

(29) ステンレス鋼を用いたコンクリート合成柱の圧縮強度に関する基礎的研究

大垣 賀津雄¹・小畑 健²・川井 豊³・志村 保美⁴・赤江 信哉⁵

¹正会員 ものづくり大学 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

²学生会員 ものづくり大学 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: b01412039@iot.ac.jp

³正会員 日本大学 生産工学部 非常勤講師 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: yutaka-kawai@mue.biglobe.ne.jp

⁴新日鉄住金ステンレス株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内一丁目8番2号)

E-mail: shimura.yasumi.rj4@nssc.nssmc.com

⁵太平洋マテリアル株式会社 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)

E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

港湾の栈橋や護岸等に使用されている鋼管柱や鋼管杭の防錆については、種々の工法が開発され適用されている。しかしながら、近年、これらの鋼管柱等の耐震強度向上を目的とした補強と、飛沫部や干満部の腐食進行防止を目的とした防食工の両方を同時に達成できる工法の開発が求められている。このような状況の中で、筆者らは、炭素鋼鋼管の外側にステンレス鋼管を配置した2重鋼管の間を、高流動のゴムラテックスモルタルを充填して一体化させた合成柱の検討を行っている。このような合成柱の基本性能を把握するため、ステンレス鋼管、ステンレス鋼管コンクリート合成柱、およびステンレスと鋼の2重鋼管にゴムラテックスモルタルを充填した合成柱等について、軸圧縮実験による強度特性や破壊モードを把握するとともに、充填コンクリートの拘束効果を考慮した計算結果との比較考察を行った。

ステンレス鋼管と炭素鋼管の2重鋼管合成柱の実験研究は見当たらず、2重鋼管部の充填に高流動ゴムラテックスモルタルを用いたことにも新規性がある。

Key Words : *stainless steel, SBR latex mortar, concrete filled tube, confined effect, Repair*

1. 概要

港湾構造物にはコンクリート、鋼材、もしくは石材などが使われていたが、昭和30年代頃から港湾の栈橋や護岸の鋼管杭や矢板等では、鋼材が主流の材料となっている。その理由は高強度材質の均一性、施工の簡易性、低価格などである。建設後長期間経過した海洋環境下の鋼管柱では干満帯や飛沫部を中心に腐食が著しく進んでいるのが確認されており、機能の保持や安全面の観点から問題視されている。既に栈橋の上部が大きく沈下した施設などでは、施設を取り壊した後に再建設が行われている。しかし、現施設の利用状況や将来の港湾施設計画、再建の費用等の周辺状況を勘案した上で、これらの補

修・補強を行うことにより延命化できる施設も多い。

近年、2相ステンレス鋼の開発が進み、ステンレス鋼の耐食性と強度が向上している状況にある¹⁾。そのような状況での補修・補強に関する新たな方法として、ステンレス鋼とポリマーセメントモルタルを用いた方法の検討を行うこととした。ステンレス鋼は耐食性に優れており、港湾の腐食環境でも十分な機能が期待できる。ポリマーセメントモルタルの一種であるゴムラテックスモルタルは、鋼材に対する接着力もあり、収縮も少ない材料である³⁾。したがって、2重鋼管合成柱の鋼管相互間の充填に適した材料といえる。これらの材料を使い2重鋼管合成柱について、基本的な性能が発揮されるのか圧縮試験により検証を行うものである⁴⁾。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

ステンレス鋼管を用いた合成柱供試体を製作する。今回の実験では2種類の2相ステンレス鋼を用いることとした。古くから橋梁の2次部材や化粧部材に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 と同等の耐食性を有する SUS821L1 と、それよりも耐食性に優れた SUS329J3L 相当の S32205(ASTM 規格)を合成柱外側鋼管に適用して供試体を製作した。これらのステンレス鋼の化学成分を表-1 に示す。また、2重鋼管合成柱のケースにおいては、内側に既設鋼管柱を想定して炭素鋼 STK400 の鋼管を用いた。これらの材料の機械的性質を表-2 に示す。

