

海外向け CFT の開発

Research and Application of CFT Construction for Overseas Market

沖 晃司 OKI Koji JFE スチール 建材センター 建材開発部建築技術室 主任部員 (課長)
難波 隆行 NANBA Takayuki JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
中川 佳 NAKAGAWA Kei JFE スチール 建材センター 建材開発部建築技術室 主任部員 (課長)

要旨

近年ベトナム等のアジア各国では、マンション、オフィス等の高層建築の建設が活況であるが、それらの建設においては、30 階程度の高層建築においても RC 造が主要工法として採用されている。そのため、当社では、同地域での鉄骨系工法普及の手段として、コンクリートと鉄骨両者の利点を併せ持つ CFT 構造に着目し、その普及活動を進めている。本論文では、ベトナムにて実施した CFT 柱の短柱圧縮試験結果を紹介するとともに、アジア各国で広く活用される Eurocode, AIJ 等の国際基準で提示されている CFT 評価式について適用性の検証結果を報告する。また合わせて、現地での活用性を示すため、柱を例題とした RC と CFT, 両構造による Eurocode での比較設計例と、現地メーカー (J-Spiral Steel Pipe) にて実施した CFT 柱ダイアフラム鉄骨の試作結果を紹介する。

Abstract:

In growing high-rise construction markets in Asia such as Vietnam and surrounding countries, the concrete construction is still dominant over the steel construction, and this market trend is also true to the high-rise buildings with around 30-stories. Considering this market trend, we had focused on Concrete Filled steel Tube (CFT) construction to promote structural steel in those markets; CFT is composed of both structural steel and concrete, and also maintains advantages of both steel and RC construction.

Compression tests of CFT short columns are carried out in Vietnam and the results are reviewed with respect to the design strength according to the international standards such as Eurocode and AIJ, which are widely recognized in those countries. To foresee the applicability in those markets, design studies by Eurocode are carried out for RC and CFT column, and mock-up test of CFT column was also carried out by J-Spiral Steel Pipe.

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (CFT: Concrete Filled Steel Tube) 構造は、**図 1** に示すように中空鋼管にコンクリートを充填した合成構造部材を用いた構法の総称で、CFT 部材は脆性的な終局挙動が弱点とされるコンクリートと、薄肉断面における局部座屈を弱点とする鋼部材、これら両素材が双方の弱点を補完し合うことにより、優れた強度、剛性、変形性能を実現する¹⁴⁾。また、この CFT 構造は、建築骨組みとしては鉄骨梁と併せて採用されることが多く、鉄骨と同等の短工期が可能となることから、多くの超高層建築で採用されている。このような構造・施工における利点や合理性により、CFT 構造は日本や北米など、鉄骨造が市場浸透した地域において、広く躯体構造として使用されている。

一方、安定した経済成長を続けるベトナムなどアジア各国、特に都市部では、先行して始められた ODA による都市インフラ整備に続き、現地および海外資本による超高層マン

ション、オフィスなどの都市施設の開発も活況にあるものの、30 階建て程度の高層建築においても、RC 造が主要な構法として選択されている。RC 造が主流とされる現状の背景としては、鉄骨材工コストの相対的なコスト高が主因として指摘されており、使用材料、素材コストにおいて両工法の間位置する CFT 構造は、同地域の超高層建築の構造・施工の合理化に寄与しうる工法として期待される。

本論文では、前述の CFT 部材の強度メリットを明確にす

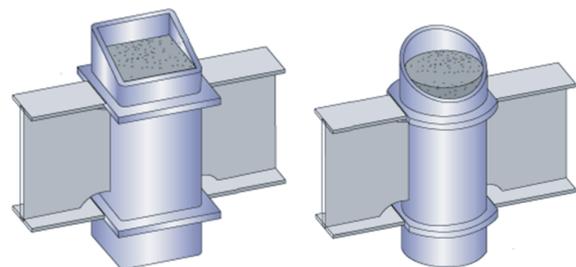


図 1 CFT 構造の概要 (鉄骨梁の例)

Fig. 1 CFT construction (H beam application)

2018 年 10 月 4 日受付

るため、以下の章において、アジア各国で活用される Eurocode, AIJ 等の国際基準に織込まれる CFT 部材の耐力評価式を紹介する。また、ベトナムにおいて現地製作し、実験を実施した CFT 部材の短柱圧縮試験の結果と、前記の CFT 耐力評価式の適用性について検証結果を報告する。

