいて、要求性能をもとにした設計用限界値に対して、設計用応答値がこれを下回ることを確認することとなる。特に大地震時の設計では、終局状態における設計用の限界値と応答値を比較することになるため、終局状態に至るまでの杭体の部材性能（主に耐力と変形性能）が、あらかじめ明らかになっている必要がある。

これらの経緯から、鋼管杭・鋼矢板技術協会では既往の試験データ（SKK, STK, その他）を収集・整理し、鋼管杭の終局曲げ耐力と変形性能の再評価を行ったが、

- ①過去に多くの試験が行われているものの、鋼管杭の杭頭部標準構造である『鋼管内面にずれ止めを2段取り付け、コンクリートを鋼管径分打設した』構造（以下、『ずれ止め+1Dコンクリート中詰め』構造と称す）による試験がないこと
- ②既往の試験データの収集・整理から、『ずれ止め+1Dコンクリート中詰め』構造がCFT構造（コンクリート充填鋼管構造）と同等の部材性能を有することが予測できたこと
- ③『建築基礎構造設計指針（日本建築学会）』の改定では、試験実績をもとに適用範囲を設定する傾向にあること（設計で想定される高軸方向力下での試験がないこと）

などの理由から、鋼管杭（杭頭部）の保有性能を適正化するためにも試験は必要と判断し、高軸方向力下の場合を含む圧縮・曲げ試験を実施するに至った。

参考のため、鋼管杭・鋼矢板技術協会にて過去に実施した単杭による杭体の曲げ試験を以下に示す。

- ①建築基礎研究委員会報告書，鋼管杭協会，平成7年9月

関連論文：吉沢 幸仁他，鋼管杭の保有水平耐力に関する研究（その2 鋼管杭の変形モードを模擬した載荷試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1049～1050，1995.8

- ②スパイラル鋼管曲げ圧縮試験 実験報告書，新日本製鐵（株），平成8年7月

関連論文：中山 裕章他，鋼管杭の水平耐力に関する曲げ圧縮試験，土木学会 年次学術講演会講演概要集第3部(B)，第51巻，pp.46～47，1996年8月

## 2. 杭頭部 圧縮・曲げ試験

### 2.1 試験概要

鋼管杭の一般的な杭頭部構造である『ずれ止め+1D コンクリート中詰め』構造を模擬した鋼管杭をテストベッド上に天地を逆にして設置し、鉛直荷重を付加しながら水平荷重を作用させ、杭体の挙動および終局曲げ耐力と変形性能を確認した。試験装置の概要を図 2.1 に示す。

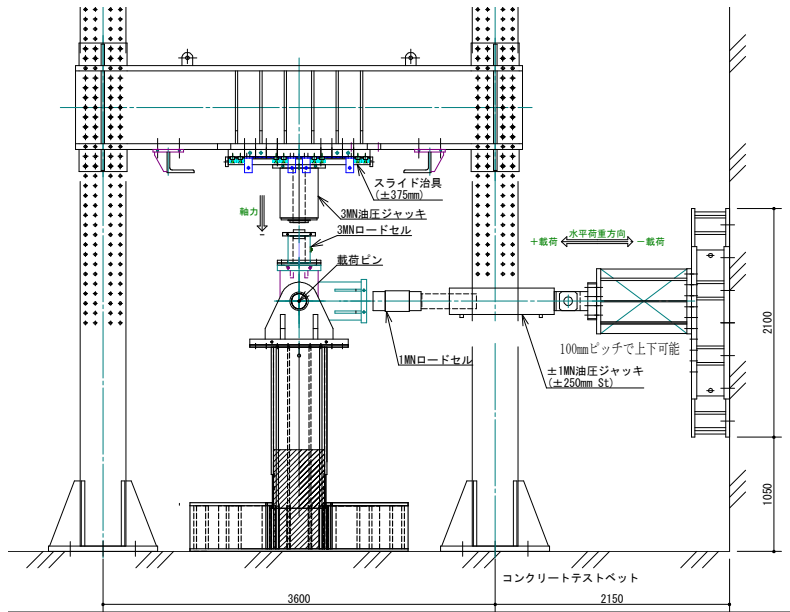


図 2.1 荷装置



写真 2.1 No.1 試験体

#### (1) 試験体

試験体は 3 体とし、試験部位には板巻鋼管 ( $\phi 488 \times t9$  : SS400)、加力部位には一般構造用炭素鋼鋼管 ( $\phi 508 \times t19$  : STK490) を使用した。試験部位の鋼管内面には、ずれ止めを 2 段取り付け、ベースプレート上端より 488mm (鋼管径分) の位置まで中詰めコンクリート (Fc24) を打設した。試験体の概要を図 2.2 に示す。

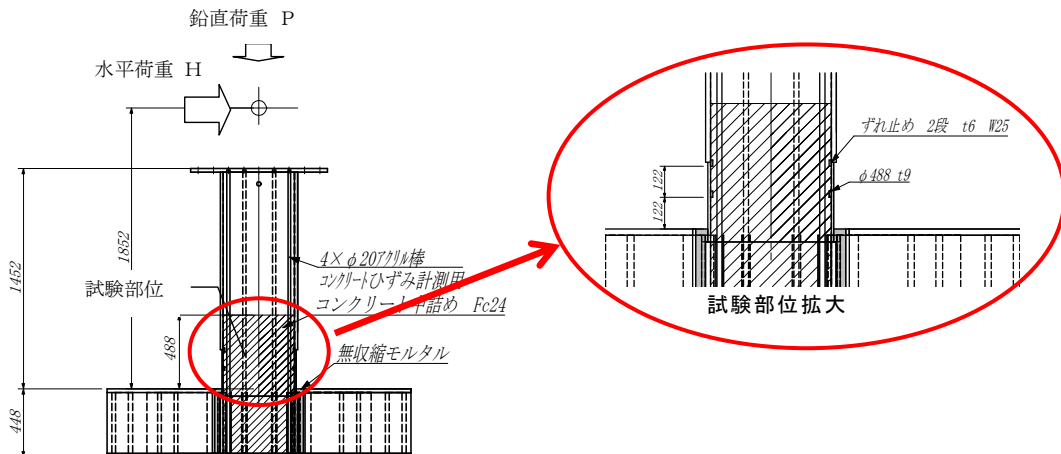


図 2.2 試験体の概要

(2) 材料試験

圧縮・曲げ試験に先立ち、杭材および中詰めコンクリートの材料試験を実施した。鋼管については、試験部位の余剰部分から切り出した試験片（管軸方向：12C号試験片3体，管軸直角方向：5号試験片3体）を用い、降伏点・引張強さ・伸び等を測定した。また、中詰めコンクリートについては、一軸圧縮強度（材齢：7日，14日，28日，試験実施日各3体）・弾性係数（材齢：28日3体）・ポアソン比（材齢：28日3体）等を測定した。表2.1および図2.3～2.8に試験部位鋼管の材料試験結果を、表2.2および図2.3に中詰めコンクリートの材料試験結果を示す。

表 2.1 試験部位鋼管の材料試験結果

試験片名	試験片採取方向	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )		引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
		上	下			
J5-1	管軸直角方向	—	284.8	453.7	38.7	1.997×10 <sup>5</sup>
J5-2		—	293.0	453.5	39.8	2.000×10 <sup>5</sup>
J5-3		—	294.6	454.0	37.6	2.009×10 <sup>5</sup>
平均	—	—	290.8	453.7	38.7	2.002×10 <sup>5</sup>
12C-1	管軸方向	327.0	309.5	454.6	42.1	2.068×10 <sup>5</sup>
12C-2		331.2	309.3	455.4	42.6	2.100×10 <sup>5</sup>
12C-3		324.0	309.4	456.0	43.5	2.087×10 <sup>5</sup>
平均	—	327.4	309.4	455.3	42.7	2.085×10 <sup>5</sup>