実験に用いた供試体の材料パラメータを表-3 に示す。供試体 1A～1D と 2A～2D ではステンレス鋼の鋼種を上述の2種類としている。ステンレス鋼管の中にコンクリートを充填した供試体、ゴムラテックスモルタルと鋼管(STK400)を用いた供試体など、全8体で比較を行う。

表-1 ステンレス鋼の化学成分

規格	化学成分値 (wt%)							
	C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo
SUS821L1	0.016	0.42	3.22	0.024	1.03	2.15	21.16	0.04
S32205	0.015	0.53	1.81	0.026	0.14	5.78	22.71	3.08

表-2 ステンレス鋼、炭素鋼の機械的性質

ステンレス鋼規格	0.2%耐力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	伸び %
SUS821L1	555	774	32
S32205	619	831	28
炭素鋼規格	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	伸び %
STK400	391	466	37

表-3 材料別供試体パラメータ

供試体	外側鋼管 ステンレス鋼	内側鋼管 STK400	ゴムラテック スモルタル	普通コン クリート
1A	SUS821L1			
1B				○
1C		○	○	
1D		○	○	○
2A	S32205			
2B				○
2C		○	○	
2D		○	○	○

詳しくは図-1 の供試体断面構造パラメータ TYPE-A～TYPE-D に示す通りである。TYPE-A はステンレス鋼単体、TYPE-B はステンレス鋼管と普通コンクリートの合成柱、TYPE-C、TYPE-D は外側がステンレス鋼で内側が炭素鋼の2重鋼管合成柱であり、相互の鋼管のすき間に高流動ゴムラテックスモルタルを施工した(図-2 参照)。TYPE-D はさらに内側炭素鋼鋼管内部に普通コンクリートを打設した。

高流動ゴムラテックスモルタルおよび普通コンクリートの圧縮強度を表-4 に示す。ゴムラテックスモルタルは 50mmφ×100mm のテストピースを、早強タイプの普通コンクリートは 100mmφ×200mm のテストピースを、

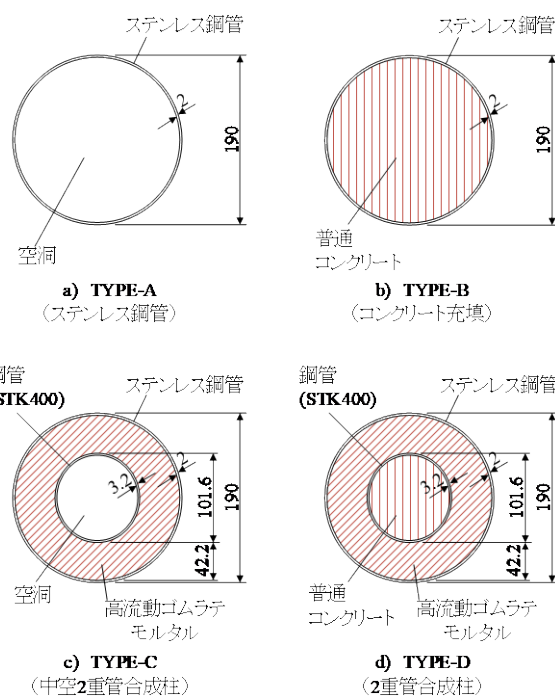


図-1 供試体断面構造パラメータ



図-2 高流動ゴムラテックスモルタル施工状況

それぞれ6本採取し、合成柱供試体載荷実験開始日（材齢6日）と実験終了日（材齢9日）にそれぞれ3体の圧縮試験を行った。後述の耐荷力評価におけるこれらの材料強度は、両者の平均値を用いた。

