

論文 CFT 柱のダイアフラム近傍のコンクリートの強度低下に関する解析的研究

山田 一徳^{*1}・寺西 浩司^{*2}・石川 靖晃^{*3}・梶田 秀幸^{*4}

要旨：これまでに、CFT 柱に充填されたコンクリートの圧縮強度がダイアフラム近傍で低下するという事例が多数報告されているが、その原因は未だ明らかになっていない。そこで、本研究では、ブリーディングなどに伴ってコンクリートが沈降する際に、ダイアフラム近傍のコンクリートのひずみが増大し、そのことが強度低下の直接的な原因になっていると仮定した。そして、この仮説に基づいて、CFT 柱の極若材齢のコンクリート挙動を有限要素法によりシミュレートした。その結果、ブリーディングに伴うダイアフラム近傍の引張ひずみの増大が強度低下の原因である可能性が高いことなどがわかった。

キーワード：コンクリート充填鋼管、高流動コンクリート、ブリーディング、有限要素法、収縮

1. はじめに

これまでに、CFT 柱に圧入工法で充填されたコンクリートの圧縮強度がダイアフラム近傍で低下するという事例が多数報告されている^{1)~3)}。このことを踏まえ、現状の CFT 柱のコンクリート充填工事では、施工者ごとに、モデル実験を行ってダイアフラム近傍の強度のばらつきを調べ、その結果を基に充填コンクリートの調合強度の割増しの値を設定している⁴⁾。

一方、充填コンクリートの強度低下の原因としては、例えば、(a) ブリーディングなどに伴ってコンクリートが沈降する際に、ダイアフラム近傍のコンクリートのひずみが増大し、そのことが強度低下の直接的な原因になっている、(b) ダイアフラムから伝達された熱が周辺のコンクリートの水和の進行に影響を及ぼす、などのことが考えられる。本研究では、上記のうちの (a) の仮説に着目した。そして、この仮説に基づいて、CFT 柱の極若材齢のコンクリート挙動を有限要素法によりシミュレートした。

本報では、まず、既往の CFT 柱の実大モデル実験を対象として解析を実施し、実験結果と解析結果の比較から上記の仮説の妥当性を検証した。次に、ダイアフラムの仕様や充填コンクリートの種類を解析要因とし、コンクリートのひずみ分布を計算した。そして、これらの要因がダイアフラム近傍の強度低下の状況に及ぼす影響について検討した。

2. 解析仮定および解析方法の妥当性の検討

2.1 解析概要

(1) 解析方法

本研究では、コンクリートの打込み直後から材齢 1 日

までの期間を解析対象とした。この間、コンクリートは流動状態から凝結過程を経て硬化状態へと遷移していくが、本解析では、この全ての過程に対して便宜上弾性モデルを仮定して、3 次元 FEM プログラム⁵⁾により逐次弾性解析を行った。コンクリートは、流動状態の場合、せん断応力が降伏値を上回ると流動するが、それ以下の領域では応力が作用しても流動しない（凝結の進行に伴ってこの領域は拡大する）。筆者らは、この領域でコンクリートに弾性変形が生じると仮定し、流動状態の期間の解析では、流動変形ではなく、降伏値以下の領域で生じるであろう弾性変形を計算した。

また、極若材齢におけるコンクリートの引張強度時のひずみは非常に大きいことが笠井ら⁶⁾により報告されていることから、コンクリートにひび割れは生じないものと仮定した。

以上の仮定の基に、ブリーディングに伴う収縮ひずみ（以下、ブリーディングひずみという）を初期ひずみの入力値とし、この他に、コンクリートの各種材料特性値を考慮して、CFT 柱内部のコンクリートの変形やひずみ分布を計算した。

(2) 解析対象

本章では、解析仮定および解析方法の妥当性を検討するため、(社)新都市ハウジング協会により実施された、CFT 柱のコンクリート強度確認実験¹⁾のうちの 1 ケースを解析対象とした。解析対象としたのは、図-1 に示すような、開口率（ダイアフラムに占める開口の面積比率）15%の内ダイアフラム形式の模擬柱である。また、充填コンクリートは、表-1 にその概要を示すものであり（記号：L34R）、ブリーディング量が多く、沈降の影響を確認しやすいことからこの調合を選定した。

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 名城大学 理工学部建設システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 前田建設工業(株) 技術本部ものづくりセンター (正会員)

(3) 解析モデル

図-2 に要素分割図を示す。本解析では、平面応力状態を仮定して、CFT 柱の片側半分を擬似的な 2 次元モデル（奥行き方向が 1 要素のモデル）にモデル化した。また、解析対象をコンクリート要素、鉄骨（鋼管およびダイアフラム）要素およびすべり・付着要素に分割した。

(4) 境界条件

図-3 に、解析モデルの境界条件を示す。本解析では、鋼管の外周面の節点は全方向とも固定した。また、すべり・付着要素（厚さ 1mm）をコンクリートと鉄骨の全境界面（ただし、底面は除く）に配置した。この要素では、剛性およびせん断剛性を 0 に近い値とすることで、要素間のすべりおよび剥離を表現した。

(5) 入力値

表-2 に、コンクリートおよび鉄骨要素の材料特性値を示す。本研究では、解析に必要な入力値を収集するために、事前に、コンクリートの沈降試験、凝結試験などを行った⁷⁾。その結果を踏まえ、ブリーディングひずみは、高さに関係なくコンクリートの全ての位置で均一に生じるものとし、その垂直方向のひずみの時間関数として沈降試験⁷⁾で得られた回帰式を与えた。また、コンクリートのヤング係数は、図-4 に示すように、コンクリートが始発に達するまでは小さな一定値 (100N/mm²) とし、その後は、圧縮強度の発現に依存して増大するものとした。なお、始発時間には事前の凝結試験⁷⁾で得られた測定値を入力した。