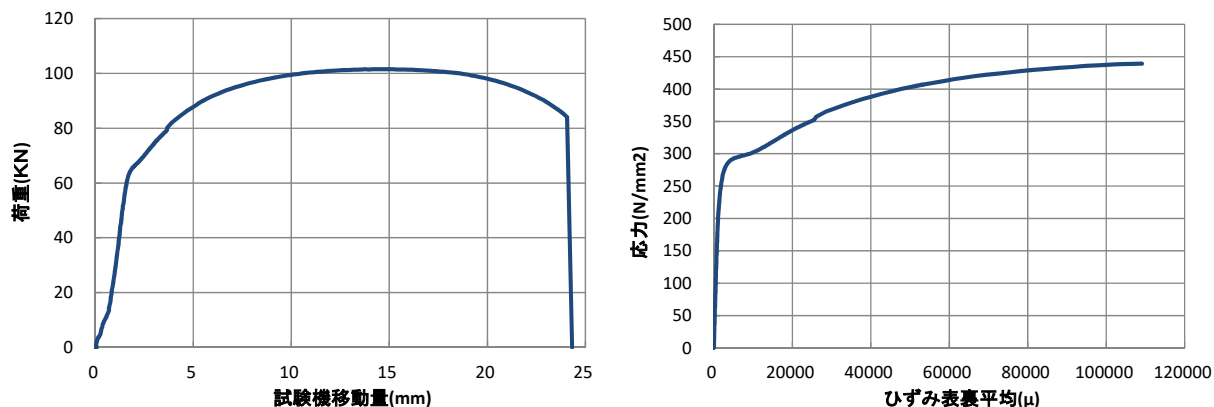


図 2.3 試験部位鋼管の材料試験結果 (J5-1)

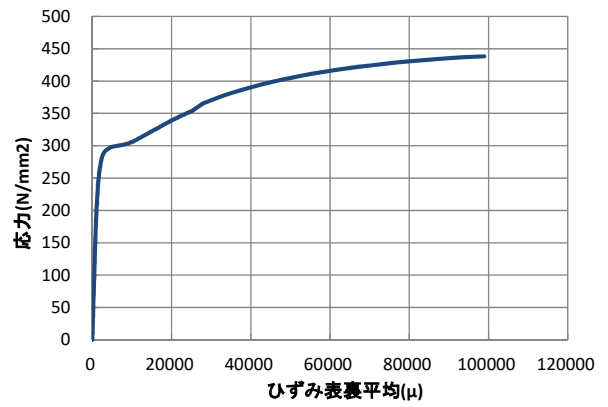
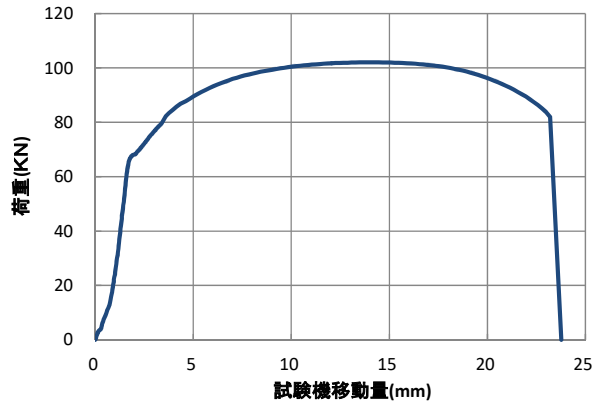


図 2.4 試験部位鋼管の材料試験結果 (J5-2)

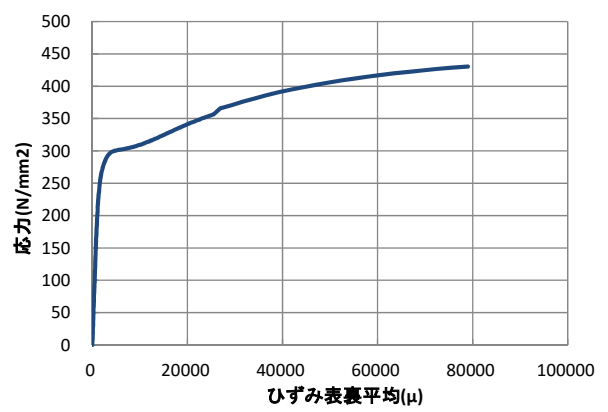
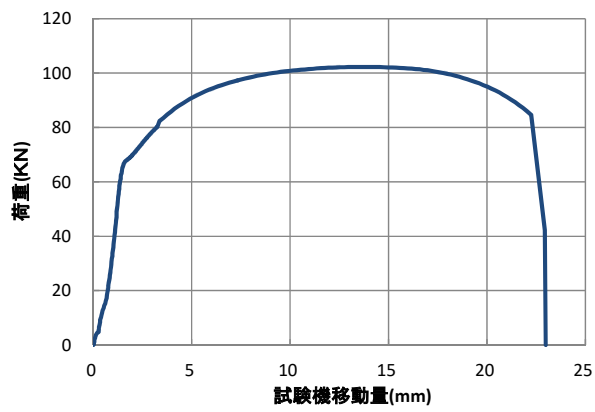


図 2.5 試験部位鋼管の材料試験結果 (J5-3)

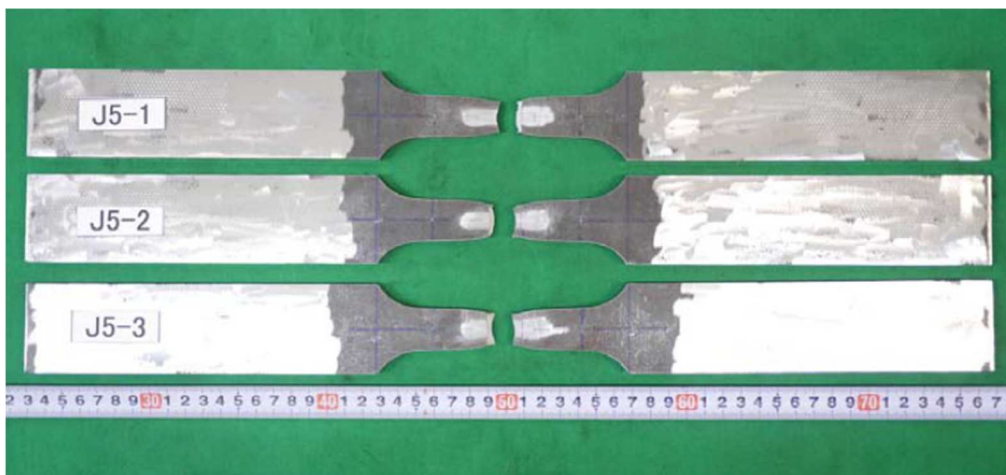


写真 2.2 5 号試験片(J5-1,2,3) 試験後

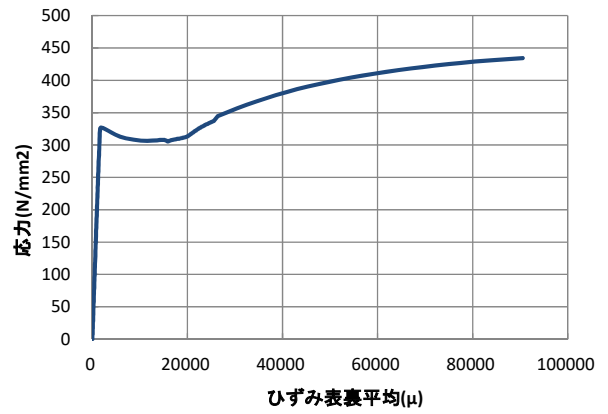
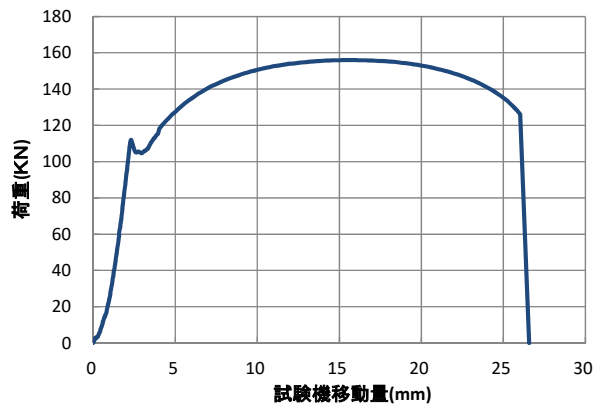


図 2.6 試験部位鋼管の材料試験結果 (12C-1)

