

論文 溶融亜鉛めっきコンクリート充填鋼管の力学的性状に関する実験的研究

柳下文夫*¹・堀口 眞*²・田淵敦彦*³・伏見義仁*⁴

要旨：溶融亜鉛めっきを施したコンクリート充填鋼管の復元力特性を含む種々の力学的性状を定量的に把握するために載荷実験を行った。その結果、短柱圧縮実験では中込コンクリートに対するコンファインド効果を確認し、充填コンクリート鋼管の力学的優位性を認識した。さらに、既往の短柱圧縮耐力式との比較を行った。単軸の単純引張および圧縮・引張繰り返し載荷実験では、溶融亜鉛めっき処理に起因する降伏点および引張強さの上昇が確認された。また、充填コンクリートのひび割れと鋼に対するバウジッガー効果等が繰り返し履歴形状に与える影響を明らかにした。

キーワード：コンクリート充填鋼管，溶融亜鉛めっき，ひずみ時効，送電用鉄塔，弾塑性挙動

1. はじめに

溶融亜鉛めっきを施したコンクリート充填鋼管（Concrete Filled Steel Tubes：以下，CFT材と略記）を柱材¹⁾に採用している送電用鉄塔は、その骨組みの一部に塑性ヒンジが形成されても倒壊することはない。その理由は、同部材のもつじん性により応力の再配分が行われるためであり、このことは、過去の実大規模の載荷実験²⁾によって検証されている。他方、我が国のような地震および台風の常襲地帯においては、その耐震および耐風設計が極めて重要な課題である。送電鉄塔の耐震耐風設計を合理的に行うには、終局耐力の評価と併せて、部材および鉄塔全体の塑性域を含む復元力特性の定量的な把握が必要となる。そこで本研究は、鉄塔の柱材に使用されている鋼材に溶融亜鉛めっきを施したCFT材に対する種々の載荷実験を行い、材料の機械的性質に関する基礎データと地震応答解析を含む弾塑性解析に使用する復元力モデルを作成するための力学的基礎資料を収集した。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

試験体の一覧を表-1に示す。鋼管の材質は送電鉄塔に使用しているSTK400とSTK540の2種類である。鋼管材料の製造ロットは、それぞれの鋼管サイズ別に同一であり、試験体は同時期に製造し、溶融亜鉛めっきを施した。鋼材の実降伏点応力度は、STK400で41.10kN/cm²、STK540で57.85kN/cm²である。鋼管に充填したコンクリートの配合を表-2に示す。なお、骨材はすべて軽量骨材を使用しており、その比重は1.3である。また、コンクリートを充填した後、60℃で約3時間の蒸気養生を行った。次に、溶融亜鉛めっきの作業工程を次に示す。

①脱脂：苛性ソーダ(60℃)→60分

②酸洗：硫酸(40～60℃)→40～60分

③フラックス処理：塩化亜鉛&アンモニア
(50～90℃)→2分

④めっき処理：亜鉛(445±5℃)→3～7分

⑤冷却：水温(50～80℃)

圧縮実験において、試験体の長さは一般に断面最大径の3倍程度の長さの柱について実験を行うことが提唱（日本建築学会：コンクリート充填鋼管設計施工指針³⁾：以下，AIJと略記）されていることから、本実験で用いた試験体ナイ

*1 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 関西電力(株) 総合技術研究所流通設備研究室

*3 (株)酒井鉄工所 技術開発部設計技術課長

*4 (株)酒井鉄工所 技術開発部

表-1(a) 試験体一覧 (圧縮)

試験体No.	充填	めっき	材質	鋼管サイズ	L(mm)	数
C4FG-1~4	○	○	STK400	φ 114.3×3.5	345	4
C4FG-1~4	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	500	3

表-1(b) 試験体一覧 (引張)

