

# 報告 文献調査から見たCFT柱の仕様と圧入条件に関する一考察

萩谷俊祐\*1・中田善久\*2・大塚秀三\*3・宮田敦典\*4

**要旨:**本報告は、CFT構造におけるCFT柱の仕様と圧入条件の動向を明らかにするために、日本国内の学協会において発表されたCFT柱の圧入工法に関する文献を調査し、施工の観点からCFT柱の仕様と圧入条件およびこれらの関係性について検討したものである。その結果、スランブフローの設定は、ダイアフラムの開口面積率が大きく影響しており、15%程度の開口面積率を確保できない場合も、スランブフローを大きく設定することで十分に充填が可能であることが示唆された。また、圧入高さおよび圧入速度は、コンクリートの充填性に加え、CFT柱の断面積に依存することを明らかにし、施工事例における圧入高さおよび圧入速度の傾向を示した。

**キーワード:** CFT柱, 圧入工法, 圧入条件, 文献調査, 施工事例

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管構造(以下、CFT構造とする)は、構造性能の利点から注目され始め、構造特有の力学的性質や施工方法について研究が進んだ1990年頃から急速に普及した構造である。特に、近年のCFT構造は、高層建築物に採用される事例が多く、高さ300m、設計基準強度150N/mm<sup>2</sup>を超える高層建築物に採用された事例も報告されている<sup>1)</sup>。このように、研究報告や施工実績が蓄積されていく中で、CFT構造に用いられるコンクリート充填鋼管柱(以下、CFT柱とする)の仕様や圧入条件および充填コンクリートの品質などは、年々変化してきていることが考えられる。こうした背景を踏まえ、筆者らの一部は、これまでに充填されるコンクリートの圧入前後の品質変化に重点を置き、文献調査によってこの傾向を明らかにしてきた<sup>2)</sup>。しかし、この報告は、充填されるコンクリートの品質に関する検討に留まっており、CFT柱の仕様や圧入条件が近年どのように変化してきたか不明確である。また、これまでの施工事例からCFT柱の仕様や圧入条件を調査し整理することは、今後のCFT構造の設計や施工技術の発展に向けて、有益な資料と成り得る。

そこで、本報告は、CFT構造におけるCFT柱の仕様と圧入条件の動向を明らかにするために、日本国内の学協会において発表された施工事例を取りまとめ、施工の観点からCFT柱の仕様と圧入条件およびこれらの関係性について検討した。なお、CFT柱のコンクリートの充填方法は、圧入工法と落とし込み工法があり、本報告は、連続してかつ多量にコンクリートを充填できる利点から一般的に使用される頻度の高い圧入工法を対象としている。

## 2. 文献調査の概要

### 2.1 調査対象とする文献

調査対象とした文献の内訳を表-1に示す。調査対象は、1990年から2015年までの26年間に、日本建築学会、土木学会およびコンクリート工学会において発表された、CFT柱の圧入工法に関する文献とした。この期間において対象となる文献数は、日本建築学会が108編(技術報告集5編、学術講演梗概集102編および支部研究報告集1編)、土木学会が14編(講演論文集3編、年次学術講演会講演概要集8編、支部研究報告集3編)、日本コンクリート工学会53編(年次論文集29編、雑誌コンクリート工学24編)の合計175編であった。なお、連番で発表されている場合には、それぞれを1編とカウントした。

### 2.2 CFT柱の圧入工法に関する文献の動向

文献数の推移を図-1に示す。ここでは、CFT柱の圧入工法に関する文献のうち、文献の内容からCFT柱を実施工に適用したことが明確に判断できるものを施工報告とし、それ以外を実験的検討とした。CFT柱の圧入工法に関する文献は、1990年頃から急激に増加する傾向を示している。この背景には、1985年より5年に渡り実施された旧建設