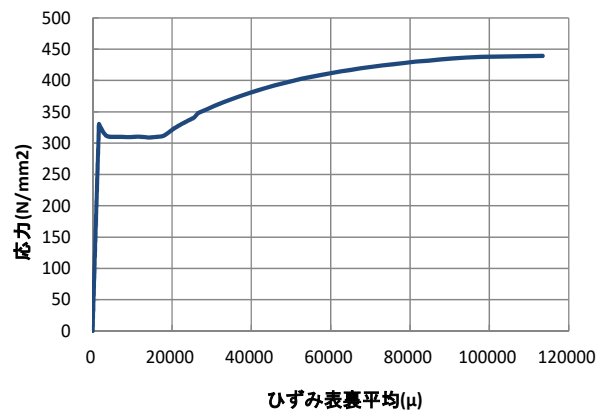
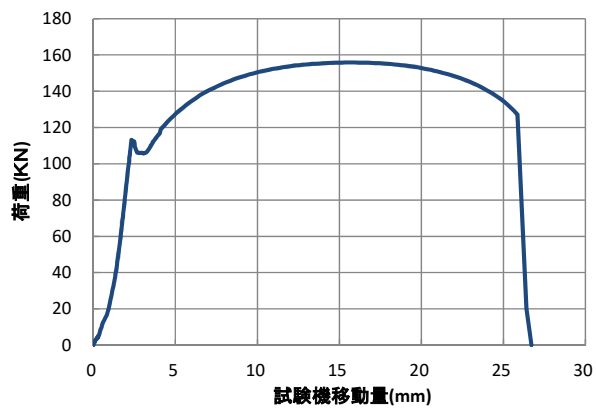


図 2.7 試験部位鋼管の材料試験結果 (12C-2)

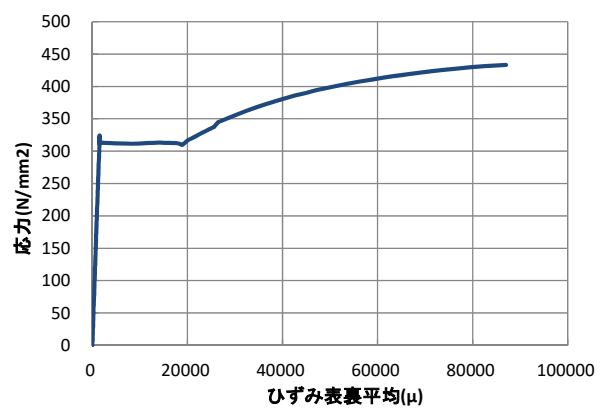
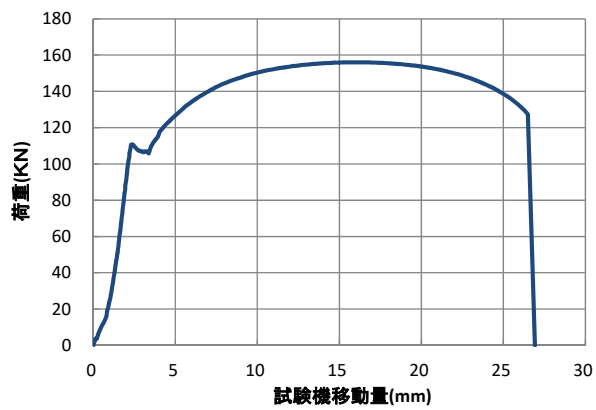


図 2.8 試験部位鋼管の材料試験結果 (12C-3)

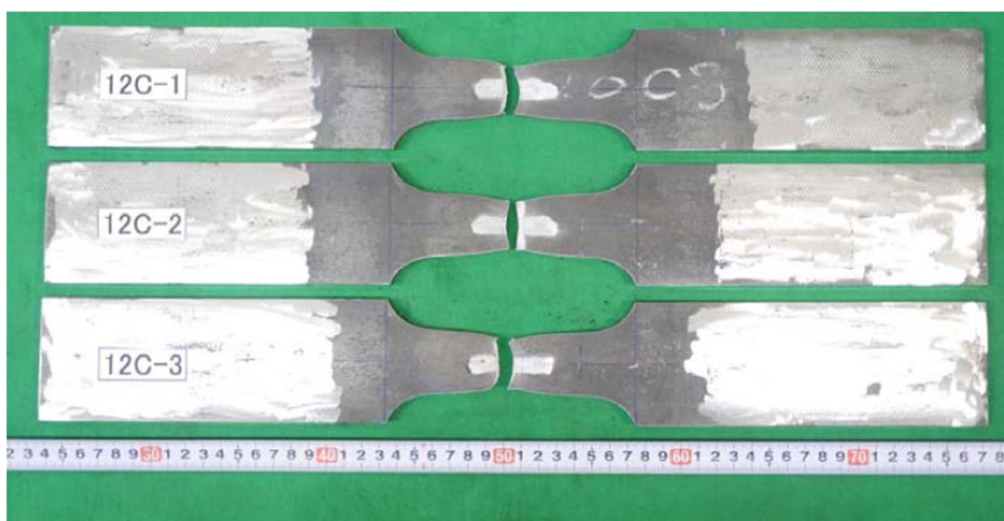


写真 2.3 12C 号試験片(12C-1,2,3) 試験後

表 2.2 中詰めコンクリートの材料試験結果

試験日	材齢 (日)	一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
		1	2	3	平均		
6/29	7	17.3	16.8	17.1	17.1	—	—
7/6	14	20.9	22.2	20.8	21.3	—	—
7/20	28	25.1	25.1	25.1	25.1	2.87×10 <sup>4</sup>	0.179
7/26	34	26.0	26.0	25.4	25.8	—	—
8/1	40	25.9	25.9	26.4	26.1	—	—

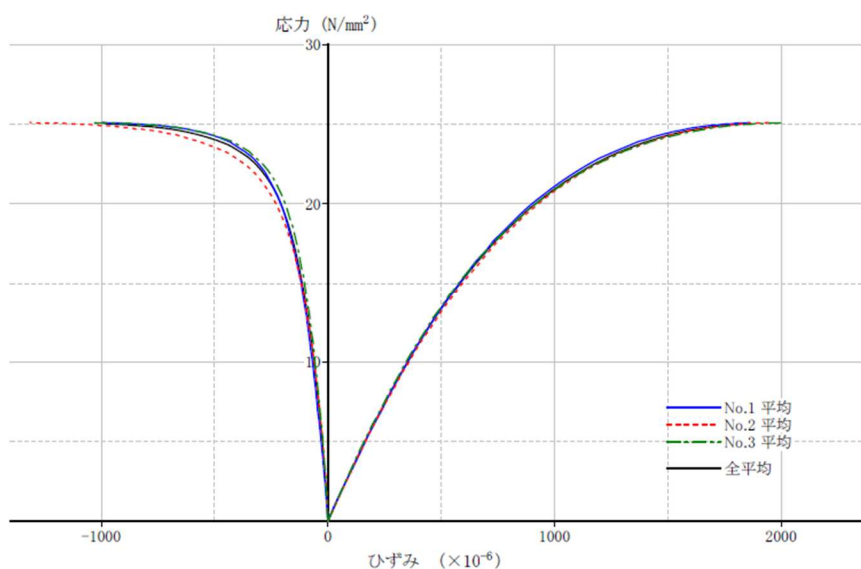


図 2.9 中詰めコンクリートの材料試験結果

【参考：加力部位鋼管（φ 508×t19）の機械的性質（ミルシート値）】

降伏点：318N/mm<sup>2</sup>，引張強さ：453N/mm<sup>2</sup>，伸び：48%



### (3) 載荷荷重

鉛直荷重  $P$  は、試験部位鋼管の降伏軸力  $N_y$  (鋼管の断面積×鋼管の降伏点) に対して  $0.0N_y$ ,  $0.3N_y$ ,  $0.6N_y$  となるよう設定した。また、水平荷重  $H$  は、以下の手順により設定した。

- ①材料試験結果から、鉛直荷重  $P$  が作用するときの試験部位鋼管の全塑性モーメント  $M_p$  に対応する水平荷重  $H_p$  を求める
- ②鉛直荷重  $P$  を作用させた状態で水平荷重  $H_p$  を載荷し、そのときの制御変位量を基準変位  $\delta_p$  とする
- ③各ステップの最大制御変位量を  $\pm\delta_p$ ,  $\pm 2\delta_p$ ,  $\pm 4\delta_p$ ,  $\pm 6\delta_p \dots$  とし、この変位に対応する水平荷重を各ステップにおける水平荷重  $H$  とする