供試体の高さはすべて600mm（外側ステンレス鋼管の約3倍）とし、内側鋼管の位置を保持するために専用のスペーサーを用いた。

2.2 載荷方法

載荷試験は基礎的研究としての位置づけであるので、供試体の中心部を圧縮する実験を行った。図-3に示す通り、載荷版を用いて3,000kN万能試験機で載荷した。本実験では、すべての供試体の上部と下部100mmにCFRPシートを貼付けて補強し、載荷初期段階における端部の局所的な破壊を防止した。実験は荷重を単調増加させ、最大圧縮強度（終局荷重）を超え荷重が減少するまで載荷を行った（図-4参照）。

2.3 測定位置

(1) ひずみ測定

載荷中の応力性状等を確認するために、ひずみゲージ（1軸、2軸）を配置した。供試体高さは600mmであり、上端から50mmを1段目、170mmを2段目、中央の300mmを3段目として、図-5(a)に示すような5段配置とした。1段目はCFRPシートの上からゲージを貼付けている。供試体の側面を90°ずつN、E、S、Wの4等分点にひずみゲ

ージを配置した。中央部の2～4段目は2軸ゲージを供試体の軸方向と水平方向に配置した。3段目の中央については更に細かくデータ取得するため、8等分点のNE、SE、SW、NWに供試体の軸方向に1軸ゲージを貼付けた。

(2) 変位測定

載荷の際にデータ取得のために変位計を取付けた。上下の載荷版間の鉛直変位をN、E、S、Wの4等分点において計測した。また図-5(b)に示すように供試体の面外変位については、上端から175mmを1段目、300mmを2段目として、図-6のように供試体の側面NE、SE、SW、NWの4等分点で中央3段を測定した。

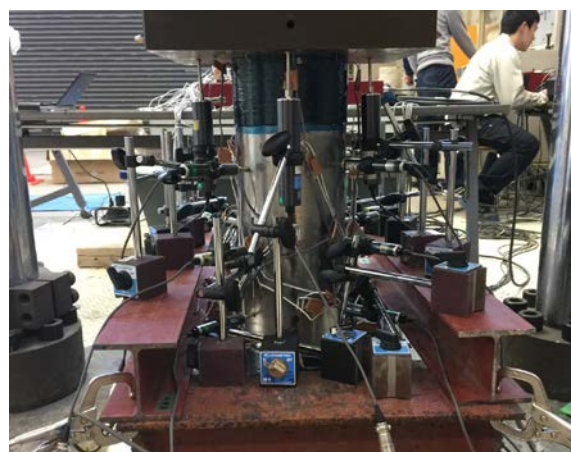


図-4 載荷試験状況

表-4 ゴムラテックスモルタル、普通コンクリートの圧縮強度

種類	実験開始日 (材令6日) N/mm ²	実験終了日 (材令9日) N/mm ²	平均値 N/mm ²
高流動ゴムラテックス モルタル	40.0	36.2	38.1
普通コンクリート 早強タイプ	26.9	28.1	27.5

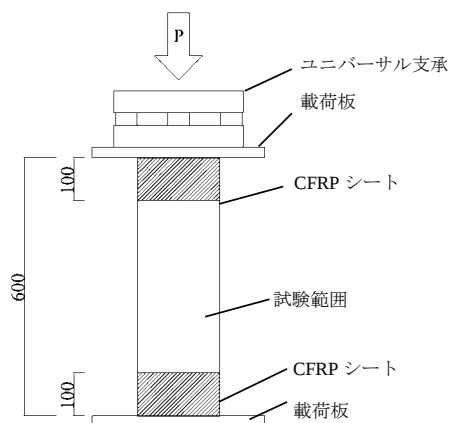
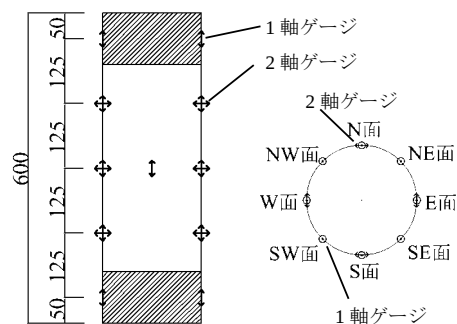
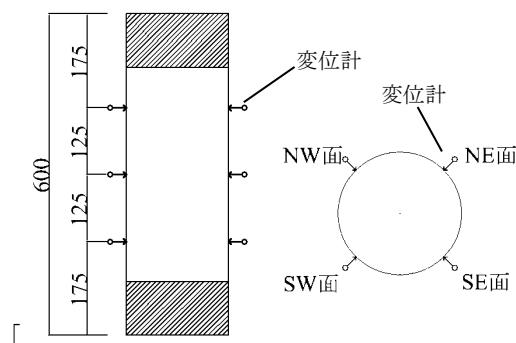