表-1 調査対象とした文献数の内訳

学協会	出典	文献数(編)	
		小計	総計
日本建築学会	構造系論文集	0	108
	技術報告集	5	
	学術講演梗概集	102	
	支部研究報告集	1	
土木学会	講演論文集	3	14
	年次学術講演会講演梗概集	8	
	支部研究報告集	3	
日本コンクリート工学会	年次論文集	29	53
	雑誌コンクリート工学	24	

\*1 日本大学 理工学部建築学科(学生会員)

\*2 日本大学 理工学部建築学科教授博士(工学)(正会員)

\*3 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科教授博士(工学)(正会員)

\*4 日本大学 理工学部建築学科助手修士(工学)(正会員)

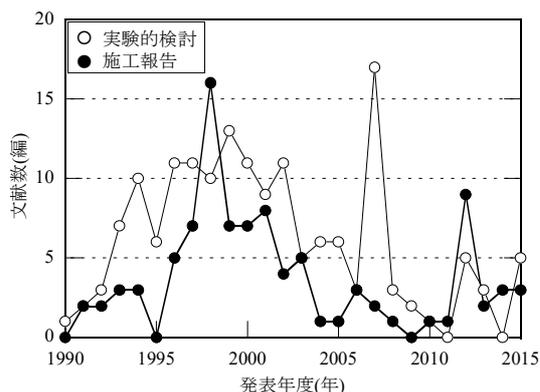


図-1 文献数の推移

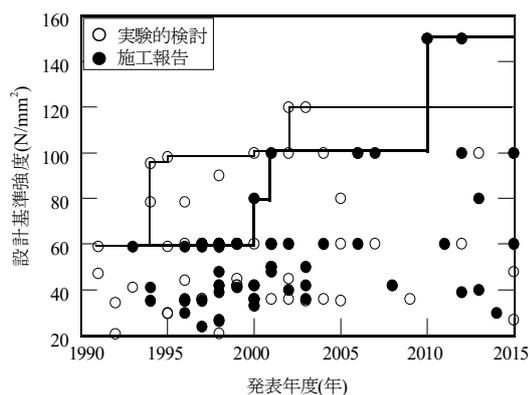


図-2 文献調査における設計基準強度の推移

省・新都市型集合住宅システム開発プロジェクトの研究開発が考えられる。さらに、施工報告に着目すると、文献数は高性能AE減水剤がJISA 6204に追加された1995年以降に増加し、1998年にピークを迎えている。このような、研究報告の蓄積が背景にあり、1997年に日本建築学会より「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」<sup>3)</sup>(以下、CFT指針とする)が刊行された。その後、文献数は、2010年頃にかけて徐々に減少する傾向であったものの、CFT柱の高層建築物への適用が注目されつつある近年において増加する傾向を示している。

文献調査における設計基準強度の推移を図-2に示す。設計基準強度の最大値は、近年大きくなる傾向を示しており、実験的検討が先行して高い設計基準強度を用いていることがわかる。また、施工報告の設計基準強度は、前述した高性能AE減水剤がJISA 6204に追加された1995年以降に設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>程度の報告が増加し、2000年に80～100N/mm<sup>2</sup>、近年は150N/mm<sup>2</sup>程度まで報告されている。このことから、高層建築物の需要拡大により、積極的にCFT構造を取り入れようとする動向が読み取れる。

### 2.3 対象とする文献

CFT構造について、これまでに多くの研究報告や施工実績が蓄積されており、また、2002年5月に制定された国土交通省告示第464号<sup>4)</sup>により、大臣認定を取得せずに建築物への適用が可能となったことから、CFT造が建築物に適用され始めて以降、告示制定<sup>4)</sup>により材料の指定や規定値が定められたことによって、多種多様な建築物に用いられる事例が増加したと考えられる。そこで、本調査は、施工事例が大きく変化したと考えられる2002年の告示制定の前後(1990-2002年、2003-2015年)で区分し、CFT柱の仕様と圧入条件の動向について検討することとした。なお、2003年以降に発表された文献においても、文献の内容から、着工時期が告示の制定前と判断できるものについては、告示の制定前(1990-2002年)として扱った。その結果、対象となる施工報告の文献は、1990-2002年が46編、2003-

