

Fc150N/mm²級超高強度コンクリートを用いた CFT 柱の落とし込み工法に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DROP METHOD OF CFT COLUMNS USING Fc150N/mm² CLASS ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETET

右田周平*¹, 端直人*², 梅本宗宏*¹, 久須美真悟*¹
Shuhei MIGITA, Naoto HASHI, Munehiro UMEMOTO and Shingo KUSUMI

We have confirmed the construction method for CFT columns using ultra-high-strength concrete exceeding Fc100 N/mm² in full-scale construction experiments. Construction experiments were also conducted using the press-in method and, in some cases, the drop-in method, but the drop-in method tended to reduce the filling performance of the lower part of the diaphragm. Therefore, to ensure top filling performance of CFT columns using ultra-high-strength concrete of Fc150N/mm² class even with the drop-in method, we conducted component experiments using small test specimens and CFT mock-up columns. The results confirmed that the diameter of the hose attached to the concrete bucket and the speed of launching have a significant effect on the filling rate at the bottom of the diaphragm. Furthermore, the filling performance was confirmed through full-scale construction experiments, and a drop-in method for CFT columns using Fc150N/mm² class ultra-high-strength concrete was established.

Keywords : Concrete filled Steel tube Columns, Ultra-high-strength Concrete, Drop method, Filling ratio under Diaphragm, Placing speed
CFT 柱, 超高強度コンクリート, 落とし込み工法, ダイアフラム下充填率, 打上がり速度

1. はじめに

コンクリート充填鋼管構造（以下 CFT 造）は、その優れた剛性・耐力・変形性能・耐火性能から、多くの大規模建築物で採用されており、近年、充填コンクリートの高強度化^{例えば1)}が進んでいる。筆者らも、設計基準強度（以下 Fc）100N/mm²を超える超高強度コンクリート CFT 造柱の実用化を目的に、実大施工実験を通して施工法を確認し、Fc150N/mm²級の超高強度コンクリートを使用した CFT 造柱の圧入工法についても実大施工実験結果を報告²⁾³⁾している。これらの実験では、落とし込み工法による実験も一部で実施しているが、充填コンクリートの強度性状は問題ないものの、ダイアフラム下部の充填率は、圧入工法に比べ落とし込み工法が低い結果となっており、コンクリートの粘性が高くなると充填性が低下する可能性が考えられた。

本研究では、Fc150N/mm²級超高強度コンクリートを使用した CFT 柱の落とし込み工法について、充填性に与える影響を確認し、ダイアフラム下部充填率を確保できる施工方法を検討するため、モルタルを使用した小型実験や模擬試験体による要素実験により充填率を確認し、実大施工実験によって施工法の妥当性を確認した。本報では、一連の実験結果について報告する。

2. モルタル実験

2.1 実験概要

Fc150N/mm²超高強度コンクリートを用いた CFT 柱について、落とし込み工法による充填性能やダイアフラム下部の気泡の動きを確

認するために、モルタルを使用した小型実験を実施した。図 1 に試験体図を示す。小型試験体はφ150mm×高さ 300mm の円柱試験体を使用し、上部にダイアフラムを模擬したアクリル製の板を取り付けた。モルタルは試験体上部から漏斗で打込み、ダイアフラムに達した後に、φ40mm の棒状バイブレーターで振動を与え、気泡の動きをビデオ撮影し観察した。なお、使用したモルタルは、後述する管理強度 157N/mm²の超高強度コンクリートから、粗骨材を抜いてモルタルとしたものである。

2.2 実験結果

モルタルはパドル型モルタルミキサーを使用し、粉体および細骨材を投入し空練りをした後、練り混ぜ水および混和剤を投入し、6 分

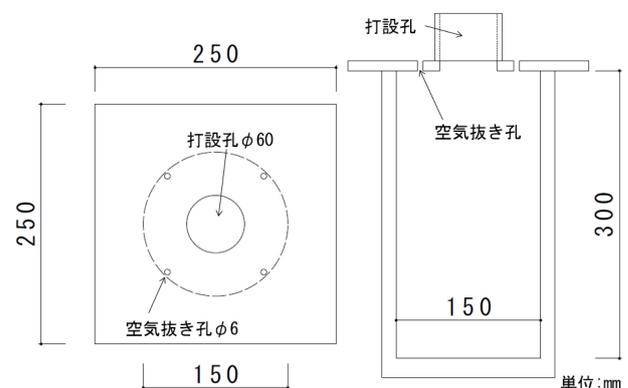


図 1 試験体概要図

*1 戸田建設株式会社技術研究所 修士（工学）

*2 戸田建設株式会社技術研究所 博士（工学）

*3 国立研究開発法人建築研究所 博士（工学）

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Building Research Institute, Dr.Eng.