2. CFT 部材の耐力評価式

CFT 部材については、前章にてコンクリートと鋼材双方が、脆性破壊や座屈挙動などの弱点を相互に補完することで、優れた強度、剛性、変形性能を実現する工法であることを紹介した。特にコンクリートと鋼材の相互効果が顕著となるのは、脆性破壊および座屈挙動を極限状態として耐力評価式が構築される圧縮部材であり、以下に各種基準で提示される CFT の軸圧縮耐力評価式を紹介する。なお、実構造の部材設計においては、多くの場合、軸圧縮部材は全体座屈を考慮した設計が必要となるが、ここでは、材料特性と部材耐力の相関をより明瞭に示す短柱領域に着目した。

(1) 式, (2) 式, (3) 式は、日本建築学会 (AIJ)⁵⁾、アメリカ鋼構造協会 (AISC)⁶⁾ およびユーロコード (EC4)⁷⁾、各協会基準において提示される CFT 部材の軸圧縮耐力評価式である。

$$(AIJ) P_u = A_s \cdot F_y + (1 + \xi) \cdot f_c \cdot A_c \dots\dots\dots (1)$$

$$(AISC) P_u = A_s \cdot F_y + C_2 \cdot f_c \cdot (E_s / E_c) \cdot A_r + C_2 \cdot f_c \cdot A_c \dots\dots\dots (2)$$

$$(EC4) P_u = \eta_{ao} \cdot A_s \cdot F_y + F_y \cdot A_r + (1 + \eta_{co} \cdot (t/d) \cdot (F_y / f_c)) \cdot f_c \cdot A_c \dots\dots (3)$$

ここで、

- F_y CFT 鋼管の設計強度
- F_{yr} 内挿鉄筋・鉄骨の設計強度
- f_c コンクリートの設計強度
- E_s 鋼材のヤング率
- E_c コンクリートのヤング率
- A_s CFT 鋼管の断面積
- A_r 内挿鉄筋・鉄骨の断面積
- A_c 充填コンクリートの断面積
- t CFT 鋼管の板厚
- d CFT 鋼管の外径
- ξ コンファインド効果 (円形鋼管 0.27, 角形鋼管 0.0)
- C_2 形状係数 (円形鋼管 0.95, 角形鋼管 0.85)
- $\eta_{ao} = 0.25 \cdot (3 + 2 \cdot \lambda)$ [円形鋼管] EC4-eq.6.34
1.0 [角形鋼管]
- $\eta_{co} = 4.9 - 18.5 \cdot \lambda + 17 \cdot \lambda^2$ [円形鋼管] EC4-eq.6.35
1.0 [角形鋼管]
- $\lambda = \sqrt{N_{pl} / N_{cr}}$ EC4-eq.6.39

ここで、(1) 式においては第 2 項, (2) 式, (3) 式におい

ては第 3 項がコンクリートによる圧縮耐力寄与分に該当する部分である。通常、RC や SRC 部材などコンクリート系部材の圧縮耐力評価式では、各基準に共通して、圧縮耐力の総計値 $f_c \cdot A_c$ に対し強度低減値 0.85 を適用することが通則とされる。一方、CFT 部材においては、各基準で表現は異なるものの、0.85 以上の補正係数が適用され、特に円形鋼管に着目した場合、各基準の補正係数は、(AIJ)1.27, (AISC)0.95, (EC4) $1 + \eta_{co} \cdot (t/d) \cdot (F_y / f_c)$ とされ、高い強度補正値を得ることが可能である。

以上に CFT の軸圧縮耐力式を紹介したが、前述のように CFT 部材では、コンクリートを鋼管内充填とすることにより、従来のコンクリート系構造よりも高いコンクリート耐力を得ることが可能とされている。

3. CFT 柱の短柱圧縮試験

3.1 CFT 柱の試験体

現在、ベトナムにおいてはスパイラル鋼管メーカー (J-Spiral Steel Pipe) がベトナム国内外の土木インフラ案件向けに鋼管杭、鋼管矢板等のパイプ製品を製造供給しているが、近年同国では超高層を含む建築開発が活況にあり、今後、建築分野でのスパイラル需要も期待される。そのため、将来的な CFT 構造の普及に期待し、ベトナム現地での CFT 部材に関する基礎実験を計画し、実施した⁸⁾。