2015年が19編となった。

## 3. 結果および考察

### 3.1 CFT柱の仕様

1990-2002年におけるCFT柱の仕様を図-3に示し、2003-2015年におけるCFT柱の仕様を図-4に示す。なお、図中の割合はデータの件数を分母として算出しており、同一の文献で、複数のCFT柱の仕様を検討しているものはそれぞれ分けてカウントし、同一の調査対象を連番で発表しているものは、データの重複を避けるため1件としてカウントしている。

#### (1) CFT柱の形状

CFT柱の形状は、いずれの年代区分においても角形鋼管が円形鋼管に比べて多く、2002年以前が66.3%であり、2003年以降が77.4%であった。また、僅かではあるが、近年のCFT柱は、円形鋼管の使用が減ってきていることがわかる。これは、鋼管の加工・施工の観点から、円形鋼管の方が角形鋼管に比べて扱いが難しい<sup>5)</sup>ためと考えられる。

#### (2) ダイアフラム

ダイアフラムは、CFT柱の形状によって使い分けがされている事例が多かったため、ここでは鋼管の種類で区分し、図示した。円形鋼管のダイアフラムは、2002年以前に内ダイアフラムが多かったのに対して、2003年以降は外ダイアフラムが多く、近年の円形鋼管は、外ダイアフラムを用いる事例が増えている傾向にあった。これは、円形鋼管内にダイアフラムを設けることが困難であるためと考えられる。一方、角形鋼管は、いずれの年代区分においても、内ダイアフラムが多く、外ダイアフラムは僅かであった。外ダイアフラムは、内ダイアフラムを適用したときに起こり得るダイアフラム下部に空隙が発生するなどの危険性がないため、コンクリートの充填が容易である反面、施工時に補強材と仕上げ材とが干渉するなどが問題となるため、外ダイアフラムの使用が少ないと考えられる。

#### (3) 断面積

検討項目	データ割合(%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
CFT柱の形状 [n=95]	角形鋼管 : 66.3%					円形鋼管 : 33.7%				
ダイアフラム	外ダイアフラム : 16.7%									
	内ダイアフラム : 83.3%									
角形鋼管 [n=60]	外ダイアフラム : 8.3%									
	内ダイアフラム : 91.7%									
断面積 ( $\times 10^5 \text{mm}^2$ ) [n=95]	7.0以上10.0未満 : 8.4%									
	3.0未満 : 28.4%			3.0以上5.0未満 : 43.1%				10.0以上 : 1.1%		
	5.0以上7.0未満 : 20.0%									
	10.0以上 : 1.1%									
開口面積率(%) [n=71]	5未満 : 4.2%									
	5以上10未満 : 36.6%			10以上15未満 : 35.3%				20以上 : 19.7%		
	15以上 : 4.2%									
板厚 (mm) [n=28]	20.0以上30.0未満 : 15.8%									
	20.0未満 : 44.7%			30.0以上40.0未満 : 34.2%				40.0以上 : 5.3%		
	40.0以上 : 5.3%									

図-3 1990年-2002年におけるCFT柱の仕様

検討項目	データ割合(%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
CFT柱の形状 [n=31]	角形鋼管 : 77.4%					円形鋼管 : 22.6%				
ダイアフラム	内ダイアフラム : 40.0%									
	外ダイアフラム : 60.0%									
角形鋼管 [n=20]	外ダイアフラム : 5.0%									
	内ダイアフラム : 95.0%									
断面積 ( $\times 10^5 \text{mm}^2$ ) [n=29]	3.0未満 : 10.4%									
	3.0以上5.0未満 : 31.0%			5.0以上7.0未満 : 6.9%				10.0以上 : 27.6%		
	7.0以上10.0未満 : 24.1%									
	10.0以上 : 27.6%									
開口面積率(%) [n=14]	15以上20未満 : 28.6%									
	10以上15未満 : 64.3%			20以上 : 7.1%						
	20以上 : 7.1%									
板厚 (mm) [n=6]	20.0未満 : 16.7%									
	20.0以上30.0未満 : 16.7%			30.0以上40.0未満 : 16.7%				40.0以上 : 49.1%		
	40.0以上 : 49.1%									