攪拌, 5分静置, 1分再攪拌して製造した. 0打フロー (JIS R 5201に準拠し, フローコーンを持ち上げた直後のフロー値) は, 255mm~275mmであった. 図2にモルタルの打上がりおよび気泡の状況を示す. モルタルは, まず始めに打設孔周辺部がダイアフラムに達し, その後, 気泡は外縁部に向かって移動し, 空気抜き孔から上昇していく動きが確認された. また, 図3に示すように, バイブレーターによる振動を与えることで, 空気抜き孔から気泡が抜けていく様子が確認された. 既報⁵⁾にある通り, スランプ21cmのコンクリートを使用した CFT 柱の落とし込み工法において, バイブレーターの使用はコンクリートの充填性向上に効果的であるが, スランプフロー管理のコンクリートにおいても, 充填性向上に寄与することが分かった.

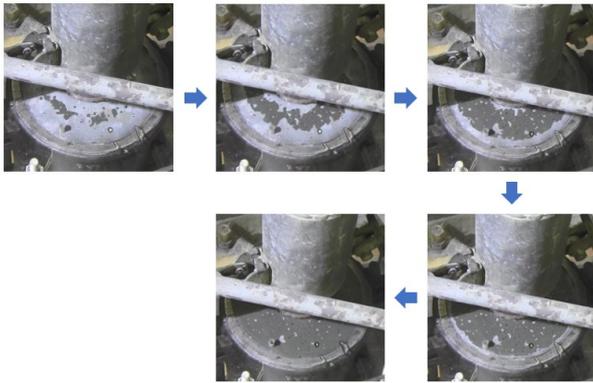


図2 モルタル打上がりおよび気泡の状況



図3 バイブレーターによる気泡の動き

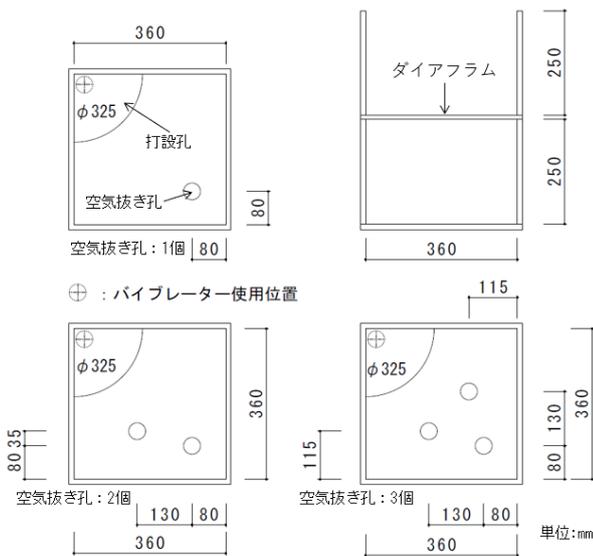


図4 試験体概要図

3. 要素実験 I

3.1 実験概要

具体的な充填率改善方法を検討するために, 図4に示すような, 柱の1/4部分を模擬した試験体による要素実験Iを実施した. 使用したコンクリートについて, 表1に使用材料を, 表2に調合を示す. コンクリートは管理強度 157N/mm^2 の超高強度コンクリートを使用した. セメントはシリカフェウムプレミックスセメントとし, 強度や流動性の改善を目的に, 混和材として半顆粒状シリカフェウムを5%内割で添加した. コンクリートの水結合材比 (W/B) は13.1%とし, 目標スランプフローは $65\pm 10\text{cm}$, 目標空気量は $2.0\pm 1.5\%$ とした. 収縮低減剤は練り混ぜ水の一部として計量した. なお, 以降の実験でも同様のコンクリートを使用している. 試験体のコンクリート打設孔は $\phi 325\text{mm}$ 相当とし, 空気抜き孔の径は $\phi 40\text{mm}$ とした. コンクリートの充填には 0.3m^3 のバケツを使用し, 底部には, 試験体サイズを考慮し, $\phi 100\text{mm}$ のホースを取り付けた. 表3に実験条件を示す. 空気抜き孔の個数やバイブレーター使用の有無を要因