試験体No.	充填	めっき	材質	鋼管サイズ	L(mm)	数
T4AG-1~4		○	STK400	φ 114.3×3.5	1070	4
T4AB			STK400	φ 114.3×3.5	1070	1
T4FG-1~2	○	○	STK400	φ 114.3×3.5	1070	2
T5AG-1~2		○	STK540	φ 165.2×4.5	2070	2
T5FG-1~4	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	2070	4
T5FB-1~2	○		STK540	φ 165.2×4.5	2070	2

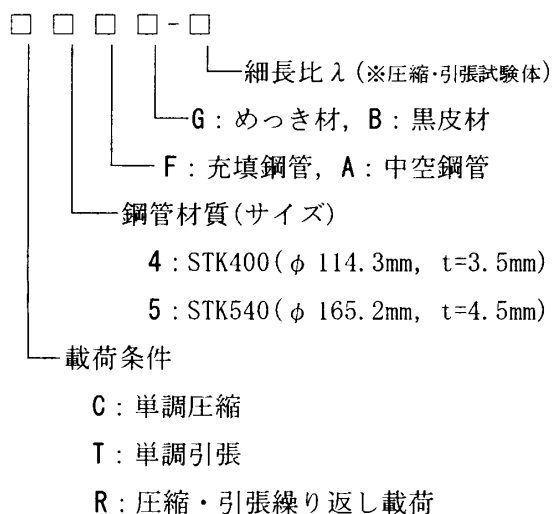
表-1(c) 試験体一覧 (圧縮・引張)

試験体No.	充填	めっき	材質	鋼管サイズ	λ	数
R5FG-40-1~3	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	40	3
R5FG-50-1~2	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	50	2
R5FG-70-1~2	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	70	2
R5FG-80-1~2	○	○	STK540	φ 165.2×4.5	80	2
R4FG-90-1~2	○	○	STK400	φ 114.3×3.5	90	2

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	マ ラ ン グ (cm)	空 気 量 (%)	W/C (%)	細 骨 材 率 (%)	重量 (kgf/cm ³)				
					水 W	セ メント C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	混 和 剤
15	8±2	1.5	37	46	170	460	593	576	3.2

ズは、φ 114.3×345mm、φ 165.2×500mmの2種類の円柱とした。また、引張実験および圧縮・引張繰り返し載荷実験に用いた試験体の細長比λ(図-1に示すピン間距離 L_k を断面2次半径で除した値)は、標準鉄塔の支柱材の適用範囲をカバーすべく、λ=40~90の間に設定した。なお、試験体名は以下の要因を含む形で決定した。