表 2.3 に各試験体における載荷荷重と基準変位を示す。なお、制御変位量は、載荷点での水平変位 (D11,D12) の平均値と試験体基部での水平変位 (D01,D02) の平均値の差に試験体基部での回転変位 (D03,D04) を補正し、鋼管基部での水平変位 (D15,D16) の平均値を無収縮モルタル部の変形と考え、かつ、この変形はすべて鋼管下端部からの回転変形によるものとして傾斜角から制御変位を補正した。

表 2.3 各試験体における載荷荷重と基準変位  $\delta_p$

ケース名	試験体名	載荷高さ (mm)	鋼管					作用鉛直荷重 (kN)	軸力比	$M_p$ (kN・m)	$H_p$ (kN)	$\delta_p$ (計測値) (mm)
			径 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	塑性断面係数 (mm <sup>3</sup> )	降伏軸力 (kN)					
Case1	No.3	1852	488	9	13543	2065212	4190	0	0.0	639	345	11.35
Case2	No.1							1257	0.3	569	307	8.45
Case3	No.2							2514	0.6	376	203	4.63

### (4) 載荷方法

予備載荷として水平荷重  $H$  を  $0\text{kN} \rightarrow 100\text{kN} \rightarrow -100\text{kN} \rightarrow 0\text{kN}$  と変化させ、計測システムのチェックを行った後、鉛直荷重  $P$  を作用させた。この状態で試験部位鋼管の全塑性モーメント  $M_p$  に対応する水平荷重  $H_p$  を載荷し、基準変位  $\delta_p$  を計測した後、引き続いて本載荷に移行した。

本載荷は変位制御にて最大制御変位量を  $\pm\delta_p$ ,  $\pm 2\delta_p$ ,  $\pm 4\delta_p$ ,  $\pm 6\delta_p \dots$  とし、各ステップとも 2 回の繰り返し載荷を実施した (図 2.10 参照)。表 2.4 に各ステップでの載荷速度を示す。試験最大水平荷重を迎えた後に、ステップ最大水平荷重が試験最大水平荷重の 80% 以下となった時点で試験を終了した。

表 2.4 各ステップでの載荷速度

ケース名	試験体名	$M_p$ 載荷 (kN/s)	$\pm\delta_p$ (mm/s)	$\pm 2\delta_p$ (mm/s)	$\pm 4\delta_p$ (mm/s)	$\pm 6\delta_p$ (mm/s)	$\pm 8\delta_p$ (mm/s)	$\pm 12\delta_p$ (mm/s)
Case1	No.3	1.0	0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3
Case2	No.1	1.0						0.3
Case3	No.2	0.5						0.2

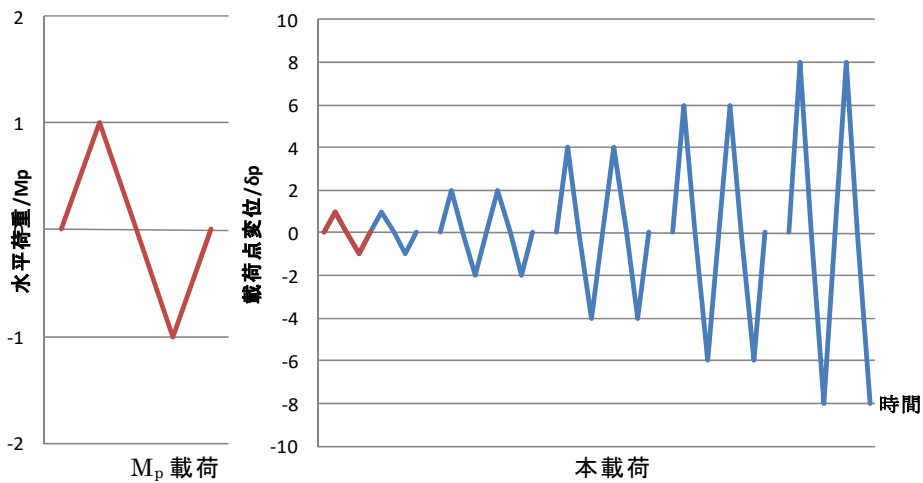


図 2.10 载荷方法

(5) 測定項目と測定点数

測定項目と測定点数を表 2.5 に、変位計測位置を図 2.11 に、ひずみゲージ位置を図 2.12 に示す。

鋼管外面には 2 軸のひずみゲージを 8 断面に貼付したが、ベースプレート上端側の 2 断面については周方向に 8 点、他の 4 断面については周方向に 4 点を測定点数とした。また、鋼管内にはアクリル棒を 4 本配置し、ベースプレート上端側から 3 断面の鋼管外側ひずみゲージに対応する位置に 1 軸ゲージを貼付した。

表 2.5 測定項目と測定点数

測定項目	機器	数量
鉛直荷重	ロードセル	1
水平荷重	ロードセル	1
载荷点水平変位	変位計 (D11,D12)	2
载荷点鉛直変位	変位計 (D13,D14)	2
鋼管の水平変位	変位計 (D05~D10)	6
鋼管基部の水平変位	変位計 (D15,D16)	2
基部の水平変位	変位計 (D01,D02)	2
基部の回転変位	変位計 (D03,D04)	2
鋼管ひずみ	2 軸ひずみゲージ	32/体
アクリル棒ひずみ	1 軸ひずみゲージ	12/体