表1 使用材料

セメント	シリカフェウムプレミックスセメント 密度: 3.08g/cm^3
細骨材	千葉県富津市産山砂 表乾密度: 2.62g/cm^3 , 粗粒率: 2.64g/cm^3
粗骨材	茨城県桜川産碎石 表乾密度: 2.64g/cm^3 , 実績率: 60.0%
混和材	シリカフェウム (ロシア産) 密度: 2.20g/cm^3
混和剤	高性能減水剤 (I種): ポリカルボン酸系
	収縮低減剤: ポリエーテル誘導体

表2 コンクリートの調合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 kg/m^3					
		W	C	SF	S	G	SRA
13.1	27.3	160	1160	61	298	808	10

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,
SF: シリカフェウム, SRA: 収縮低減剤

表3 実験条件

No.	バイブレーター	空気抜き孔
1	有り	2個
2	有り	1個
3	有り	3個
4	無し	2個
5	ダイアフラム直下無し	2個

表4 測定項目

フレッシュコンクリート	スランプフロー (JISA 1150) 空気量 (JISA 1128)
打込み中の測定	打上がり速度 コンクリートの充填状況 (カメラ撮影)
硬化後の測定	ダイアフラム下充填率 目標値: 90%

として実験を行った。パイプレーターは、φ40mm のものをコンクリート打設孔の中心付近に配置し、過去の実験結果⁹⁾を参考に、インバーターで周波数を半分にして使用した。充填方法はコンクリートを打込み中常時使用する場合（有り）と、ダイアフラム下 10cm 程度まで使用し、コンクリートがダイアフラムを通過する際は使用しない（ダイアフラム直下無し）2 パターンとした。測定項目を表 4 に示す。フレッシュコンクリートの試験の他、充填状況や打上がり速度、ダイアフラム下充填率（柱断面積に対する、空隙等の未充填部を除いた充填部の面積の割合）を測定した。

3.2 実験結果

表 5 に、各試験体に打ち込んだコンクリートのフレッシュ試験結果を示す。各試験体に打ち込んだコンクリートについて、いずれも目標値を満足し、また、試験体毎に大きな違いは無かった。ダイアフラム下充填率および打上がり速度を表 6 に示す。空気抜き孔の個数が同じである No.1 と No.4 を比較すると、パイプレーターを使用した No.1 は、充填率が大きく低下する結果となった。図 5 のダイアフラム下打上がり状況を見ると、充填率の高い No.4 では、コンクリートが、流出孔から外縁部に向かってダイアフラムに密着していく動きが見られた。一方、パイプレーターを使用した No.1 では、コンクリート天端が水平になり、コンクリート全体が一樣にダイアフラムに密着するような動きが見られた。パイプレーターを使用することで、コンクリート内の気泡を上昇させる効果はあったものの、空隙を外に押し出すような動きが無くなり、充填率が低下したと考

表 5 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	スランプフロー(cm)	50cm フロー到達時間(s)	空気量(%)
1	74.5	12.8	1.1
2~3	74.0	12.2	1.5
4~5	70.0	12.6	1.5