2.2 実験方法

実験シリーズを載荷方法により大別すると次のようになる。すなわち、CFT材のコンファイン

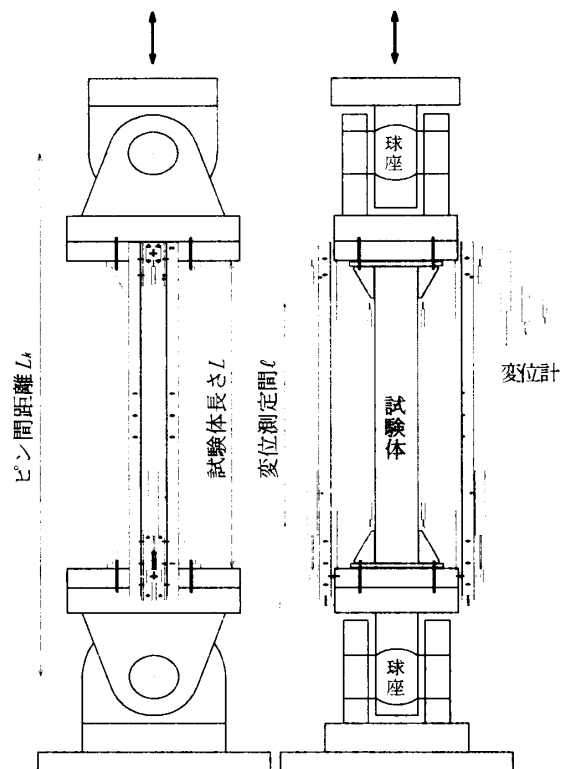


図-1 圧縮・引張載荷装置と試験体

ド効果による耐力上昇を確認するために短柱を対象として行った圧縮実験、溶融亜鉛めっき処理が鋼管素材の力学的性質に及ぼす影響を明らかにする目的で行った長柱を対象とした引張実験、および、同種断面構成要因を持つ充填鋼管の弾塑性復元力特性を定量的に把握する目的で行った圧縮・引張繰り返し載荷実験の3種類である。なお実験は、全ての載荷シリーズに対して同一要因の試験体を1~4体製作し、同様な載荷を行った。

短柱圧縮実験は標準的なアムスラーを用いて実施した。引張実験および圧縮・引張繰り返し載荷実験の載荷概要図を図-1に示す。試験体を球面ブッシュを使用することにより任意方向に傾くことができる上下のピンの間に設置し、載荷能力±2000kN級のアクチュエータを用いて単調引張および圧縮・引張繰り返し載荷を行った。圧縮・引張繰り返し載荷シリーズにおいて、細長比λが40, 80および90の各試験体シリーズに対する載荷スケジュールは、①「送電用支持物設計標準⁴⁾: 以下、JECと略記」公称座屈荷重②0.2%引

張ひずみ③初期座屈直前④0.5%引張ひずみ⑤座屈直前，以降，1%，2%，4%の引張ひずみと座屈直前もしくは座屈荷重等の大振幅の変位増分を基本として行った。一方，細長比 λ が50および70の両試験体シリーズについては，コンクリート充填鋼管柱トラス鉄塔の実大破壊実験時に得られたデータ（初期の破壊段階で部材に生じた引張ひずみが0.37%であった）をもとに，引張載荷側→0.5%，圧縮載荷側→実強度を用いてJEC式で算出した計算座屈強度で10回の繰り返し載荷を行い，その後，漸増的に変位振幅を増大させ，座屈によって耐力が低下するまで載荷を継続した。なお，測定項目は次の通りである。全ての試験体の1/2高さにおいて，塑性域ひずみゲージを貼付（対角4位置で軸方向および円周方向）し，荷重ステップ毎のひずみを測定した。また，鋼管の材軸方向の全体変形は，柱両端に局部座屈防止の目的で溶接した補剛材間において，高感度変位計を用いて測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮載荷実験

図-2に短柱圧縮載荷実験の結果を示す。同図より，短柱の圧縮耐力については，実験結果と計算値(AIJ)がほぼ一致していることがわかる。一方，応力-ひずみ関係(未提示)については，全ての試験体において，最大耐力以降緩やかに20～25%の耐力低下を示した後，最大耐力時ひずみの5倍以上に及ぶ範囲で，ほぼその耐力を維持した。なお，AIJによる短柱の終局耐力 N_u の計算式を以下に示す。

$$N_u = (1 + \eta) A_s \cdot F + A_c \cdot \gamma_t \cdot F_c \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

ここに，

η : コンファインド効果による耐力上昇係数，0.27

A_s : 鋼管の断面積 (cm^2)

F : 鋼管の降伏強度 (kN/cm^2)

A_c : コンクリートの断面積 (cm^2)

γ_t : コンクリート強度の低減係数，0.85

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kN/cm^2)

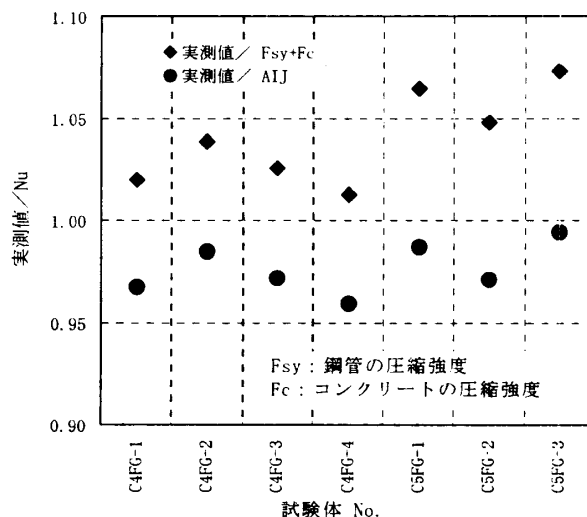


図-2 圧縮試験結果(計算値との比較)