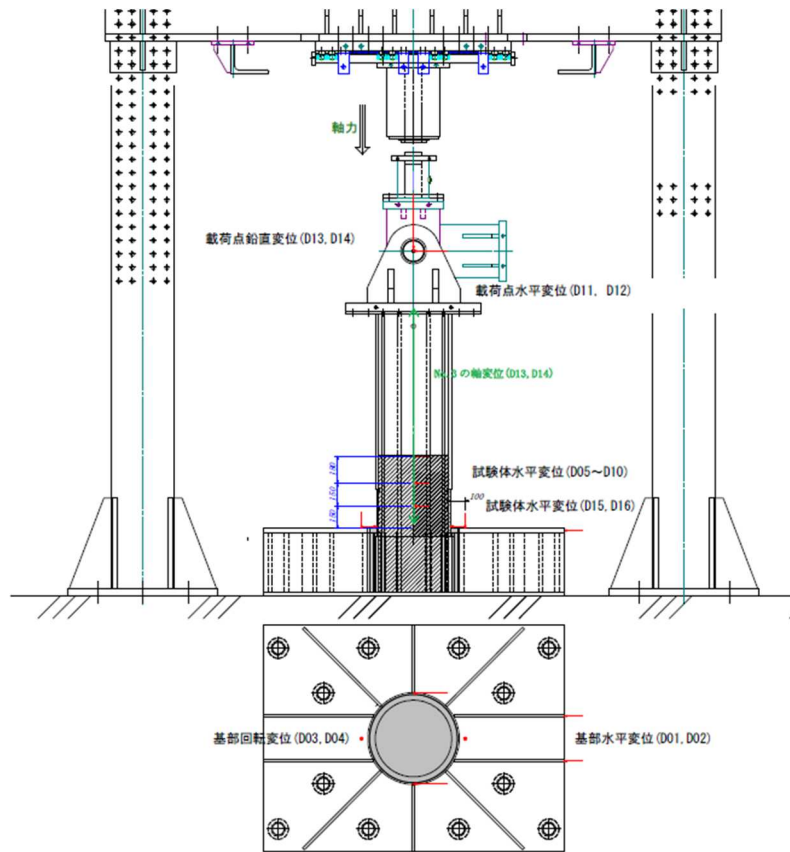


図 2.11 変位計測位置

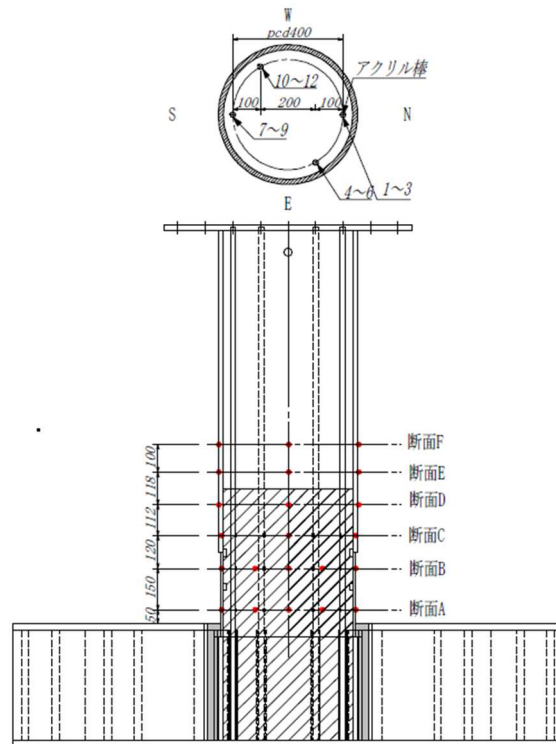


図 2.12 ひずみゲージ位置

## 2.2 試験結果

各ケースにおける加力ステップ・サイクル毎のピーク時荷重と変位を表 2.6 に示す。

表 2.6 各加力ステップ・サイクルにおけるピーク時の荷重と変位

加力 ステップ サイクル	Case1 (試験体 No.3)						Case2 (試験体 No.1)						Case3 (試験体 No.2)								
	水平 荷重 (kN)	曲げ モーメント (kNm)	水平 変位 (mm)	鉛直 荷重 (kN)	軸変位 (mm)	制御 変位 (mm)	変形角 (rad)	水平 荷重 (kN)	曲げ モーメント (kNm)	水平 変位 (mm)	鉛直 荷重 (kN)	軸変位 (mm)	制御 変位 (mm)	変形角 (rad)	水平 荷重 (kN)	曲げ モーメント (kNm)	水平 変位 (mm)	鉛直 荷重 (kN)	軸変位 (mm)	制御 変位 (mm)	変形角 (rad)
+1 $\delta_p$ -1	346	640	11.76	0	-0.22	9.77	0.0053	309	583	8.73	1260	2.09	7.26	0.0039	204	390	4.92	2512	4.08	4.24	0.0023
-1 $\delta_p$ -1	-347	-642	-11.21	0	-0.26	-9.07	-0.0049	-310	-582	-7.45	1258	2.21	-6.33	-0.0034	-204	-385	-3.00	2514	4.22	-2.87	-0.0015
+1 $\delta_p$ -2	354	655	12.12	0	-0.27	10.05	0.0054	315	594	8.96	1260	2.23	7.47	0.0040	230	437	5.01	2515	4.25	4.25	0.0023
-1 $\delta_p$ -2	-354	-656	-12.00	0	-0.29	-9.60	-0.0052	-334	-630	-8.83	1258	2.27	-7.51	-0.0041	-254	-482	-4.93	2512	4.30	-4.55	-0.0025
+2 $\delta_p$ -1	420	777	23.22	0	-0.73	19.65	0.0106	407	775	17.35	1249	2.34	14.73	0.0080	319	613	9.58	2502	4.50	8.17	0.0044
-2 $\delta_p$ -1	-416	-770	-19.13	0	-0.69	-15.11	-0.0082	-418	-794	-17.27	1252	2.55	-14.70	-0.0079	-342	-656	-9.56	2500	4.91	-8.50	-0.0046
+2 $\delta_p$ -2	420	777	23.24	0	-0.81	18.99	0.0103	407	775	17.37	1254	2.71	14.47	0.0078	341	654	9.65	2497	5.19	8.06	0.0044
-2 $\delta_p$ -2	-431	-798	-23.63	0	-0.87	-18.65	-0.0101	-413	-785	-17.30	1251	2.87	-14.50	-0.0078	-351	-672	-9.60	2501	5.52	-8.52	-0.0046
+4 $\delta_p$ -1	492	911	46.23	0	-1.84	38.86	0.0210	460	893	34.08	1256	3.26	29.45	0.0159	401	788	19.01	2500	6.17	16.58	0.0090
-4 $\delta_p$ -1	-495	-917	-46.26	0	-2.02	-37.38	-0.0202	-464	-900	-34.09	1256	3.98	-29.10	-0.0157	-415	-812	-18.92	2505	7.30	-16.71	-0.0090
+4 $\delta_p$ -2	478	886	46.20	0	-1.84	35.85	0.0194	439	855	34.37	1260	4.99	29.10	0.0157	393	772	19.02	2510	8.50	16.59	0.0090
-4 $\delta_p$ -2	-484	-897	-46.22	0	-1.90	-35.63	-0.0192	-434	-845	-34.25	1253	5.85	-29.39	-0.0159	-384	-755	-19.00	2504	9.74	-17.27	-0.0093
+6 $\delta_p$ -1	519	960	68.93	0	-2.68	53.59	0.0289	448	891	51.51	1246	7.49	45.94	0.0248	387	783	28.25	2505	11.54	25.76	0.0139
-6 $\delta_p$ -1	-511	-946	-68.93	0	-2.47	-52.23	-0.0282	-412	-824	-51.12	1252	9.74	-47.12	-0.0254	-362	-735	-28.00	2511	14.15	-26.60	-0.0144
+6 $\delta_p$ -2	477	884	68.91	0	-2.11	49.44	0.0267	363	732	51.16	1259	12.53	47.76	0.0258	325	667	28.59	2506	17.19	26.55	0.0143
-6 $\delta_p$ -2	-474	-878	-69.36	0	-1.96	-47.70	-0.0258	-331	-672	-50.92	1252	15.18	-48.18	-0.0260	-287	-596	-28.32	2504	20.86	-27.65	-0.0149
+8 $\delta_p$ -1	495	916	91.19	0	-2.26	64.81	0.0350	313	660	67.80	1262	19.13	64.82	0.0350	268	573	33.64	2496	25.29	31.98	0.0173
-8 $\delta_p$ -1	-480	-890	-91.88	0	-2.03	-65.89	-0.0356	-278	-595	-67.93	1272	23.86	-65.78	-0.0355	-220	-492	-37.16	2498	33.05	-37.09	-0.0200
+8 $\delta_p$ -2	442	818	91.23	0	-1.33	64.15	0.0346	233	512	68.33	1271	30.07	65.99	0.0356							
-8 $\delta_p$ -2	-427	-791	-91.79	0	-1.15	-64.66	-0.0349	-214	-474	-67.64	1265	36.63	-66.14	-0.0357							
+12 $\delta_p$ -1	469	869	122.85	0	-1.82	98.41	0.0531														
-12 $\delta_p$ -1	-263	-488	35.73	0	-2.02	36.07	0.0195														
H <sub>max</sub> (+)	519	960	68.93	0	-2.68	53.59	0.0289	460	893	34.08	1256	3.26	29.45	0.0159	401	788	19.01	2500	6.17	16.58	0.0090
H <sub>max</sub> (-)	-511	-946	-68.93	0	-2.47	-52.23	-0.0282	-464	-900	-34.09	1256	3.98	-29.10	-0.0157	-415	-812	-18.92	2505	7.30	-16.71	-0.0090
M <sub>max</sub> (+)	518	960	68.34	0	-2.65	53.11	0.0287	460	893	34.08	1256	3.26	29.45	0.0159	401	788	19.01	2500	6.17	16.58	0.0090
M <sub>max</sub> (-)	-511	-946	-68.93	0	-2.47	-52.23	-0.0282	-464	-900	-34.09	1256	3.98	-29.10	-0.0157	-415	-812	-18.92	2505	7.30	-16.71	-0.0090

### (1) Case1 (試験体 No.3)

水平荷重と制御変位量の関係を図 2.13 に、曲げモーメントと変形角の関係を図 2.14 に示す。Case1 では、正方向、負方向ともに制御変位変形角量  $6\delta_p$  の第 1 サイクル時に最大荷重が計測された。最大曲げモーメントの平均値 ( $M_{\max}$  平均値 =  $953.2\text{kN}\cdot\text{m}$ ) は、CFT 構造と仮定した場合の終局曲げ耐力 ( ${}_{\text{cft}}M_u = 755.1\text{kN}\cdot\text{m}$ ) の約 1.26 倍であった。また、最大荷重に至った後に最大荷重の 95% にまで荷重低下したときの変形角を限界変形角とすると、限界変形角は以下の通りとなる。

$$\theta_{95}(+) = 0.0355\text{rad}, \theta_{95}(-) = -0.0344\text{rad}, \theta_{95} \text{ 平均値} = 0.0349\text{rad}$$