表 6 ダイアフラム下充填率・打上がり速度

No.	充填率(%)	打上がり速度(cm/min)
1	84.5	18
2	88.7	13
3	94.9	20
4	98.5	13
5	97.2	13

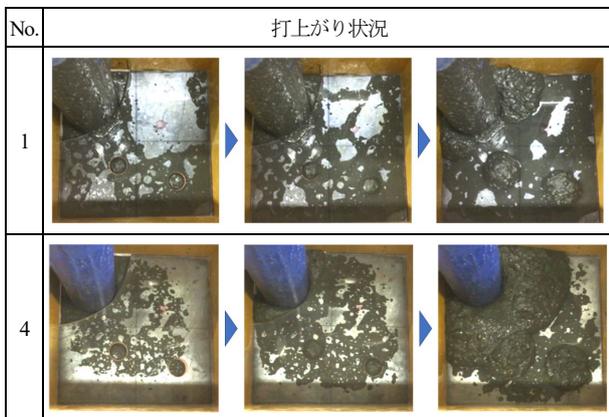


図 5 ダイアフラム下打上がり状況

えられる。No.1~No.3 を比較すると、空気抜き孔の個数が 1 個と 2 個では充填率に大きな違いは無かったが、3 個とすることで、充填率が 90%以上となった。また、ダイアフラム直下でパイプレーターを使用しなかった No.5 も、90%以上の充填率となった。

4. 要素実験 II

4.1 実験概要

要素実験 II では、パイプレーターの影響やバケットに取り付けるホース径の影響を確認するために、模擬柱試験体による実験を行った。試験体概要を図 6 に、実験条件を表 7 に示す。□580mm×高さ 1200mm の模擬柱試験体による落下込み施工実験を行った。また、柱断面サイズによる影響を確認するために、□1700mm×高さ 600mm の大断面の模擬柱についても実験を行った。コンクリートの充填には 1.5m³ のバケットを使用し、底部に取り付けるホース径はφ200mm と φ150mm の 2 水準とした。パイプレーターはφ40mm のものを使用し、ホースの先端より 200mm 程度深い位置にパイプレーターの先端がくるように配置した。

4.2 実験結果

表 8 に各試験体に打ち込んだコンクリートのフレッシュ試験結果を示す。No.1~No.6 に打ち込んだコンクリートは、他の実験結果と比較すると若干スランプフローが小さかったが、目標値を満足する結果となった。表 9 に打上がり速度およびダイアフラム下充填率の測定結果を示す。ダイアフラム下の充填率について、ホース径φ150mm の方が、充填率が大きくなる傾向となった。φ200mm のホースでは、打込み中にホース内にコンクリートが密実に詰まってお

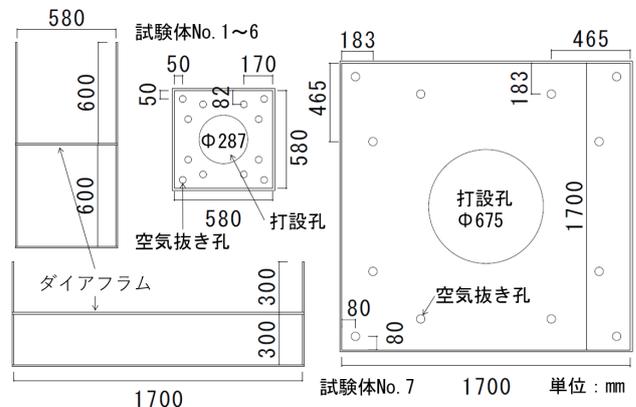


図 6 試験体概要図

表 7 実験条件

No.	パイプレーター	ホース径 (mm)	試験体	
1	ダイアフラム直下無し	φ200mm	□580mm	
2	有り			
3	無し			
4	ダイアフラム直下無し	φ150mm		□1700mm
5	有り			
6	無し			
7	無し			

ず、ゆとりがあったのに対し、φ150mm のホースはコンクリートが詰まった張りのある状態を維持していた。ホース径を相対的に小さくし、打込み中のホース内にコンクリートが詰まっている状態になっていたことで、巻き込まれる空気が減少し、ダイアフラム下の充填率が向上したと考えられる。パイプレーターの影響については、要素実験Ⅰと同様、使用することで充填率が低下する傾向となった。また、大断面である No.7 については、打上り速度が非常に低く、また、ダイアフラム下に気泡は殆ど無かった。柱断面サイズが大きくなることで打上り速度が低下したことが、充填率の向上につながった可能性があると考えられる。