3.2 引張載荷実験

実験結果を表-3に示す。同表より，試験体の破断位置について，中空鋼管では試験体T4AG-2を除く全ての試験体で柱中央部で破断した。また，めっき充填鋼管では材端補剛材に補強リングを取り付けた試験体のみ，リング隅肉溶接部で破断した。なお，このとき荷重は微増中であり，最大荷重は取れていない。表-4および図-3に試験体の種別による平均応力度と耐力上昇比を示す。また，図-4に各試験体の応力-ひずみ関係および耐力上昇比をそれぞれ示す。まず，中空鋼管の力学性状を比較する。同図より，電縫鋼管の黒皮材は，冷間塑性加工により造管をしているので降伏棚が出ていない。しかし，溶融亜鉛めっきを施した鋼管は，ひずみ時効が促進され，明瞭な降伏点と降伏棚が再出現している。この降伏棚の出現により，めっき鋼管の降伏応力度は黒皮材の降伏点(0.2% proof stress)より9～13%上昇している。また，引張強さに対しても2～8%上昇した。しかし，破断伸びについては，黒皮材が17.5%程度であったのに対し，めっき鋼管で9.3～15.1%程度であった。次に，充填鋼管を比較する。充填めっき鋼管の降伏点応力度は充填黒皮材のそれに比して約15%上昇しているが，そのほとんどがひずみ時効の影響によるものと考えられる。引張強さに対して充填めっき鋼管と中空めっき鋼管とを比較した場合，前者

が後者を約7%上回った。なお、破断伸びに対しては、一部試験体が端部の補剛材近傍で破断(前述)しているので、明確な数値として記述できない。

表-3 実験結果一覧(引張試験)

試験体 No.	管径 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (cm^2)	変位 測定間 距離 (mm)	弾性係数 (kN/cm^2)	降伏 応力度	引張 強度	破断 伸び (%)	破断 位置	充 填	め っき
T4AG-1	114.60	3.360	11.74	1108	2.03E+04	40.92	44.66	12	中央		○
T4AG-2	114.63	3.375	11.80	1108	2.09E+04	41.05	44.76	8.6	端部		○
T4AG-3	114.70	3.353	11.73	1108	2.01E+04	41.32	44.66	15	中央		○
T4AG-4	114.38	3.349	11.68	928	2.13E+04	39.60	42.05	12	中央		○
T4AG-5	114.44	3.348	11.68	928	2.37E+04	39.38	42.00	9.3	中央		○
T4AB-1	114.44	3.345	11.67	962	2.19E+04	36.22	41.20	18	中央		
T4FG-1	114.75	3.368	11.79	1108	2.32E+04	42.20	46.69	5.9	端部	○	○
T4FG-2	114.75	3.358	11.75	1108	2.18E+04	42.16	46.30	5	端部	○	○
T5AG-1	165.30	4.438	22.43	1092	2.11E+04	58.57	59.49	12	中央		○
T5AG-2	165.33	4.458	22.53	1092	2.04E+04	57.14	59.08	11	中央		○
T5FG-1	165.30	4.453	22.50	1092	2.24E+04	59.97	64.49	4.8	端部	○	○
T5FG-2	165.08	4.460	22.51	1092	2.07E+04	58.78	62.33	4.9	端部	○	○
T5FB-1	165.18	4.463	22.53	1092	1.93E+04	52.58	62.39	8.9	中央	○	
T5FB-2	165.15	4.443	22.43	1092	2.23E+04	50.59	60.76	10	端部	○	
T5FG-3	165.25	4.445	22.46	1020	2.14E+00	56.68	57.48	12	中央	○	○
T5FG-4	165.28	4.403	22.25	1020	2.16E+00	56.81	60.49	13	中央	○	○