試験終了時の状況を写真 2.4 に示す。

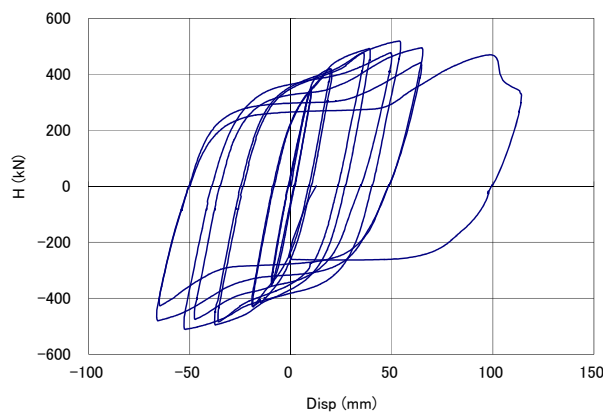


図 2.13 水平荷重と制御変位量の関係(Case1)

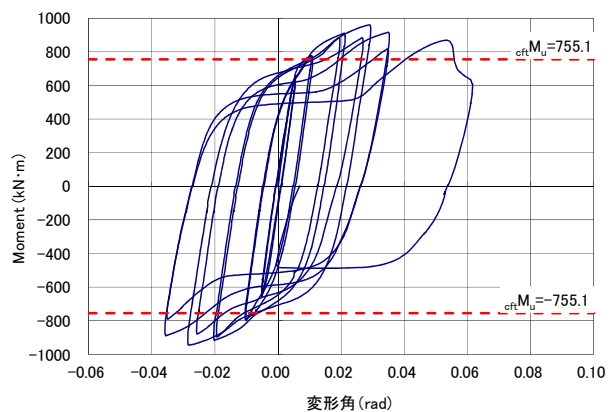


図 2.14 曲げモーメントと部材角の関係(Case1)

## (2) Case2 (試験体 No.1)

水平荷重と制御変位量の関係を図 2.15 に、曲げモーメントと変形角の関係を図 2.16 に示す。Case2 では、正方向、負方向ともに制御変位量  $4\delta_p$  の第 1 サイクル時に最大荷重が計測された。最大曲げモーメントの平均値 ( $M_{\max}$  平均値 =  $896.3\text{kN}\cdot\text{m}$ ) は、CFT 構造と仮定した場合の終局曲げ耐力 ( ${}_{\text{cft}}M_u = 837.6\text{kN}\cdot\text{m}$ ) の約 1.07 倍、限界変形角は以下の通りである。

$$\theta_{95}(+) = 0.0269\text{rad}, \quad \theta_{95}(-) = -0.0217\text{rad}, \quad \theta_{95} \text{ 平均値} = 0.0243\text{rad}$$

試験終了時の状況を写真 2.5 に示す。

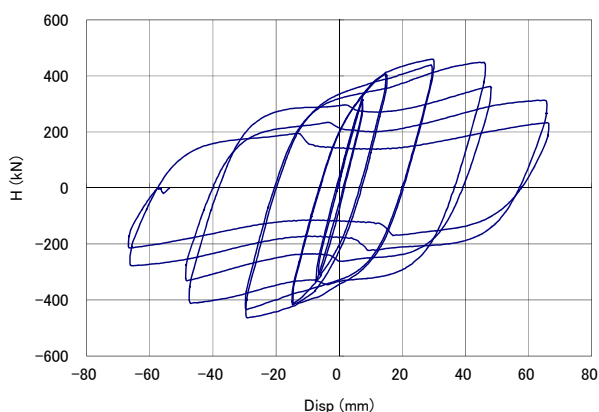


図 2.15 水平荷重と制御変位量の関係 (Case2)

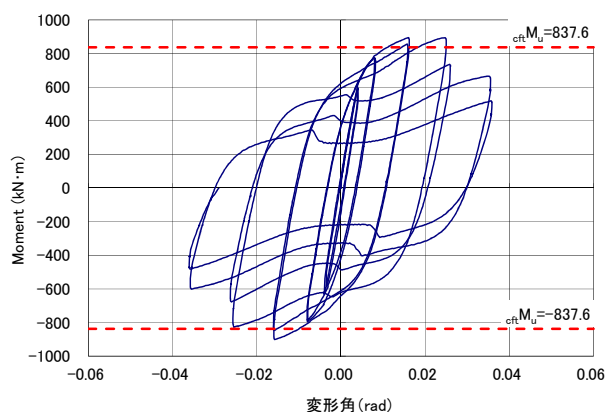


図 2.16 曲げモーメントと変形角の関係 (Case2)

## (3) Case3 (試験体 No.2)

水平荷重と制御変位量の関係を図 2.17 に、曲げモーメントと変形角の関係を図 2.18 に示す。Case3 も Case2 と同様に、正方向、負方向ともに制御変位量  $4\delta_p$  の第 1 サイクル時に最大荷重が計測された。最大曲げモーメントの平均値 ( $M_{\max}$  平均値 =  $800.0\text{kN}\cdot\text{m}$ ) は、CFT 構造と仮定した場合の終局曲げ耐力 ( ${}_{\text{cft}}M_u = 860.5\text{kN}\cdot\text{m}$ ) の約 0.93 倍、限界変形角は以下の通りである。

$$\theta_{95}(+) = 0.0146\text{rad}, \quad \theta_{95}(-) = -0.0120\text{rad}, \quad \theta_{95} \text{ 平均値} = 0.0133\text{rad}$$

試験終了時の状況を写真 2.6 に示す。

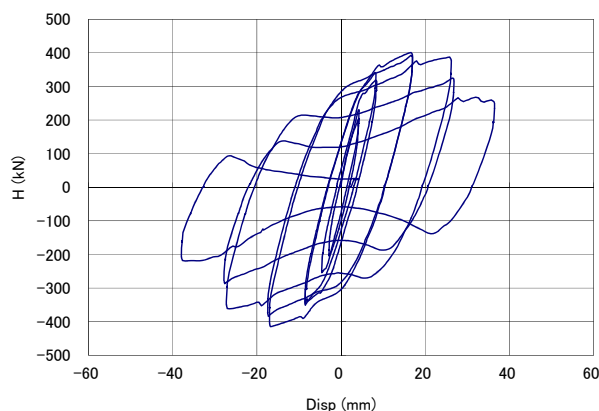


図 2.17 水平荷重と制御変位量の関係 (Case3)

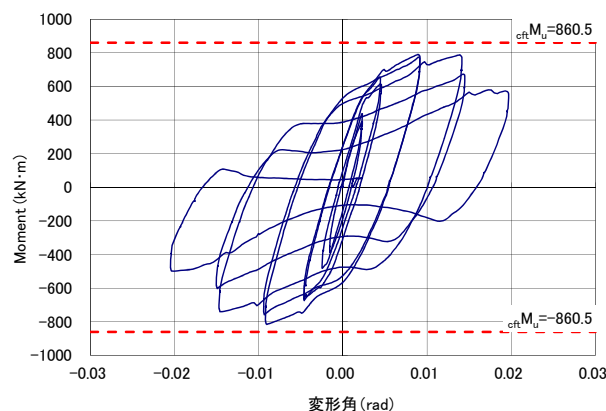


図 2.18 曲げモーメントと変形角の関係 (Case3)



写真 2.4 試験終了時の状況  
(Case1)



写真 2.5 試験終了時の状況  
(Case2)



写真 2.6 試験終了時の状況  
(Case3)



## 2.3 試験結果のまとめ

『ずれ止め+1D コンクリート中詰め』構造における圧縮・曲げ試験結果のまとめを以下に記す。

### (1) 曲げモーメントと変形角の関係について

- ・軸力比が大きくなるにつれ、終局曲げ耐力・限界変形角ともに小さくなる傾向にある。
- ・終局曲げ耐力は CFT 構造と概ね同等と評価できるが、軸力比が大きくなると CFT 構造の終局曲げ耐力を下回る傾向にある（軸力比に応じて終局曲げ耐力を低減する必要あり）。
- ・最大荷重（終局曲げ耐力）に達した後は、軸力比が大きいくほどの荷重低下が大きくなる傾向にある。
- ・最大荷重に達した後は、第 1 サイクルの荷重に比較して第 2 サイクルの荷重は低下する傾向にある。また、軸力比が大きくなるにつれ、この傾向はより顕著になる。