5. 実大施工実験

5.1 実験概要

これまで実施した小型実験、要素実験Ⅰ、Ⅱの結果を踏まえ、落とし込み工法を確立するために、再度実大施工実験を実施した。実大試験体（試験体 No.1）概要図を図 7 に、ダイアフラムを図 8 に示す。更に、柱断面サイズの影響を確認するため、要素実験Ⅱの No.1~6 と、試験体形状およびダイアフラムが相似形状で、柱断面サイズが□1000mm（試験体 No.2）と□600mm（試験体 No.3）の模擬柱試験体 2 体についても実験を行った。コンクリートの打込みには、1.5m³ のコンクリートバケットを使用した。バケット底部には、要素実験Ⅱの結果を踏まえ、更に径の小さいφ125mm のホースを取り付け、ホース先端が常にコンクリート内に埋まるように打ち込んだ。測定項目は、表 4 の他、経過時間変化（打込み開始から 120 分後）、O 漏斗流下時間（JSCE-F 512）、標準養生供試体（材齢 7, 28, 56, 91 日）およびコア供試体（材齢 56 日, 91 日）による圧縮強度試験（JISA 1107, JISA 1108）とした。なお、要素実験の結果から、パイプレーターは使用しないこととした。

5.2 実験結果

表 10 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれも経過時間変化で大きな変化は無かった。図-9 に実大試験体の、材齢 56 日および 91 日の抜き取り高さ毎のコア供試体圧縮強度を、表-11 に標準養生およびコア供試体の圧縮強度の平均値を示す。材齢 91 日におけるコア供試体の圧縮強度の平均値は、柱の内側で 181N/mm²、

外側で 170N/mm² となった。材齢 28 日標準養生供試体の圧縮強度 160N/mm² と比較しても十分大きな圧縮強度を発現しており、CFT 柱における充填コンクリートの強度補正値は、0N/mm² でも問題ないことを確認した。表 12 にコンクリートの打上り速度と充填率を、図 10 にダイアフラム下充填状況の例を示す。No.1 および No.2 の試験体について、高い充填率を示し、バケットに取り付けるホース径を小さくし、打上り速度を抑えることで充填率が向上することを確認できた。一方、試験体寸法が小さく、打上り速度の速かつ

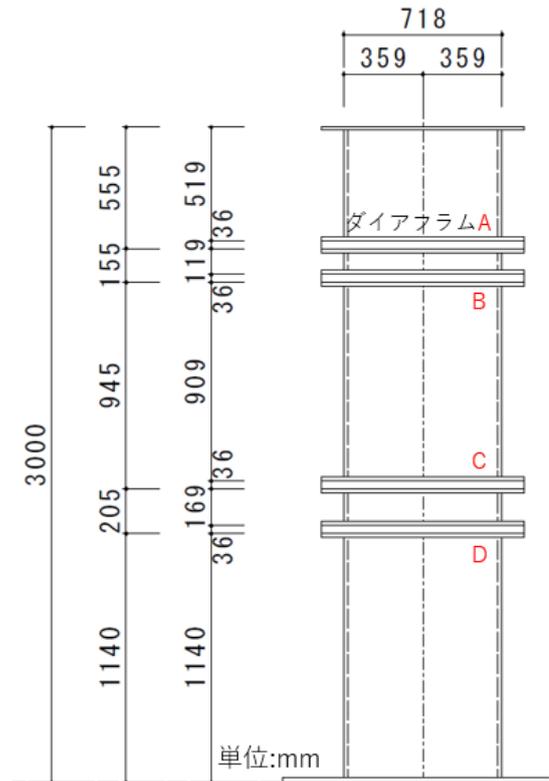
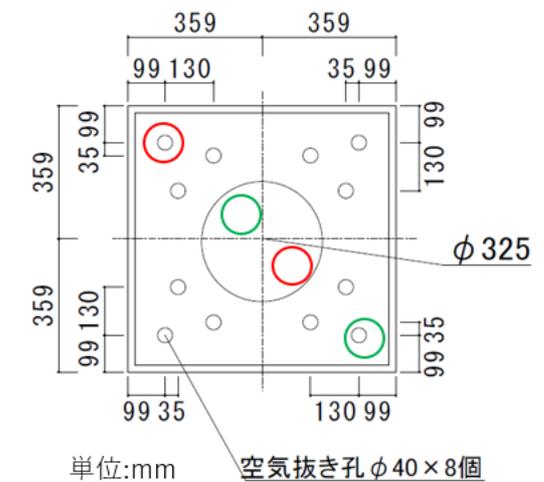