表-4 試験体の種別による平均応力度と耐力上

STK400 $\phi 114.3\text{mm}$ $t=3.5\text{mm}$	応力度 kN/cm^2		中空めっき1 に対する比		中空めっき2 に対する比		中空黒皮 に対する比		充填めっき に対する比	
	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u
中空めっき1	41.10	44.70	1.00	1.00			1.13	1.08	0.97	0.96
中空めっき2	39.49	42.03			1.00	1.00	1.09	1.02	0.94	0.90
中空 黒皮	36.22	41.20	0.88	0.92	0.92	0.98	1.00	1.00	0.86	0.89
充填めっき	42.18	46.49	1.03	1.04	1.07	1.11	1.16	1.13	1.00	1.00

STK540 $\phi 165.2\text{mm}$ $t=4.5\text{mm}$	応力度 kN/cm^2		中空めっき に対する比		充填めっき に対する比		充填 黒皮 に対する比	
	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u	σ_y	σ_u
中空めっき	57.85	59.29	1.00	1.00	0.97	0.94	1.12	0.96
充填めっき	59.38	63.41	1.03	1.07	1.00	1.00	1.15	1.03
充填 黒皮	51.59	61.58	0.89	1.04	0.87	0.97	1.00	1.00

$\phi 114.3 \times 3.5$ の中空めっき2は他とめっき時期が異なっている。

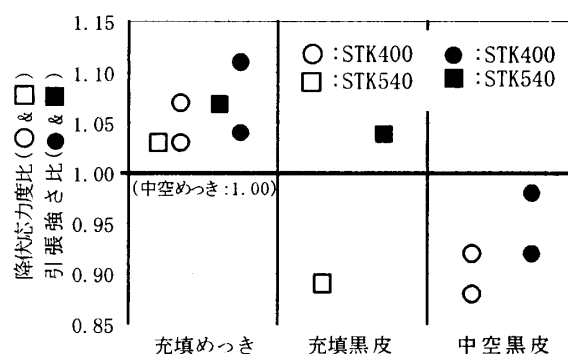


図-3 中空めっき鋼管に対する耐力比

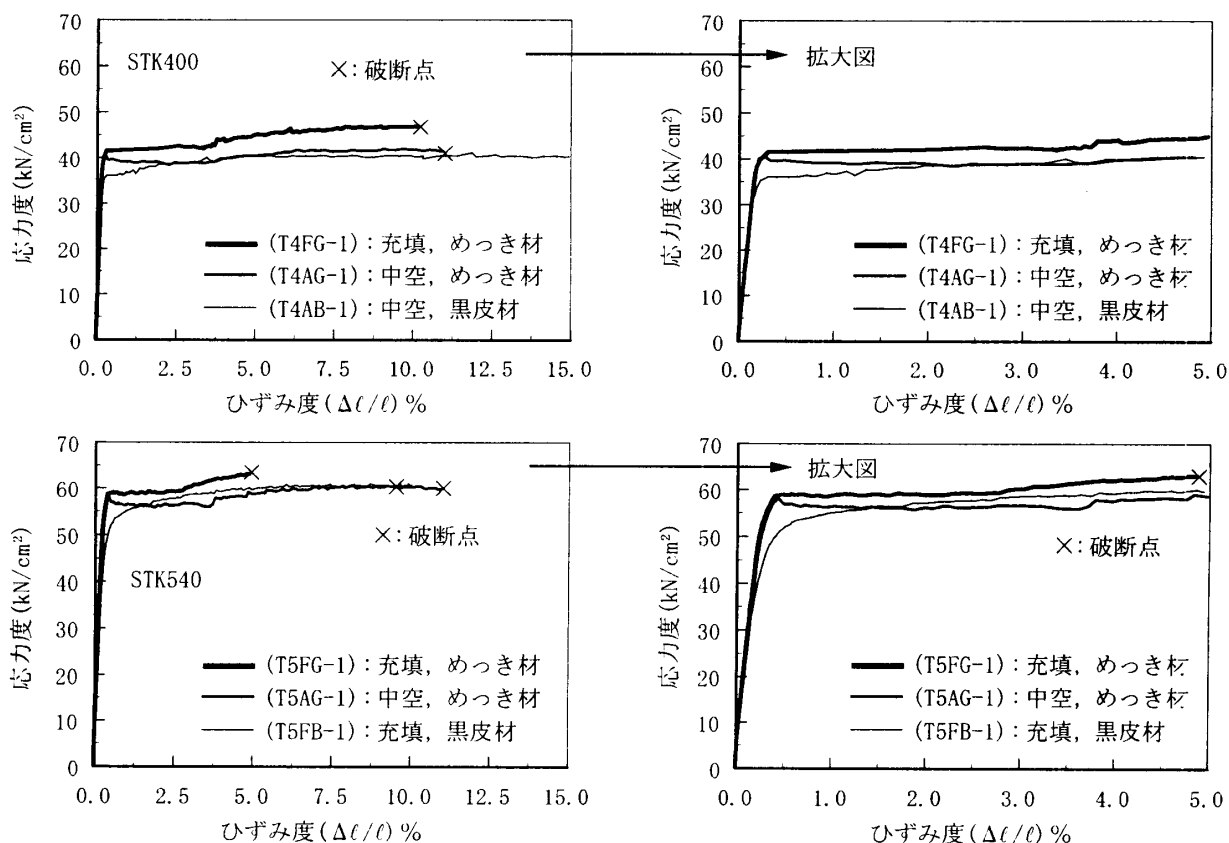


図-4 STK400材&STK540材の応力度-ひずみ度関係

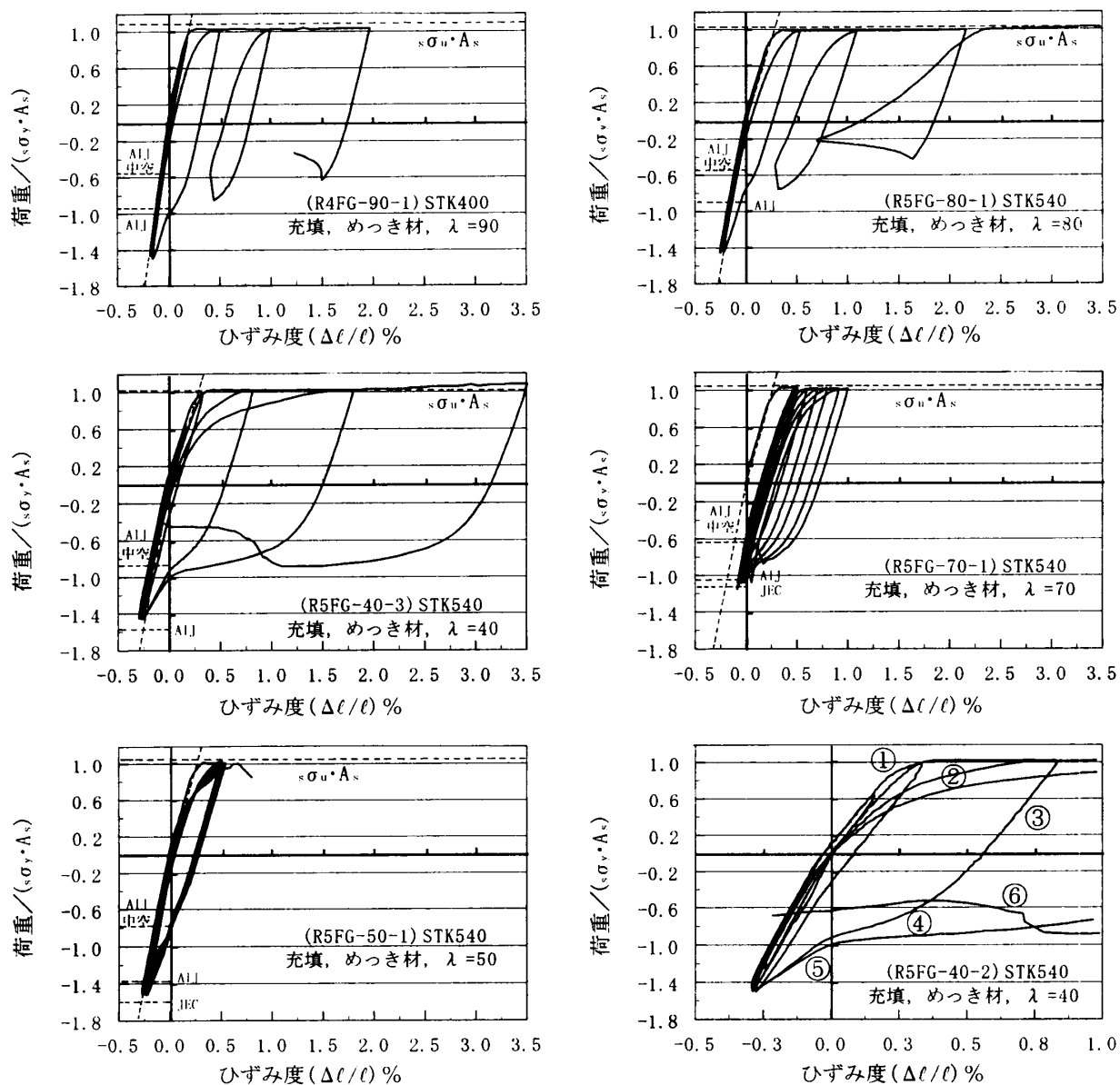


図-5 荷重比(亜鉛めっき中空鋼管の降伏荷重に対する)－ひずみ度関係

3.3 圧縮・引張繰返し載荷実験