### (2) 局部座屈について

- ・局部座屈の発生位置は、ベースプレート上端（固定端）より概ね  $0.5D$  ( $D$ : 鋼管径) の範囲となっている。
- ・軸力比が大きいくほど、局部座屈の発生位置はベースプレート上端（固定端）より離れる傾向にあり、また、局部座屈の表れ方も顕著になる傾向にある。

## 2.4 試験体の解体調査

試験終了後に Case3（試験体 No.2：軸力比 0.6）について、中詰めコンクリートの状況を確認するため解体調査を実施した。写真 2.7～2.9 にその状況を示す。



写真 2.7 解体前の試験体 (Case3)



写真 2.8 解体後の試験体 (Case3：鋼管内面の状況)



写真 2.9 解体後の試験体 (Case3：中詰めコンクリートの状況)

上段ずれ止めより上方のコンクリートは比較的健全であったが、下段ずれ止めと上段ずれ止め間（座屈位置）のコンクリートについては激しく圧壊している状況が確認された。また、下段ずれ止めより下方のコンクリートについては、損傷範囲がずれ止め下面に集中している状況が確認された。

### 3. 終局曲げ耐力と変形角の算定式に対する検討

ずれ止めの無い試験体による既往の試験結果と今回実施した『ずれ止め+1D コンクリート中詰め』構造の試験結果をもとに、終局曲げ耐力と限界変形角の算定式を提案する。

#### 3.1 終局曲げ耐力

既往の試験結果（ずれ止め無）および今回の試験結果（ずれ止め有）について、軸力比および中詰め長と基準化径厚比に着目し、中詰め長と基準化径厚比との比率を形状係数として、軸力比・形状係数と  $M_{\max}/cftM_u$  の関係を示すと図 3.1 の通りとなる。

両者の相関から、ずれ止めがない場合では(3.1)式、ずれ止めがある場合では(3.2)式が得られる。ずれ止めがある場合では試験数が 3 点しかないものの、ずれ止めがない場合と同様に軸力比・形状係数が大きくなるにつれて  $M_{\max}/cftM_u$  が増加する傾向を示していることから、(3.2)式を終局曲げ耐力の算定式としてよいものと判断される（ただし、 $M_{\max}/cftM_u \leq 1$ ）。

$$\frac{M_{\max}}{cftM_u} = \frac{0.014(1-P/N_y) \cdot L_{pt}/D}{\beta} + 0.732 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\frac{M_{\max}}{cftM_u} = \frac{0.045(1-P/N_y) \cdot L_{pt}/D}{\beta} + 0.696 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

P：作用鉛直力 (kN)

$N_y$ ：鋼管の降伏軸力 (kN)

$L_{pt}$ ：中詰めコンクリート長 (m)

D：鋼管径 (m)

$\beta$ ：基準化径厚比

$$\beta = \frac{D}{t} \cdot \frac{\sigma_y}{E_s}$$

t：鋼管の板厚 (m)

$\sigma_y$ ：鋼管の降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_s$ ：鋼管の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)



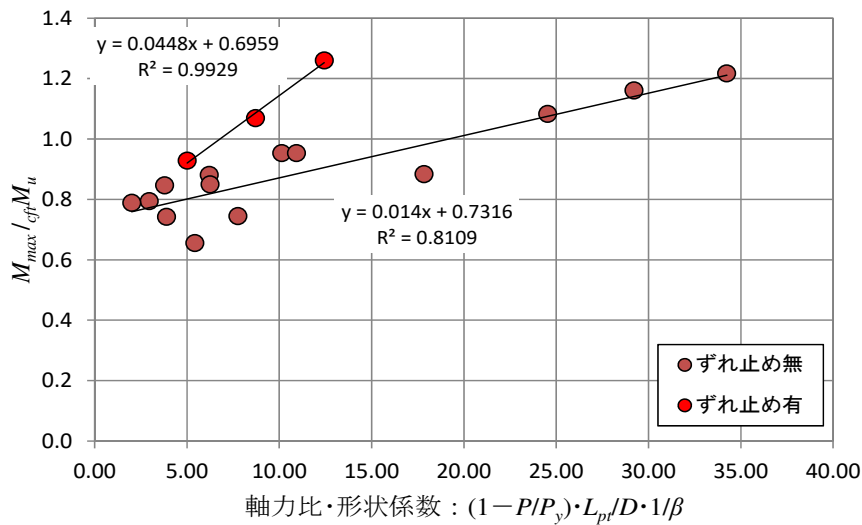


図 3.1 軸力比・形状係数と  $M_{max}/cftM_u$  の関係

### 3.2 変形角

#### (1) 変形性能

文献 1) によれば、塑性変形能力  $R_{95}$ （終局曲げ耐力が最大耐力に達した後に 95%まで低下した時の塑性変形能）は(3.3)式により求めることができるとされている。

ここで、中詰め比 ( $L_{pt}/D$ ) が 1.7 以上のずれ止めがない場合の試験結果および今回の試験結果（ずれ止め有）について、軸力比に着目し、 $\cos(\pi/2 \cdot n)/\beta$  と試験より得られた限界変形角から逆算される塑性変形能力  $R_{95}$  の関係を示すと図 3.2 の通りとなる。

$$R_{95} = \theta_{95}/\theta_{pc} - 1 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\theta_{pc} = \frac{M_{pc} \{1 - \alpha \cdot L / \tan(\alpha \cdot L)\}}{P \cdot L} \quad (P > 0) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\theta_{pc} = \frac{M_{pc} \cdot L}{3E_s I_s} \quad (P \leq 0) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\alpha = \left( \frac{P}{E_s I_s} \right)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$R_{95}$  : 終局曲げ耐力が最大耐力に達した後に 95%まで低下した時の塑性変形能

$\theta_{95}$  : 限界変形角 (rad)

$\theta_{pc}$  : 弾性限界変形角 (rad)

$M_{pc}$  : 軸力の影響を考慮した鋼管の全塑性モーメント (kN・m)

$L$  : 部材長さ (載荷点距離) (m)

$I_s$  : 鋼管の断面 2 次モーメント (m<sup>4</sup>)

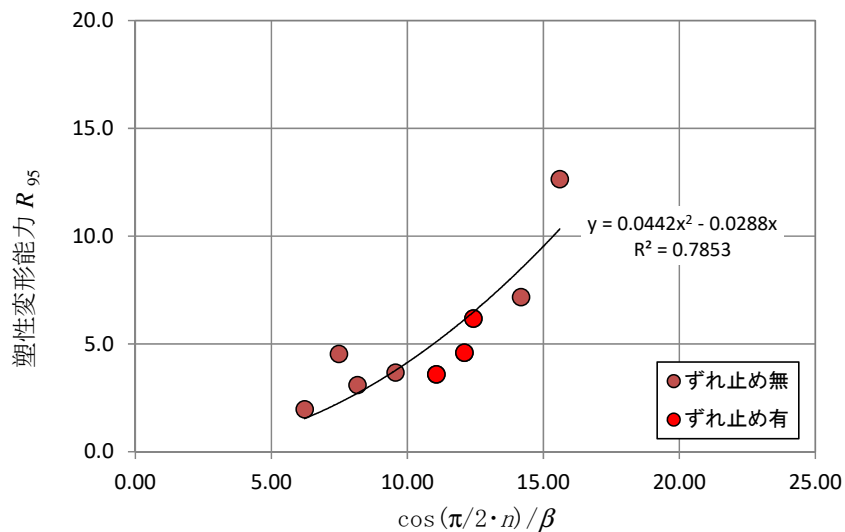


図 3.2  $\cos(\pi/2 \cdot n)/\beta$ と  $R_{95}$  の関係

両者の相関から(3.7)式が得られる。試験数が少ないため課題が残るが、これを塑性変形能力の算定式とする。

$$R_{95} = 0.044 \left\{ \frac{\cos(\pi/2 \cdot n)}{\beta} \right\}^2 + 0.029 \frac{\cos(\pi/2 \cdot n)}{\beta} \dots \dots \dots (3.7)$$

n : 換算軸力比

$$n = \frac{P}{N_y + \eta \cdot F_c \cdot A_c}$$

n : 換算軸力比

$F_c$  : 中詰めコンクリートの設計基準強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_c$  : 中詰めコンクリートの断面積 (m<sup>2</sup>)