図 7 試験体概要図



コア供試体採取位置（○：56日・●：91日）

図 8 ダイアフラム

表 8 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	スランブ フロー (cm)	50cm フロー 到達時間(s)	空気量 (%)
1~6	67.0	19.9	1.2
7	72.0	15.1	1.5

表 9 打上り速度および充填率

No.	充填率(%)	打上り速度 (cm/min)
1	85.5	36
2	78.1	33
3	92.1	35
4	94.7	30
5	83.1	37
6	93.2	37
7	99.5	5

た No.3 は、充填率は90%を超えたものの、他の試験結果よりも5%程度低く、比較的大きな気泡が多数生じる結果となった。

6 充填性の確保について

本実大施工実験結果と、これまでに実施した施工実験、要素実験について、ホース径毎のダイアフラム通過時の打上がり速度とダイアフラム下充填率の関係を図 11 に示す。Fc150N/mm²級高強度コンクリートを落とし込み工法で CFT 柱に充填する場合、バケットに取り付けるホース径がφ200mm 以上では、打上がり速度を遅くしても、ダイアフラム下への充填性を確保できない可能性が高い。一方、ホース径をφ150mm 以下とすれば、ホース径に依らず、打上がり速度が遅い程充填率は向上し、40cm/min 以下とすることで、90%以上の充填率を確保できると考えられる。

7. まとめ

充填コンクリートに Fc150N/mm² 超高強度コンクリートを用いた CFT 柱の落とし込み施工を行った際の充填性を確保するために、モルタルを使用した小型実験や模擬柱試験体による要素実験により施工法を検討し、実大施工実験により有効性を確認した。本実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートを打ち込む際にバイブレーターを使用すると、コンクリート内の気泡を上昇させる効果はあるものの、コンクリートが空隙を外に押し出すような動きが無くなり、充填率が低下する。
- (2) バケットに取り付けるホースについて、コンクリートを充填する際はホース内がコンクリートで満たされている状態であることが望ましい。ホース径が大きい場合は、打ち込む際に

空気を多く巻き込み、ダイアフラム下充填率の低下につながる可能性がある。

- (3) CFT 柱断面積が小さくなると、相対的に打上がり速度が速くなり、ダイアフラム下充填率が低下する傾向となる。

表 11 圧縮強度平均値

供試体	圧縮強度(N/mm ²)		
	28 日	56 日	91 日
標準養生	160	172	176
コア (内側)	—	164	181
コア (外側)	—	164	170

表 12 打上がり速度と充填率

試験体	柱断面サイズ (mm)	ダイアフラム記号	充填率 (%)	打上がり速度 (cm/min)
1	□718	A	95.2	18
		B	96.5	
		C	97.1	
		D	96.7	
2	□1000	-	95.5	8
3	□600	-	90.3	27