図-4 2003年-2015年におけるCFT柱の仕様

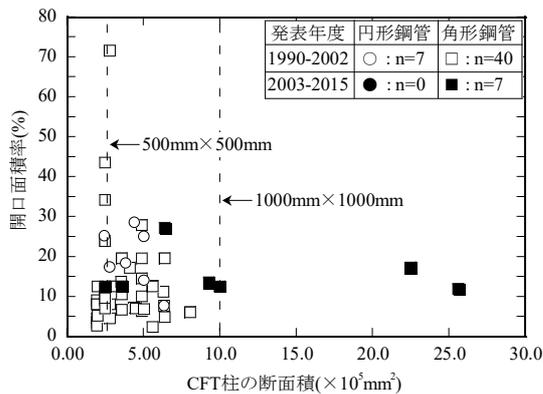


図-5 CFT柱の断面積と開口面積率の関係

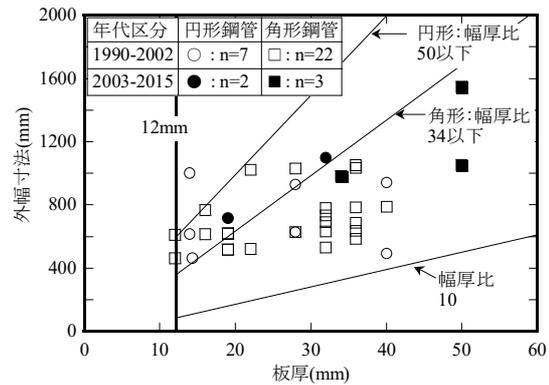


図-6 板厚と外幅寸法の関係

CFT柱の断面積は、いずれの年代区分においても、 $3.0 \sim 5.0 \times 10^5 \text{mm}^2$  (550~700mm角程度)が多かった。また、全体的な傾向を見ると、2003年以降は、2002年以前に比べて大断面のCFT柱を使用する割合が高く、 $10.0 \times 10^5 \text{mm}^2$ 以上(1000mm角以上)の施工事例が30%程度を占めた。これより、近年は大きい断面積を有するCFT柱の施工事例が増えていることがわかる。

#### (4) ダイアフラムの開口面積率

ダイアフラムの開口面積率は、2002年以前が10%未満が約40%を占めていたものの、2003年以降は10%未満の施工事例がなく、約90%が開口面積率10%~20%であった。圧入工法において、一般的に、ダイアフラムの開口面積率が大きいほどコンクリートの充填性が良好であるため、近年はコンクリートの充填性を考慮してダイアフラムの開口面積率を設定している事例が増えているものと考えられる。また、新都市ハウジング「コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説」<sup>9)</sup>においてダイアフラムの開

口面積率15%以上と記述されたことが、開口面積率の変化に影響しているものと考えられる。

#### (5) 鋼管の板厚

鋼管の板厚は、2002年以前に20mm未満が44.7%と最も多かったのに対して、2003年以降は40mm以上が49.1%と最も多く、厚い鋼管を使用する割合が増えていることがわかる。鋼管の板厚は、コンクリートを充填した際にひずみおよび変形量が制限値以下となるよう定めるため<sup>9)</sup>、前述した、大きい断面積を有するCFT柱の施工事例が増えていることが厚い鋼管を使用している要因と考えられる。

#### (6) CFT柱の断面積と開口面積率の関係

CFT柱の断面積と開口面積率の関係を図-5に示す。CFT柱の断面積と開口面積率の関係は、施工事例ごとに各種条件が異なるため、全体的な相関性は見られないものの、開口面積率は、CFT柱の断面積が小さいときに比較的大きい事例がいくつか見受けられる。これは、同一の開口面積率であっても、CFT柱の断面積が小さいほどダイアフラム