CFT 柱の圧縮実験では、現地で施工された CFT 部材の基礎性状を評価確認し、且つ各耐力評価式の適用性検証の目的のため、材料特性と部材耐力の相関を明瞭に示す短柱圧縮実験とし計画した。CFT 試験体のパイプのサイズは表 1 に示す 200, 250, 300 mm 以上 3 サイズとした。また、ベトナムでの CFT 構造適用を想定し、CFT 施工の実況を再現するよう、試験体製作に際してはベトナム国内の調達によるコンクリート素材 (骨材, セメントなど) を適用した。

CFT 柱の充填コンクリートは、骨材寸法、スランプフローにおいて JIS A 5308 の普通コンクリート (狙い強度 60 N/mm²) に対応する現地素材を適用し、粗骨材の最大寸法は 20 mm, 単位水量は 194 kg/m³ とした。写真 1 はスランプフロー試験の実施状況を示す。スランプフローの計測



写真 1 スランプフロー試験の状況
Photo 1 Slump flow test of concrete

値は 50-60 cm であり、CFT の充填コンクリートとして良好な流動性を確認した。

また、現地打設による充填コンクリートの強度発現を確認するため、シリンダー圧縮試験を実施した。試験体は、ASTM C39 に準じ、径 100 mm×高さ 200 mm のシリンダー試験片 7 体について、打設 42 日時点の圧縮試験を実施した。圧縮強度の試験結果 σ_c は、狙い強度 60 N/mm² に対して、表 1 に示すように、最小値 56.2~最大値 64.1 N/mm² で分布しており、良好な強度発現を確認した。



写真 2 鋼管の引張試験片

Photo 2 Tensile test specimen of CFT pipe

CFT 鋼管の母材は厚さ 6 mm の SM520B とし、外径 200, 250, 300 mm の 3 種とした。各鋼管サイズについては、ASTM E8 に準じ、各 3 片の鋼管全厚の引張試験を実施した。**写真 2** は載荷試験後の引張試験片を示す。引張試験による降伏点強度 σ_y の平均値は表 1 に示す値である。

3.2 CFT 短柱圧縮試験体と試験の概要

CFT 短柱圧縮試験体の形状と、載荷・計測状況を **図 2** に示す。試験体は、表 1 に示す全 9 体で、外径は 200, 250 および 300 mm の 3 種、直径/高さ比は 2.5 を標準とし、外径 250 mm の試験体については、直径/高さ比 2.0, 2.5, 3.0, 3 種とした。載荷に際しては、すべての試験体の上下面を研磨して平坦性を確保した。

圧縮試験の載荷装置と、試験装置に設置された試験体を **写真 3** に示す。載荷は、1500 トンの油圧ジャッキにより、100 kN/分の載荷速度で圧壊に至るまで継続した。試験での計測項目は、荷重、変位および鋼管歪とした。試験体の垂直変位は、試験体の上下面各 4 点で変位計測器 (LVDT) によって測定し、横方向変位は試験体中央 3 点において、同じく LVDT により測定した。また、鋼管表面の歪は、試験

表 1 試験結果一覧

Table 1 CFT Specimen and test results

Specimen #	D (mm)	L (mm)	σ_c (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	ϵ_y (%)	Pmax (kN)	ϵ_{mid_ave} (%)	ϵ_{mid_ave} ϵ_y
D20H501	200	500	Mean 59.98 STD 2.66 Max.64.1 Min.56.2	477	2.327	4 500	32.00	13.8
D20H502	200	500				4 380	29.54	12.7
D20H503	200	500				4 280	17.98	7.73
D25H500	250	500		470	2.293	6 300	29.11	12.7
D25H625	250	625				6 280	22.61	9.86
D25H750	250	750				6 090	11.70	5.10
D30H751	300	750		460	2.244	8 030	21.50	9.58
D30H752	300	750				8 320	18.52	8.25
D30H753	300	750				8 030	26.94	12.0

Remark) σ_c : Compressive cylinder strength, σ_y : Yielding tensile strength of steel pipe, ϵ_y : Yielding tensile strain of steel pipe
Pmax: Applied maximum force, ϵ_{mid_ave} : Averaged axial strain at mid-point of column height when Pmax loading