$\eta$  : 中詰めコンクリートへの応力伝達率で  $\eta = M_{\max}/cftM_u$  として(3.1)式または(3.2)式から求める (ただし、 $\eta \leq 1$ )

(2) 限界変形角

限界変形角  $\theta_{95}$  は(3.3)式を変形して(3.8)式より求める。

$$\theta_{95} = (R_{95} + 1) \cdot \theta_{pc} \dots \dots \dots (3.8)$$

図 3.3 に限界変形角  $\theta_{95}$  の実験値と計算値の比較を示す。全データとも 90%信頼区間内にあり、限界変形角は(3.7)式および(3.8)式を用いて近似できることがわかる。

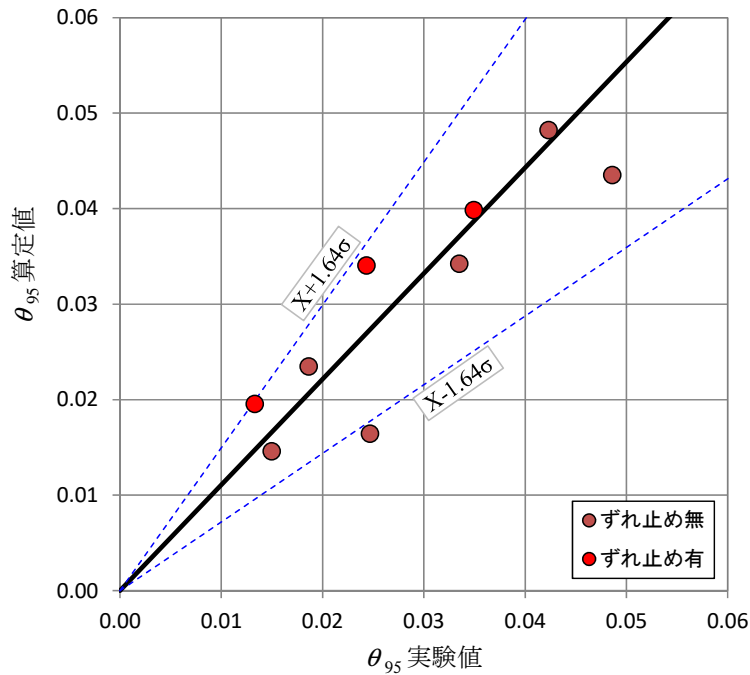


図 3.3  $\theta_{95}$  の実験値と計算値の比較

(3) 最大耐力時の変形角  $\theta_{Mmax}$

最大耐力時の変形角  $\theta_{Mmax}$  は、最大耐力時の塑性変形能力  $R_{Mmax}$  から(3.9)式により求める。

$$R_{Mmax} = \theta_{Mmax} / \theta_{pc} - 1 \dots\dots\dots (3.9)$$

$R_{Mmax}$  : 終局曲げ耐力が最大耐力に達した時の塑性変形能

$\theta_{Mmax}$  : 終局曲げ耐力が最大耐力に達した時の変形角 (rad)

塑性変形能力  $R_{95}$  を求めた場合と同様に、中詰め比 ( $L_{pt}/D$ ) が 1.7 以上のずれ止めがない場合の試験結果および今回の試験結果 (ずれ止め有) について、 $\cos(\pi/2 \cdot n)/\beta$  と試験より得られた最大曲げモーメント時の変形角から逆算される塑性変形能力  $R_{Mmax}$  の関係を図 3.4 に示す。

両者の相関から(3.10)式が得られる。これを塑性変形能力の算定式として、最大曲げモーメント時の変形角  $\theta_{Mmax}$  は(3.11)式より求める。

$$R_{Mmax} = 0.019 \left\{ \frac{\cos(\pi/2 \cdot n)}{\beta} \right\}^2 + 0.085 \frac{\cos(\pi/2 \cdot n)}{\beta} \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\theta_{Mmax} = (R_{Mmax} + 1) \cdot \theta_{pc} \dots\dots\dots (3.11)$$

図 3.5 に最大曲げモーメント時の変形角  $\theta_{Mmax}$  の実験値と計算値の比較を示す。データは概ね 90% 信頼区間にあり、限界変形角は(3.10)式および(3.11)式を用いて近似できることがわかる。

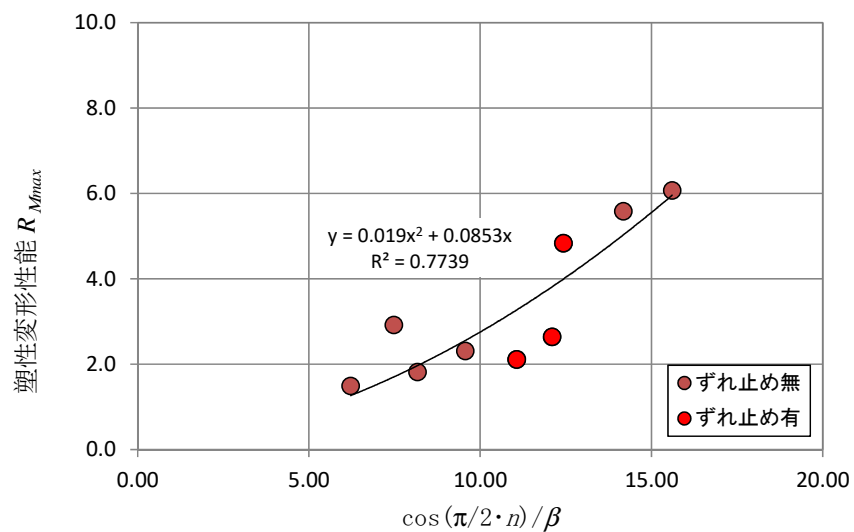


図 3.4  $\cos(\pi/2 \cdot n)/\beta$ と  $R_{Mmax}$  の関係

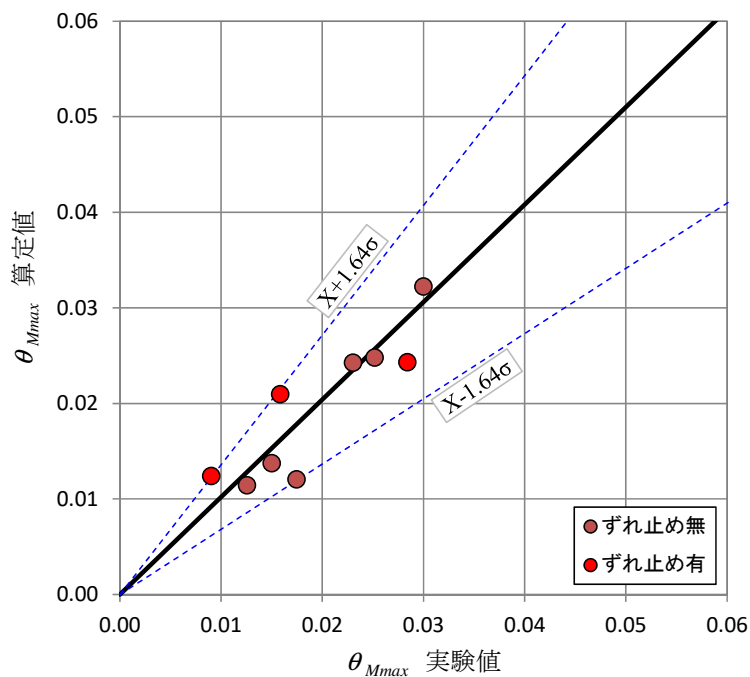


図 3.5  $\theta_{Mmax}$  の実験値と計算値の比較

【参考文献】

- 1) 津田恵吾, 松井千秋, 一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp131~138, 1998 年 3 月
- 2) 廣瀬智治, 増田敏聡, 市川和臣, 高野公寿, 木村祥裕, 既往の実験結果に基づく鋼管杭の変形性能の統計的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.687~688, 2016 年 8 月

参考資料 (試験体製作図)