図-3 載荷要領



(a) ひずみ測定



(b) 変位測定

図-5 ひずみ、変位測定位置

3. 実験結果と考察

3.1 変位とひずみ

(1) 変位挙動

図-6にTYPE-1, 2の荷重と鉛直変位（4点平均）の曲線を示す。ステンレス鋼管単独のTYPE-1A, 2Aは700kN程度荷重した際に5mm程度の鉛直変位で局部座屈による破壊に至っている。

一方、ステンレス鋼管合成柱であるTYPE-1B, 2B, 中空2重鋼管合成柱であるTYPE-1C, 2C, 充填2重鋼管合成柱であるTYPE-1D, 2Dは、最大荷重が約1,800kN以上あり、鉛直変位が25mmに達しても15%程度以下の耐力低下であり、靱性が高いことがわかった。中空2重鋼管合成柱であるTYPE-1C, 2Cはステンレス鋼管合成柱であるTYPE-1B, 2Bとほぼ同等の終局強度(最大荷重)であり、変形性能に大差はない。

また、TYPE-1とTYPE-2を比較すると、元々のステンレス鋼の耐力や引張強度に差があるので、TYPE-2の方がTYPE-1より若干高い終局強度を持つが、変形挙動に著しい差異は見られない。

(2) ひずみ挙動

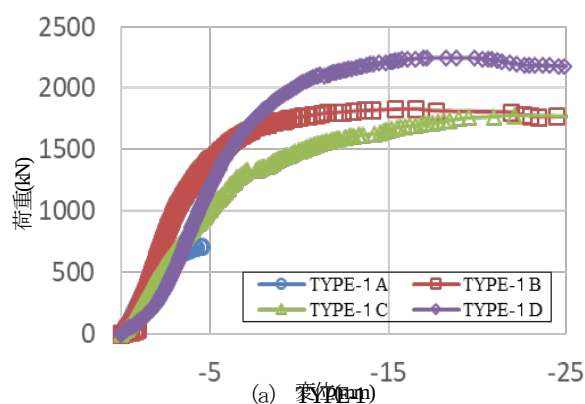
図-7にTYPE-1, 2の荷重と3段目の鉛直方向ひずみ（4点平均）の曲線を示す。ステンレス鋼管単独のTYPE-1A,

2Aは700kN程度荷重した際に6,000 μ 程度のひずみが発生していることがわかる。

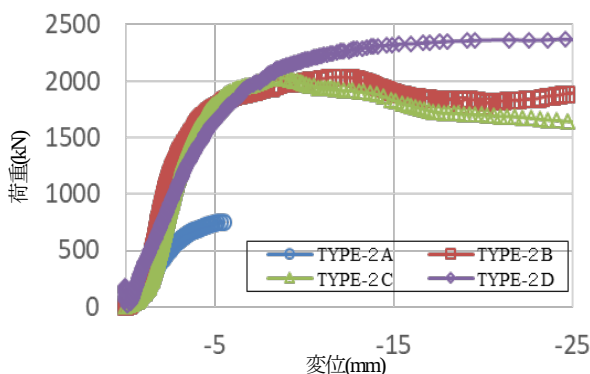
ステンレス鋼管合成柱であるTYPE-1B, 2Bの鉛直方向ひずみ挙動は、中空2重鋼管合成柱であるTYPE-1C, 2Cと同程度であり大差はない。充填2重鋼管合成柱であるTYPE-1D, 2Dは荷重が2,000kN以上荷重したときに6,000 μ に達しており、最も軸ひずみに対する抵抗が大きいことがわかる。