実験結果を図-5に示す。同図における横軸は鋼管のひずみ度、縦軸は載荷荷重を亜鉛めっき中空鋼管の降伏荷重(実験値)で除した値を示す。図中には、亜鉛めっき中空鋼管引張強度($s\sigma_u$)×鋼管断面積(A_s)、AIJの式によるCFT材の座屈強度および中空鋼管の座屈強度等を記載した。また、点線の斜線は、引張側が亜鉛めっき中空鋼管の単純引張載荷実験による傾きを記したものであり、圧縮側が短柱圧縮載荷実験によるものである。引張ひずみが0.5%未満におけるコンクリート充填鋼管の引張耐力は、中空鋼管のものとほぼ同様な値を示した。しかし、大変形時に於

いては引張実験結果と同様に5～7%耐力が上昇した。また、全ての試験体における引張載荷後の圧縮載荷において、鋼管の一部に局部座屈の兆候が現れる以前は、ひずみの値が零(0%)付近から充填コンクリートの圧縮負担^{5),6)}が始まり逆S形(スリップ形)の挙動を示す。その後、全体座屈のモードが卓越するまで抵抗力が上昇する。一方、コンクリート充填鋼管に1～2%の引張ひずみを与えた後に圧縮載荷を行うと、鋼管柱の一部にリング形状を示す局部座屈が発生し、抵抗力は一旦ピークを迎える。なお、その時の圧縮抵抗力は、引張側耐力の70～75%程度(引張とひずみが大きくなるとこのピーク値はさらに低下