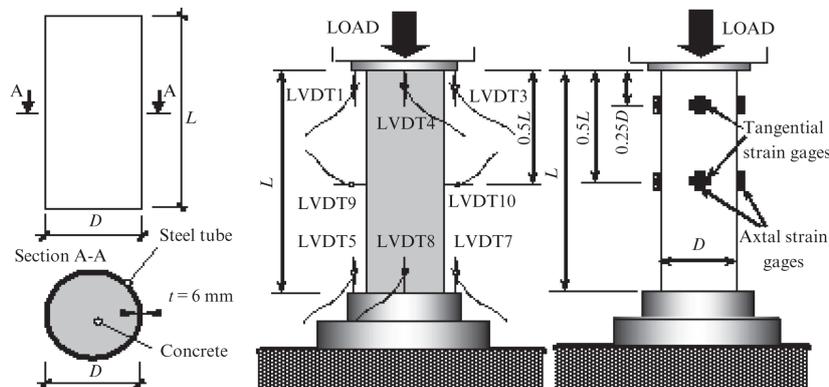


図 2 CFT 短柱圧縮試験体と計測項目

Fig. 2 CFT Test specimen and measurements in compression loading test

体中央 (0.5 L) および試験体端部 (0.25 L) の 2 断面を測定対象とし、各測定断面において 4 点の周軸方向歪を測定した (図 2)。

3.3 試験結果

表 1 に短柱圧縮試験の結果として得られた最大荷重 P_{max} 、最大荷重時の鋼管中央での軸方向歪の平均値 ϵ_{max_mid}

および最大荷重時の鋼管の塑性率 ($\epsilon_{max_mid}/\epsilon_y$) を示す。また、試験終了後の D20, D25, D30 各試験体を写真 4 に示す。写真 4 のように、各試験体では、ともに鋼管表面の局部座屈の発現が確認されており、全ての試験体で 5 を超える高い最大荷重時塑性率が認められ、安定した耐荷性能が確認された。

表 2 は、先の試験結果と式 1.1~1.3 に示す AIJ, AISC,



写真 3 短柱圧縮試験の状況

Photo 3 Compression loading test setup



写真 4 CFT 試験体 (試験終了時)

Photo 4 CFT specimen (collapsed)

表 2 実験最大荷重と各耐力推定値

Table 2 Applied maximum Load (P_{max}) and estimated strength according to AIJ, AISC & EC4.

Specimen #	D (mm)	L (mm)	P_{max} (kN)	AIJ		AISC		EC4	
				P_u	P_{max}/P_u	P_u	P_{max}/P_u	P_u	P_{max}/P_u
D20H501	200	500	4 500	3 881	1.16	3 327	1.35	4 197	1.07
D20H502	200	500	4 380	3 881	1.13	3 327	1.32	4 197	1.04
D20H503	200	500	4 280	3 881	1.10	3 327	1.29	4 197	1.02
D25H500	250	500	6 300	5 415	1.16	4 697	1.34	5 976	1.05
D25H625	250	625	6 280	5 415	1.16	4 697	1.34	5 821	1.08
D25H750	250	750	6 090	5 415	1.12	4 697	1.30	5 661	1.08
D30H751	300	750	8 030	7 146	1.12	6 262	1.28	7 639	1.05
D30H752	300	750	8 320	7 146	1.16	6 262	1.33	7 639	1.09
D30H753	300	750	8 030	7 146	1.12	6 262	1.28	7 639	1.05

EC4 の各耐力評価式によって求められる終局耐力 (P_u) を示す。ここで、各評価式による終局耐力の評価に際しては、コンクリート及び鋼材の設計強度 (f_c , F_y) を、材料試験結果 (σ_c , σ_y) と等値とし、算定した。また、表 2 では、実験値と推定値の比 (P_{max}/P_u) を併記した。表記の通り、いずれの試験体においても、上記 3 基準による耐力推定値を上回る最大荷重が確認された。なお、EC4 に関しては、鋼管幅厚比に応じた拘束効果 (η_{ao} , η_{co}) が考慮されており、他基準よりも高い耐力推定を与えているが、これについても実験値は推定値を上回っており、適正な耐力発現が確認された。

4. CFT 柱の設計比較

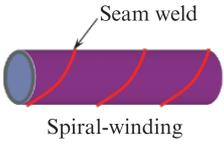
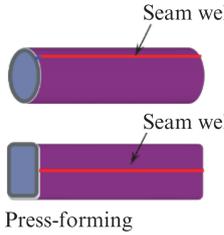
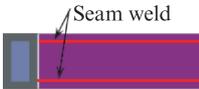
本章では、CFT 鋼管素材について、素材入手性の観点からベトナム現地に適した製品・規格について検討する。また、柱を対象として、現地で一般的な RC 造と、比較対象とする CFT 造について、設計比較の結果を紹介する。