ひずみ挙動の細部を確認すると、ひずみ挙動が荷重増分に対して単調増加していない部分に気づく。TYPE-1Cは500kN程度で、TYPE-1Dは900kN程度で、またTYPE-2Dは750kN程度で、荷重増加に対して鉛直ひずみがほとんど増加していない。これらの事象を詳細に確認するため、ひずみ測定位置である3段目の個々の鉛直ひずみ挙動を確認したところ、それぞれが図-7に示した平均ひずみと同様の挙動をしていることがわかった。この理由として、ひずみを測定しているステンレス鋼管が周全体で外側に膨らみ、一時的に引張のひずみ増分が生じたためと思われる。

また、TYPE-1, 2を比較すると、変位と同様にTYPE-2の方がTYPE-1よりひずみが小さく、TYPE-2B, 2CのひずみはTYPE-2Dに近い値を示していることがわかる。

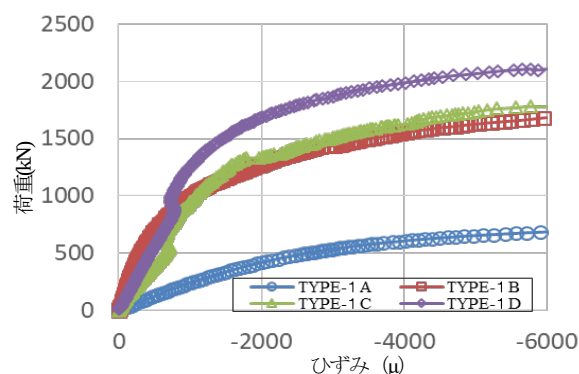


(a) TYPE-1

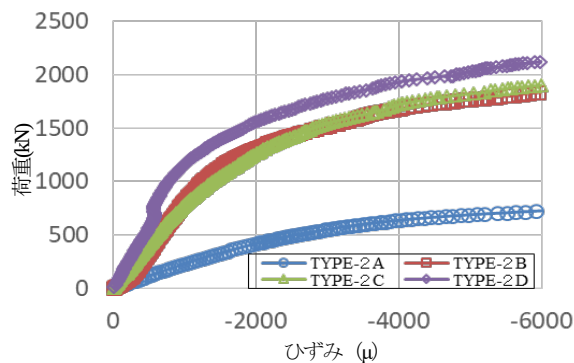


(b) TYPE-2

図-6 荷重—鉛直変位の関係



(a) TYPE-1



(b) TYPE-2

図-7 荷重—鉛直ひずみの関係

3.2 破壊形状

供試体側面の破壊形状を図-8に示す。TYPE-1, TYPE-2に大きな差がなかったため、TYPE-1の状況を示している。また断面の破壊状況については図-9に示す通りであり、ステンレス鋼単体の中空断面であるTYPE-1A, 2Aと、中空2重鋼管断面であるTYPE-1C, 2Cを示している。

これらの破壊状況より、ステンレス鋼管単体のTYPE-1A, 2Aは充填している材料もないので、ある断面（今回の実験では両者とも下の方でCFRP補強の直上部）において提灯座屈が見られ、さらに荷重を増加させると5角形の断面変形形状になった。

中空2重鋼管合成柱供試体であるTYPE-1C, 2C供試体は、ある断面（今回の実験では両者とも上の方でCFRP補強の直下部）で外側に凸状の膨らみが生じ、内側の炭素鋼管は内側にはらみ出て5角形の破壊形状となった。