する)である。さらに圧縮荷を進めると、一度抵抗力が減少した後、再び抵抗力は上昇を開始する。この抵抗力上昇開始点は、必ずしもひずみの値が零(0%)付近とは限らず、引張与ひずみの大きさと共に、引張側にシフトする傾向が示された。また、先の抵抗力の落ち込みは、引張与ひずみの大きさに関係していることが分かる。なお、圧縮側におけるこれらの現象に及ぼす累積塑性ひずみ量の影響は認められなかった。細長比と座屈の関係において、細長比 $\lambda=80\sim90$ のような長柱のCFT材では、1.0%の引張ひずみを与えた後の圧縮荷において、その耐力は座屈により低下した。しかし、送電鉄塔の柱材に多く使用されている $\lambda=40\sim50$ のものでは、約2.0%の引張ひずみを与えた後の圧縮荷でも座屈現象は呈さなかった。

図中には試験体R6FG-40-2の荷重比-ひずみ関係を示し、モデル化に際して必要となるループ形状の特徴を整理する。

- ①溶融亜鉛めっきを施したことによる降伏荷重の上昇と降伏棚の出現(ひずみ時効の促進)
- ②バウジンガー部の出現
- ③充填コンクリートのひび割れ閉合開始
- ④鋼管の局部座屈発生。※充填コンクリートのひび割れ未閉合
- ⑤充填コンクリートのひび割れの閉合と抵抗力的上昇
- ⑥全体座屈による抵抗力の減少(座屈破壊)

4. まとめ

溶融亜鉛めっきを施したコンクリート充填鋼管に対する種々の荷重実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) CFT材の短柱圧縮強度は、AIJの短柱圧縮耐力式によって算出した強度と良く一致した。
- (2) 冷間塑性加工により形成された電縫鋼管に溶融亜鉛めっきを施すと、445℃で3～7分の温度履歴を受けるため「ひずみ時効」が促進される。その結果、降伏応力は黒皮材より9～13%上昇

し、降伏棚も再出現する。

- (3) 溶融亜鉛めっきを施した電縫鋼管にコンクリートを充填すると引張降伏応力は3～7%、引張強さは4～11%上昇した。

- (4) 試験体引張破断時の伸びは、中空黒皮材(17.5%)>中空めっき材(9.3～15.1%)>充填黒皮材(8.9～10.0%)>充填めっき材(4.8～5.9%)の順であった。

- (5) 座屈経験後のCFT材の引張強度は単純引張強度とほぼ同等であった。

- (6) 引張降伏経験後のCFT材の圧縮性状および再引張性状において、バウジンガー効果と充填コンクリートのひび割れの影響により剛性は低下する。しかし、充填コンクリートのひび割れが閉合した後に、再び剛性が上昇する。

- (7) 細長比と引張荷重後の圧縮挙動との関係が把握できた。特に、送電鉄塔の柱材の適用される $\lambda=40\sim50$ の充填鋼管柱では、2.0%程度の引張ひずみを与えた後の圧縮荷においても座屈現象は現れなかった。

【謝辞】 本研究にあたり京都大学大学院工学研究科教授 井上一郎博士および同助手 吹田啓一郎博士のご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 鈴木俊郎, 佐藤亘宏, 深沢 隆: 溶融亜鉛めっき鋼管の圧縮変形性状に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No. 420, pp. 51-61, 1991. 2
- 2) 井上一郎, 中塚光一, 富田雅俊, 小林征紀: コンクリート充填鋼管柱トラス鉄塔の実大破壊実験, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, 日本鋼構造協会, pp. 217-224, 1993. 7
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997. 10
- 4) 電気学会: 送電用支持物設計標準 JEC-127, 1997. 10
- 5) 崎野良比呂, 河野昭彦, 松井千秋, 中島隆裕: コンクリート充填鋼管部材の座屈に及ぼすバウジンガー効果の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 1577-1578, 1991. 9
- 6) 河野昭彦, 松井千秋, 崎野良比呂, 中島隆裕: 軸引張塑性履歴がある鋼管コンクリート部材の曲げ座屈荷重に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 39B, pp. 335-342, 1993. 3