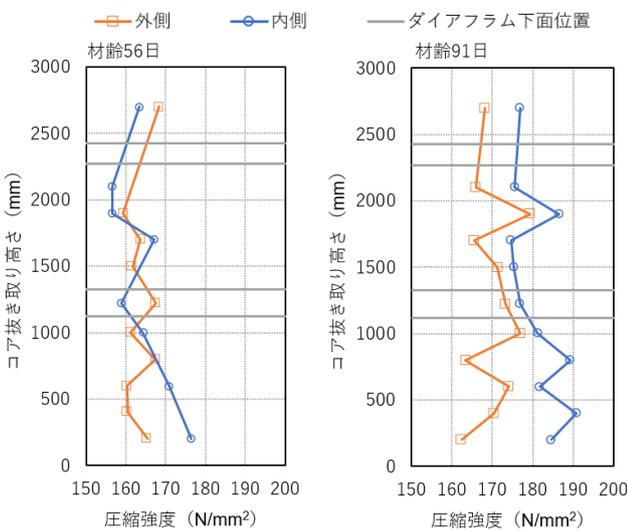


図-9 コア供試体の圧縮強度

表 10 フレッシュコンクリート試験結果

試験	スランプフロー(cm)	O 漏斗流下時間(s)	空気量 (%)
打込時	71.5	47	1.1
経時変化	71.0	46	0.9

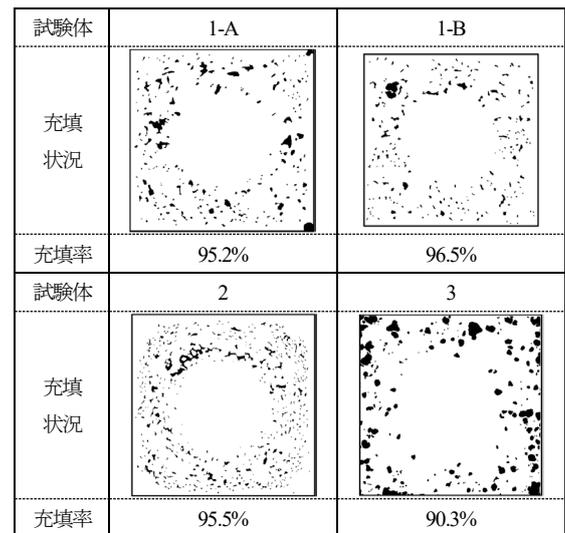


図 10 ダイアフラム下充填状況

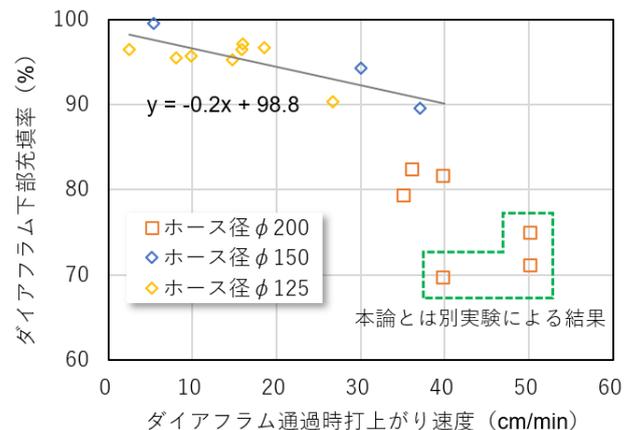


図 11 打上がり速度とダイアフラム下部充填率の関係

- (4) バケットに取り付けるホースの径を $\phi 150\text{mm}$ 以下とし、打上がり速度を 40cm/min 以下とすることで、ダイアフラム下充填率を90%以上確保できる。
 - (5) 材齢91日でのコア強度は、設計基準強度や材齢28日標準養生供試体に対して十分な強度発現を確認し、CFT柱における充填コンクリートの強度補正值は、 0N/mm^2 でも問題ないことを確認した。
 - (6) 本実験において、 150N/mm^2 級超高強度コンクリートのCFT柱への落とし込み工法について、充填性能や強度性状に問題ないことを確認し、施工法を確立することができた。
- 2) 端直人, 井戸康浩, 右田周平, 梅本宗宏: $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ 級CFT柱の実大施工実験(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp127-130, 2013.8
 - 3) 端直人, 梅本宗宏, 右田周平: $\text{Fc}120\text{N/mm}^2$ 級高強度コンクリートを用いたCFT柱の実大施工実験(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp761-764, 2018.7
 - 4) 右田周平, 梅本宗宏, 久須美真悟, 端直人: $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ 級超高強度コンクリートを用いたCFT柱の圧入施工に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, pp.863-868, vol.43, 2021.7
 - 5) 小林利充, 和田高清, 梅本宗宏, 井戸康浩, 端直人: スランプ21cmのコンクリートを使用したCFT落とし込み工法に関する実験的研究(その1~5), 日本建築学会学術講演梗概集, pp961-970, 2009.8

参考文献

- 1) 青木義彦, 石清水隆, 山田佳博, 永野浩一: $\text{Fc}=150\text{N/mm}^2$ の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, pp.205-212, vol.50, No.8, 2012.8