表 3 は、CFT 鋼管素材として活用可能な中空断面の例を示す。各製品は、原板素材、外径サイズ、板厚の範囲が異なるため、用途に応じた製品選択が必要となる。一方、製品規格は、入手性と大きく関係するため、調達先メーカー等の供給規格の確認が重要である。特にベトナムにおいては、スパイラル管 (Spiral-wound Pipe)、四面 BOX は、ともに現地に製造メーカーが立地しており、素材の入手性は良好である。

以下では、前記のスパイラル管 (Spiral-wound Pipe) および四面 BOX をパイプ素材とした CFT 柱について、RC 柱との設計比較を例示する。表 4 は、外形寸法 1 600 mm × 1 600 mm の RC 柱を例題として、等価な軸圧縮耐力の確保可能な四面 BOX とスパイラル管、2 種の CFT 柱を試算した結果を示す。ここで、RC 柱、CFT 柱ともに、比較評価の一貫性のため、Eurocode を適用し、前者には EC2⁹⁾、後者には EC4 (1.3 式) を適用した。試算前提として、コンクリート強度は C30/37、鉄筋には SD345、鋼材には $F_y = 440 \text{ N/mm}^2$ 級鋼材 (EN-10025-4-S460M, SM570 など) を適

表 3 各種パイプ製品と規格・サイズ例

Table 3 Typical line-ups of hollow structural steels and those materials standards & dimensions

Type of product	Spiral-wound pipe	Press-formed pipe	Welded box
Profile and weld seam			
Material source	Hot-coil	Plate	Plate
Applicable material	JIS G 3444-STK400/490 EN 10219-S355NH etc.	MDCR0003-BCP235/325 [#] EN 10219-S355NH etc.	JIS G 3106-SM490/570 EN 10025-4-S355/S460M etc.
Thickness*	6-25 mm	12-40 mm	19-100 mm
Outer-dimension*	600-2 500 mm	400-1 000 mm	1 000-1 500 mm

* Typical values or specifications, not necessarily represents the market available products.

[#]MDCR0003-BCP235/325 is a construction material standard established by Japan Iron and Steel Federation.

表 4 RC 柱と CFT 柱の EC4 設計比較

Table 4 EC4 design study of CFT vs. RC column

	RC column	CFT column (Square)	CFT column (Circular)
Column profile (rebar)	1 600 × 1 600 mm (60 - D32/SD345)	1 080 × 1 080 mm Fire protect & finish (50 mm)	$D = 1 100 \text{ mm}$ Fire protect & finish (50 mm)
Steel profile	-	BOX-980 × 980 × 26 mm/ $F_y = 440$	ϕ -1 000 × 25 mm/ $F_y = 440$
Concrete	C30/37	C30/37	C30/37
Partial factor γ	$\gamma_c = 1.5/\gamma_s = 1.15/\gamma_k = 1.0$	→	→
Design strength	(Axial) 57 200 kN	(Axial) 60 900 kN	(Axial) 57 500 kN ※ Assuming $\lambda = 0.2$
Occupied area	2.56 m ²	1.17 m ² (Area saving 1.39 m ²) ⇒ [Rent increase] 1.39 × 15USD × 12 × 10yr ≈ \$2 500	0.95 m ² (Area saving 1.61 m ²) ⇒ [Rent increase] 1.61 × 15USD × 12 × 10yr ≈ \$3 000
Steel amount	379 kg/m	779 kg/m (+ 400 kg)	601 kg/m (+ 222 kg)

用した。また、同表の CFT 柱の外径寸法 (Column profile) については、表層 50 mm の耐火被覆層を考慮し、試算した。試算より得られた柱による支配面積あるいは断面積は、同表の Occupied area として示しており、表記の通り CFT 柱では、1/2 以下の断面積となることが分かる。

次に経済合理性の観点から、柱サイズの縮小効果について、以下に考察結果を示す。CFT 置換による柱断面の縮小効果は、換言すれば有効面積の増大であり、単位面積当たりの賃料を用いることで、経済効果の評価が可能となる。表 4 では、賃料 15 USD/m²/月、10 年の効果継続を仮定した試算例を示しており、四面 BOX では \$2 500/柱、スパイラル管では \$3 000/柱の賃料増とする試算結果が得られた。一方、CFT 化によるコスト増因子としては、鋼材量増加の寄与が大きいですが、本試算での鉄骨増加は 200~400 kg/m/本程度とされた。

以上の考察では、簡便さのため負担軸力と軸方向の圧縮耐力のみに着目したが、超高層案件では梁間スパンも大規模化する傾向にあり、このようなケースでは、大梁より伝達される付加曲げも部材断面算定の重要なファクターとなる。特に、曲げ耐力については、RC 柱から CFT 置換することで、耐力向上の効果が大きく、その結果、断面縮小効果が一層大きく、より高い CFT への置換効果が得られることとなる。