鋼管内部にモルタルやコンクリートが充填されているTYPE-1B, 2B, 1D, 2D供試体の側面破壊形状は比較的似ており、図-8(a), (b)に示す通り上部で右側が凸状に、下部では左側が凸状に膨らんでいることがわかる。このことは、内部のモルタルやコンクリートが最終的にせん断破壊して、その始点と終点部が尖って外側のステンレス鋼管を外に押し出していることが考えられる⁴⁾。

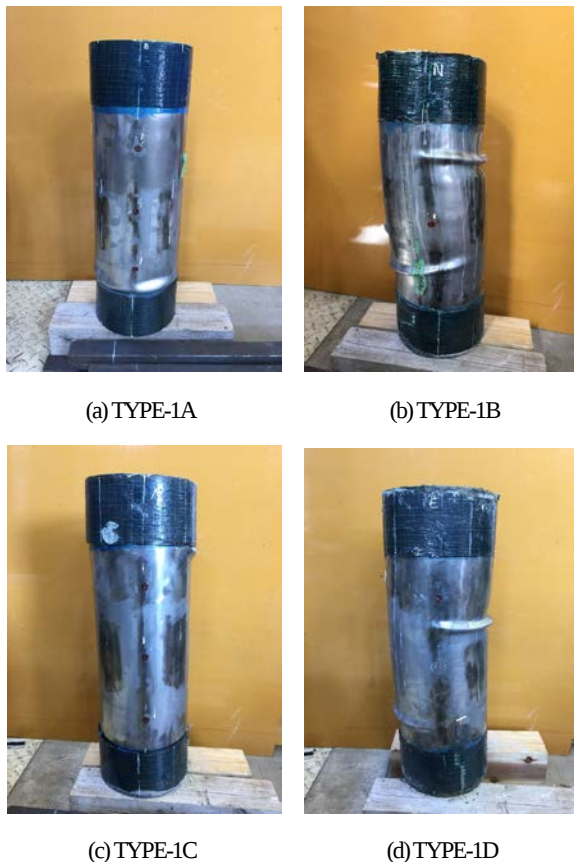


図-8 破壊状況 (TYPE-1側面)

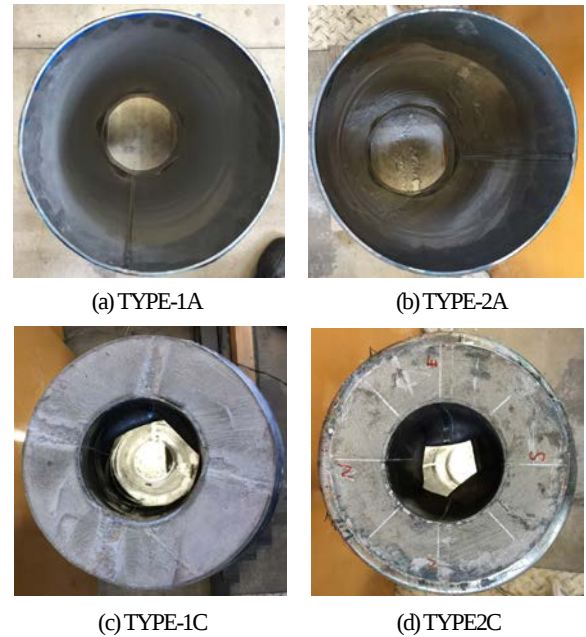


図-9 破壊状況 (断面)

4. 実験結果と考察

4.1 終局強度計算方法

軸方向圧縮力を受けるステンレス鋼管合成柱の終局強度は、ステンレス鋼管と鋼管で軸方向に拘束された（コンファインド効果を見込んだ）、コア・コンクリート強度の累加強度として次式で与えられる⁹⁾¹⁰⁾。

$$P_u = A_c \cdot \sigma_c(\epsilon_c) + A_{ss} \cdot \sigma_{ss}(\epsilon_{ss}) \quad (4.1)$$