検討項目	データ割合 (%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
スランプフロー (cm) [n=91]	50未満: 2.1% 50以上60未満: 29.7% 60: 25.4% 60超: 42.8%									
圧入高さ (m) [n=92]	20.0以上30.0未満: 14.1% 10.0未満: 21.7% 30.0以上40.0未満: 24.0% 40.0以上: 22.8% 10.0以上20.0未満: 17.4%									
圧入速度 (m/min) [n=82]	0.5未満: 4.9% 1.0: 76.8% 0.5以上1.0未満: 7.3% 1.0超: 11.0%									

図-7 1990年-2002年における圧入条件

検討項目	データ割合 (%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
スランプフロー (cm) [n=27]	60: 25.9% 60超: 74.1%									
圧入高さ (m) [n=25]	30.0以上40.0未満: 8.0% 10.0未満: 32.0% 10.0以上20.0未満: 20.0% 20.0以上30.0未満: 28.0% 40.0以上: 10.0%									
圧入速度 (m/min) [n=16]	0.5未満: 12.5% 0.5以上1.0未満: 25.0% 1.0: 43.7% 1.0超: 18.8%									

図-8 2003年-2015年における圧入条件

検討項目	データ割合 (%)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
スランプフロー 50cm未満 [n=17]	開口面積率 10%以上15%未満: 64.7% 15%以上: 35.3%									
スランプフロー 50cm以上60cm未満 [n=31]	開口面積率 5%以上10%未満: 9.7% 開口面積率 10%以上15%未満: 54.8% 開口面積率 15%以上: 35.5%									
スランプフロー 60cm以上 [n=96]	開口面積率 5%以上10%未満: 27.1% 開口面積率 10%以上15%未満: 47.9% 開口面積率 5%未満: 9.4% 開口面積率 15%以上: 15.6%									

図-9 スランプフローの区分とダイアフラム開口面積率の関係

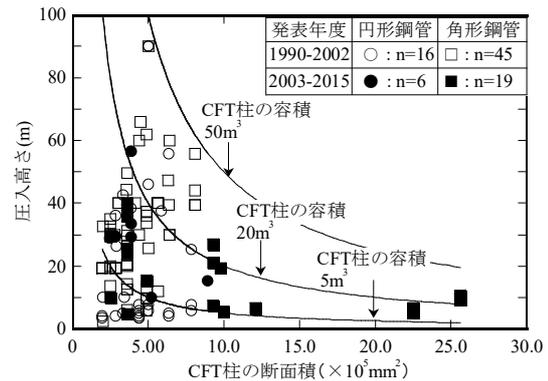


図-10 CFT柱の断面積と圧入高さの関係

の開口面積は小さくなるため、コンクリートの充填性を考慮して開口面積率を大きく設定したものと考えられる。しかし、CFT柱の断面積と開口面積率の関係は、年代区分や鋼管の形状ごとに明確な傾向は見られなかった。

### (7) 板厚と外幅寸法の関係

板厚と外幅寸法の関係を図-6に示す。告示<sup>4)</sup>において、板厚は12mm以上かつ板厚に対する外幅寸法の比(以下、幅厚比とする)は円形鋼管が50以下、角形鋼管が34以下と規定されているため、図中には告示<sup>4)</sup>の規定値を合わせて示している。板厚は、外幅寸法が大きくなるほど概ね厚くなる傾向を示し、幅厚比は、概ね告示<sup>4)</sup>の規定値(50または34)から10の範囲であった。

## 3.2 圧入条件

1990年-2002年における圧入条件を図-7に示し、2003年-2015年における圧入条件を図-8に示す。

### (1) スランプフロー

ここで扱うスランプフローは、荷卸し地点における目標値としている。また、施工事例の中には、コンクリートをスランプで管理しているものも見られたが、いずれもスランプが21cm以下であったため、ここでは、スランプフロー50cm未満に含めることとした。