以上では RC 柱と CFT 柱について設計比較を行い、その結果について考察したが、前述のように個々案件での設計形状、部材の負担力など設計条件を確認するとともに、併せて、CFT 採用の有効部位、例えば下層階やアトリウム周辺柱などを特定・判定することで、CFT の採用メリットを明確に導くことが可能となる。

5. おわりに

構造・施工の合理性に優れた CFT 構造は、近年、超高層マンション、オフィスの開発が進むアジア各都市において、経済合理的観点から採用検討されるケースが広く認められる。特に過大な柱外形となる案件においては、採用検討されるだけでなく、実際に CFT 柱として採用されている。一方、多くの場合、設計エンジニアは CFT 構造に関する設計、製作に関する技術情報を持っておらず、工法普及の観点において、課題とされる。

至近では、当社が出資するホーチミンのスパイラル管製造メーカー J-Spiral Steel Pipe 社においては、ベトナム国内空港ターミナル施設において CFT 柱を適用提案し、同社製品が採用されている。写真 5 は、CFT 造固有の柱ダイアフラム工法について、J-Spiral Steel Pipe 社において製作された施工性検証のための試作品を示す。弊社では、アジア各国での超高層建築の構造・施工の合理化に寄与すべく、また、今後の CFT および鉄骨造の普及に期待し、更に CFT 構造や部材の提案、供給実績を重ね、活用パターンを増やして

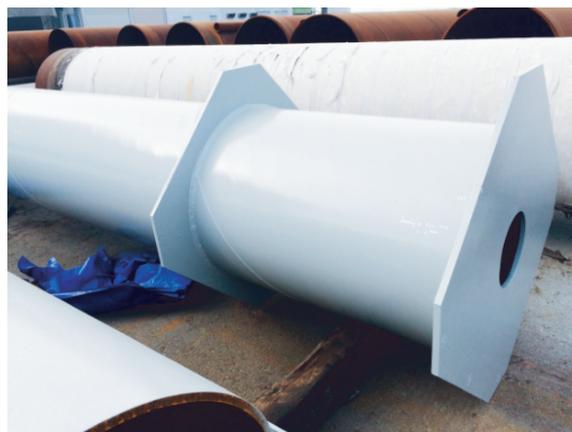


写真 5 J-Spiral Steel Pipe による CFT 鉄骨の試作製品
Photo 5 CFT Mock-up fabricated by J-Spiral Steel Pipe

いく計画である。

謝辞

CFT 柱の構造性能検証は、ベトナム国ホーチミン工科大学の Ngo-Huu Cuong 教授との共同研究として実施したものである。また、CFT 柱鉄骨の製作に際して、同国 J-Spiral Steel Pipe 社の脇屋社長にご協力を得た。ここに心より謝意を表します。

参考文献

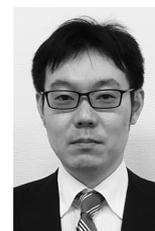
- 1) Nardin, S. D.; Al-Debs, A. L. H. C. "Axial load behaviour of concrete-filled steel tubular columns". Structures and Buildings. 2007, vol. 160, p. 13-22.
- 2) Sakino, K.; Nakahara, H.; Morino, S.; Nishiyama, I. "Behavior of Centrally Loaded Concrete Filled Steel Tube Short Columns". Journal of Structural Engineering. 2004, vol. 130, no. 2, p. 180-188.
- 3) Schneider, S. "Axially loaded concrete-filled steel tubes". Journal of Structural Engineering. 1998, vol. 124, no. 10, p. 1125-1138.
- 4) Zeghiche, J.; Chaoui, K. "An experimental behaviour of concrete filled steel tubular columns". Journal of Constructional Steel Research. 2005, vol. 61, no. 1, p. 53-66.
- 5) AIJ (2008). Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures. Architectural Institute of Japan.
- 6) AISC-LRFD (2010). ANSI/AISC 360-10: Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction.
- 7) EN 1994 (2004). Design of composite steel and concrete structures; Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.
- 8) Ng-Huu, C.; Kamura, H. et al. "Experimental Study of Circular Stub CFT Columns under Axial Compression Loads". EASEC-14. 2016.
- 9) EN 1992 (2004). Design of concrete structures; Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.



沖 晃司



難波隆行



中川 佳