ここに、 A_c , A_{ss} はそれぞれコンクリート断面積、ステンレス鋼管断面積を示す。また $\sigma_c(\epsilon_c)$, $\sigma_{ss}(\epsilon_{ss})$ は供試体全高に対する平均化ひずみ ϵ_c , ϵ_{ss} におけるコンクリートの平均化圧縮応力度、およびステンレス鋼管の平均化圧縮応力を表している。

式(4.1)において、コンクリートのひずみ ϵ_c とステンレス鋼管のひずみ ϵ_{ss} を用いて、等しい圧縮変位量となることから、 $\Delta = H \cdot \epsilon_c = H \cdot \epsilon_{ss}$ の関係が成立ち、軸方向圧縮荷重と圧縮変位の関係式が得られる。ここに、 H は供試体高さを示す。

$$\begin{aligned} P &= A_c \cdot \sigma_c(\epsilon_c) + A_{ss} \cdot \sigma_{ss}(\epsilon_{ss}) \\ &= A_c \cdot \sigma_c(\Delta/H) + A_{ss} \cdot \sigma_{ss}(\Delta/H) \end{aligned} \quad (4.2)$$

したがって、ステンレス鋼管合成柱の軸方向圧縮耐力 P_u は、最大ひずみ時 ($\epsilon_{cu} = \epsilon_{ssu} = \Delta_u/H$)のコンクリートおよび鋼管の応力 σ_{cu} , σ_{ssu} を用いた次式で与えられる。

$$P_u = A_c \cdot \sigma_{cu} + A_{ss} \cdot \sigma_{ssu} \quad (4.3)$$

ここに、式(4.2), (4.3)における σ_c , σ_{cu} はコンクリートのコンファインド効果を見込んだ値である。

4.2 終局強度の考察

載荷試験により求められた終局荷重を表-5にまとめて示す。同表中の計算値は上述の方法を用いたものである。同表より、終局荷重はTYPE-1Dを除き計算値より実験値の方が若干上回る値であったが、非常によい一致を示すことがわかる。

この結果により、実際の鋼管柱をステンレス鋼管で2重鋼管とする構造については、実験値に対する計算値の比が、TYPE-1C、2Cでそれぞれ89%と97%であり、TYPE-1D、2Dでは102%と99%であった。このことから、2重鋼管合成柱の耐力は、ある程度この計算で評価可能であるといえる。また、ステンレス鋼管の耐力は0.2%オフセット値を用いているが、この評価方法で比較的安全側により一致を示すことがわかった。

表-5 終局荷重の計算値と実験値の比較

供試体	ステンレス 鋼管	炭素 鋼管	ゴムラテ ックス モルタル	普通コン クリート	計算値 A (kN)	実験値 B (kN)	A/B
1A	SUS821L1				656	719	0.91
1B				○	1725	1938	0.89
1C		○	○		1732	1788	0.97
1D		○	○	○	2288	2253	1.02
2A	S32205				731	759	0.96
2B				○	1800	2067	0.87
2C		○	○		1807	2041	0.89
2D		○	○	○	2363	2377	0.99

5. まとめ

ステンレス鋼管を用いた合成柱の実験的研究は国内では見当たらなかったが、取組み始められている¹¹⁾。また、ステンレス鋼管2重鋼管合成柱については世界的にも研究事例がなく新規性がある。本研究はこれらの基礎研究として、中心圧縮を受ける場合の挙動、破壊形状および終局強度に関して、ステンレス鋼を用いた合成柱、中空2重鋼管合成柱、充填2重鋼管合成柱についての実験を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- ・ステンレスと炭素鋼からなる中空2重鋼管合成柱は、ステンレス鋼管合成柱とほぼ同等の終局強度(最大荷重)であり、変形性能に大差はない。
- ・中空2重鋼管合成柱供試体は、ある断面で外側に凸状の膨らみが生じ、内側の炭素鋼管は内側にはらみ出て5角形の破壊形状となる。
- ・鋼管内部が充填されているステンレス鋼管合成柱や2重鋼管合成柱は、上下部で反対側に膨らみが生じ、内