スランプフローは、いずれの年代区分においても60cm以上がほとんどであり、特に、2003年以降のスランプフローは、2002年以前に比べて60cmを超える事例が増えて

おり74.1%を占めた。これより、近年は、コンクリートの充填性を考慮して、流動性の高いコンクリートを使用するために大臣認定を取得していることが示唆された。

### (2) 圧入高さ

圧入高さは、施工事例ごとに各種条件が異なるため、年代区分ごとに明確な傾向を示さなかった。告示<sup>4)</sup>において、コンクリートの一度の充填高さ(圧入高さ)は原則8mを超えないことが規定されているが、それを超える施工事例は多くあり、また、圧入高さが最大で90m程度のもであった。

### (3) 圧入速度

圧入速度については、圧入速度は、いずれの年代区分においても、1.0m/minが最も多く、これは、日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」<sup>6)</sup>において、コンクリートの圧入速度の目安を1.0m/minとする記述が影響していると考えられる。また、2003年以降の圧入速度は、1.0m/min未満が40%程度と2002年以前の10%程度に比べて多い割合であった。圧入速度が早いと、鋼管内部に空気だまりができやすく、特に、鋼管内でのコンクリートの閉塞や材料分離を避けるという観点から遅いほうがよい<sup>3)</sup>とされている。このようなことから、近年は、コンクリートの充填性を考慮する傾向にあることが読み取れる。

### (4) スランプフローの区分と開口面積率の関係

スランプフローの区分とダイアフラム開口面積率の関係

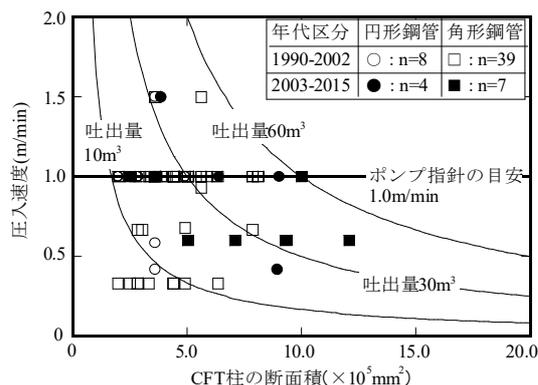


図-11 CFT柱の断面積と圧入速度の関係

を図-9に示す。開口面積率は、スランプフローの区分が大きいほど小さく設定している事例が多くなる傾向を示した。これは、前述したように、コンクリートのスランプフローが大きいかほど、すなわち流動性が高いほど充填性が優れていることが影響していると考えられる。言い換えれば、CFT柱の必要耐力を確保する上で15%程度の開口面積率を確保できない場合も、ダイアフラムの板厚を厚くすることや外ダイアフラムを設けるなどの対応をとらずに、スランプフローを大きく設定することで十分に充填が可能であると考えられる。

#### (5) CFT柱の断面積と圧入高さの関係

CFT柱の断面積と圧入高さの関係を図-10に示す。CFT柱の断面積と圧入高さの関係は、CFT柱の断面積と圧入高さの積、すなわちCFT柱の容積が50m<sup>3</sup>以下の範囲で分布しており、圧入速度や日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」<sup>7)</sup>におけるコンクリートの練混ぜから打込み終了までの時間の限度を踏まえると、1本あたり50m<sup>3</sup>の容積を有するCFT柱は極めて大きく、施工事例から見てもCFT柱1本あたりの容積は、この値が上限値と考えられる。また、2003年以降は、CFT柱の容積が5～20m<sup>3</sup>の範囲で多く分布している傾向であった。

#### (6) CFT柱の断面積と圧入速度の関係

CFT柱の断面積と圧入速度の関係を図-11に示す。CFT柱の断面積と圧入速度の関係は、鋼管内にコンクリートが充填される速度、すなわちコンクリートの吐出量が10～60m<sup>3</sup>/hの範囲に多く分布する傾向を示した。コンクリートポンプ工法において、吐出量が大きくなると圧送負荷が大きくなり、また、吐出量を著しく小さくすると極端に機械効率が小さくなることがあるため、あまり実用的ではなく、上記の範囲の施工事例が多くなったと考えられる。これらのことから、圧入速度はコンクリートの充填性に加え、吐出量も考慮する必要があると考えられる。なお、この吐出量の値は、CFT柱の断面積と圧入速度から算出した