部のモルタルやコンクリートが最終的にせん断破壊していると考えられる。

- ・ステンレス鋼管合成柱、ステンレス鋼管と炭素鋼の2重鋼管合成柱の終局強度は、本研究で示した計算方法でよい一致を示す。

今後、ステンレス鋼を用いた2重鋼管合成柱に関する曲げと軸力を受ける場合の強度特性、および実構造を想定したステンレス鋼の溶接やゴムラテックスモルタルの施工確認等を行う必要がある。

本研究遂行に際して、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の山路徹氏、加藤絵万氏、川端雄一郎氏より、貴重なご意見を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 原田和加大：外装材向けステンレス鋼の概要，JSSC，AUTUMN，No.27，pp.3-6，2016.
- 2) 三好崇夫，宮寄靖大，奈良敬：二相系ステンレス鋼板の極限圧縮強度特性，構造工学論文集，Vol.55A，pp.80-91，2009.3.
- 3) 杉野雄亮，佐竹紳也，大垣賀津雄，小出宜央：床版補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性に関する評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，2012.7
- 4) 上田隆，嵩原安孝，栗田章光，濱本浩伸：コンクリート充填二重鋼管柱の断面耐荷重力に関する研究，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 Vol. 3，pp.55-60，1995.11
- 5) 今野克幸，上田多門，角田典史郎，大平雅司：コンクリート充填式二重鋼管柱の軸圧縮耐力について，構造工学論文集 A，Vol.42-3，pp.1123-1130，1996.3
- 6) 上中宏二郎，鬼頭宏明，園田恵一郎：二重鋼管・コンクリート合成柱の中心圧縮特性に及ぼす内径・外径比の影響，複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，Vol.5，pp.105-110，2003.11
- 7) 崔鉉俊，杉浦那征，大島義信：コンクリート充填二重鋼管柱の圧縮耐力に関する研究，第6回土木学会複合構造に関するシンポジウム，pp.56-1-6，2005.11.
- 8) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，第2版，2008.9
- 9) 秋山充良，内藤英樹，小野潔，白濱永才，松本大輔，鈴木基行：コンクリート充填スパイラル鋼管柱の一軸圧縮特性および鋼管により横拘束されるコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集E，Vol.65，No.4，pp.548-563，2009.11.
- 10) 秋山充良，洪起男，佐藤成禎，鈴木将，前田直己，鈴木基行：一軸圧縮を受ける高強度RC柱における横拘束筋の拘束効果と応力-ひずみ関係の定式化に関する実験的研究，土木学会論文集，N0.753/V-62，pp.137-151，2004.2.
- 11) 上中宏二郎：コンクリート充填ステンレス鋼管短柱の中心圧縮特性に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2167，2017.7

BASIC STUDY ON COMPRESSION STRENGTH OF CONCRETE FILLED STAINLESS STEEL COLUMNS

Kazuo OHGAKI, Ken OBATA, Yutaka KAWAI, Yasumi SHIMURA and Shinya AKAE

Prevention of corrosion and seismic strengthening are demanded to the steel tube pillar used for the pier of the harbor. We study the double steel tube column which placed a stainless steel pipe outside of this steel tube pillar. We make a suggestion the composite column that we fill high flow rubber latex mortar between these steel tubes. About a stainless steel pipe, the composite column used by stainless steel pipe with concrete, and double tubes composite column of stainless and steel, we tested middle axial compression to study the basic performance of such a composite column. We show this paper about the deformation characteristic, destruction mode and ultimate strength. The experiment study of the stainless steel pipe composite column is our country first example, and there is novelty in having used high flow rubber latex mortar for the filling of the double steel tube part.