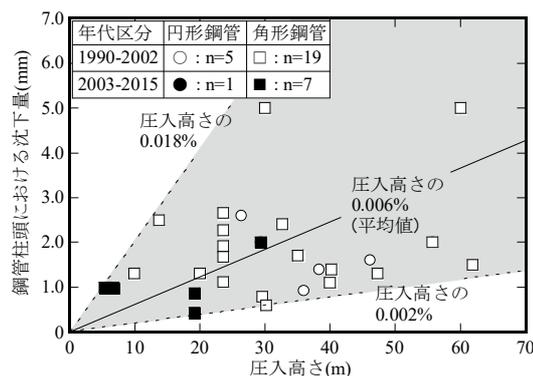


図-12 圧入高さで鋼管柱頭における沈下量の関係

値であり、圧入前の準備や段取り替えなどの時間を含まない値であるため、JASS 5<sup>7)</sup>などで通常使用される吐出量と意味合いが異なる。

#### (7) 圧入高さで鋼管柱頭における沈下量の関係

圧入高さで鋼管柱頭における沈下量の関係を図-12に示す。鋼管柱頭における沈下量は、コンクリートの調査や使用材料などによって変化することが考えられるものの、圧入高さが高くなると大きくなる傾向を示し、沈下量は圧入高さの0.002～0.018%の範囲であった。これより、圧入高さが著しく高くなる時は、充填するコンクリートの沈下量を小さくするために、セメント量を多くするなどの工夫が必要であると考えられる。

## 4. まとめ

本報告は、CFT構造におけるCFT柱の仕様と圧入条件の動向を明らかにするために、過去26年間の間に発表されたCFT柱の圧入工法に関する文献を調査し、施工の観点からCFT柱の仕様と圧入条件およびこれらの関係性について検討したものである。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) CFT柱の形状は、角形鋼管が使用される事例が増えてきており、そのほとんどが内ダイアフラムであった。
- (2) スランプフローの設定は、ダイアフラムの開口面積率が大きく影響しており、15%程度の開口面積率を確保できない場合も、スランプフローを大きく設定することで十分に充填が可能であることが示唆された。
- (3) 圧入高さおよび圧入速度がコンクリートの充填性に加え、CFT柱の断面積に依存することを明らかにし、施工事例の傾向を示した。
- (4) 鋼管柱頭におけるコンクリートの沈下量は、圧入高さが高くなると大きくなる傾向を示し、圧入高さの0.006%程度であった。

本報告は、日本国内の学協会において発表された施工報告からCFT柱の仕様と圧入条件およびその関係性について

て取りまとめたものである。今後は、一般財団法人日本建築センター「ビルディングレター」などに掲載されているCFT構造の施工実績を調査し、CFT構造の更なる施工技術の向上に向けた検討をしていく予定である。

#### 謝辞

本報告では、引用させて頂いた文献が多数あるため、文献名を割愛させて頂いた。ここに、執筆者の方々に敬意を表すると共に、多数の貴重な研究成果が公表されていることに感謝する。

#### 参考文献

- 1) 青木義彦, 岩清水隆, 山田佳博, 永野浩一: Fc=150N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリートCFT柱の施工—高さ300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.683-688, 2012.8
- 2) 中田善久, 大塚秀三, 太田達見, 和美廣喜: 圧入工法によるCFT柱の充填コンクリートの品質に関する文献的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008
- 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, 2008.10
- 4) 平成14年国土交通省告示第464号: コンクリート充填鋼管造の建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件
- 5) 新都市ハウジング協会: コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説, 第2章CFT造の概要と設計・施工上の留意点, 2002.9
- 6) 日本建築学会: コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 2010.1
- 7) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2015.7