表-1 充填コンクリート

記号	セメント	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	遅延剤 (C×%)
L34R	低熱ポルトランドセメント	34	60	0.003

表-2 材料特性値

特性値	コンクリート	鉄骨
ヤング係数 (N/mm ²)	$t < t_0$ のとき: $E(t) = 100$ $t \geq t_0$ のとき: $E(t) = \phi \times 4700 \times f_c(t)^{0.5}$ ここに、 $f_c(t) = \frac{t - t_0}{22.0 + 0.76(t - t_0)} \times 89.7$	2.0×10^5
ポアソン比	0.2	0.3
密度 (kg/m ³)	2300	7850
ブリーディングひずみ (×10 ⁻⁶)	$\varepsilon_{sh}(t) = 3886.1 [1 - \exp(-23.77t)^{1.09}]$	-

[記号] t : 経過日数 (日), t_0 : 始発時間 (0.52 日), ϕ : クリープの影響の補正係数 ($t < 3$ の場合は 0.73, $t \geq 3$ の場合は 1), $E(t)$: 有効ヤング係数 (N/mm²), $f_c(t)$: 圧縮強度 (N/mm²), $\varepsilon_{sh}(t)$: ブリーディングひずみ (×10⁻⁶)

2.2 解析結果

(1) 変形状況

図-5 に、ダイアフラム (DF) 近傍の変形状況を示す (経過日数 1 日)。同図によると、ダイアフラム直下のコンクリートが沈降している。また、ダイアフラムの開口部分のコンクリートが下方に向かって沈み込んでおり、その傾向は、開口の中心部ほど顕著になっている。

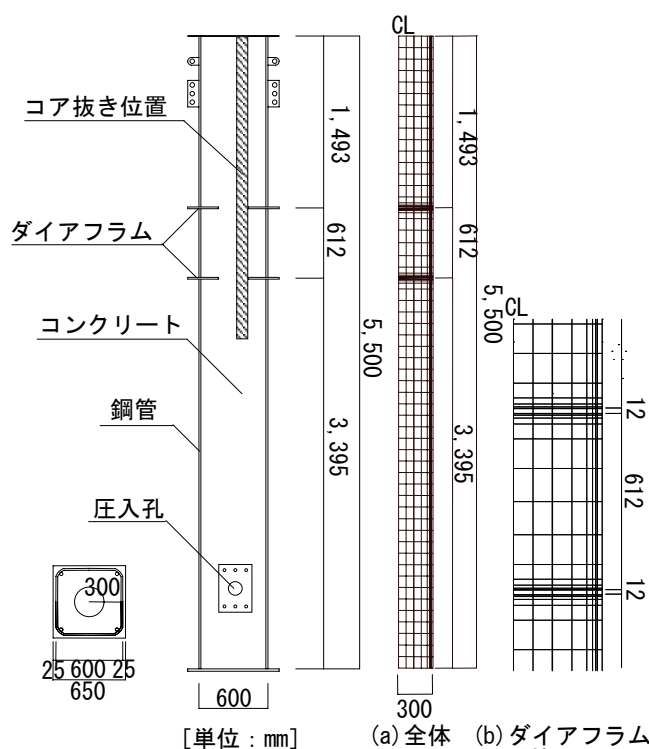


図-1 解析対象

図-2 解析モデル

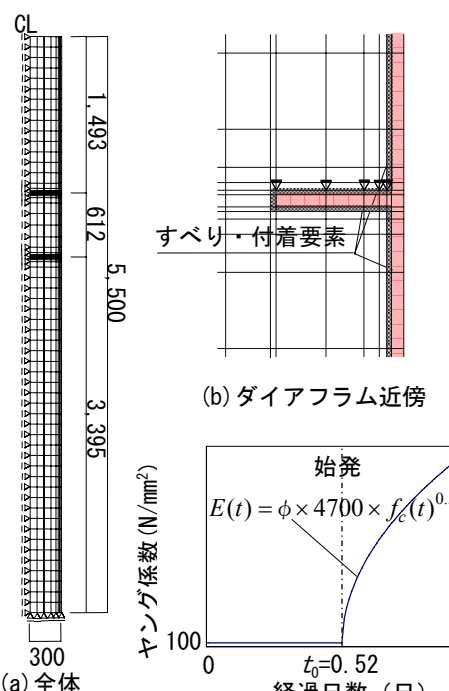


図-3 境界条件

図-4 コンクリートのヤング係数

(2) 拘束ひずみの分布

図-6 に、ダイアフラム近傍の主ひずみ（拘束ひずみ）図を示す（経過日数 1 日）。ここで、図中には、大きな引張ひずみ（ 500×10^{-6} 以上）のみを表示した。同図によると、ダイアフラムの上部および下部付近のコンクリートに大きな引張ひずみの領域が広がっている。また、上段と下段のダイアフラムを比較すると、下段ダイアフラムの方が大きな引張ひずみの生じる領域が広がっている。

2.3 実験結果と解析結果の比較

(1) 天端の沈降量

図-7 に、模擬柱の天端におけるコンクリート沈降量の解析結果を、実験結果¹⁾と併せて示す。同図からわかるように、両者はほぼ一致している。

(2) 強度低下の実験結果とひずみの解析結果の比較

図-8 に、実験で得られたコア強度の高さ方向の分布¹⁾を示し、また、図-9 に、解析結果による主ひずみ（拘束ひずみ）の分布を示す。これらの図を比較すると、実験結果で著しい強度低下の生じている位置（材齢 28 日および 56 日の場合）と、解析結果で大きな引張ひずみが生じている位置はほぼ一致している。このことから、本研究における「コンクリートの収縮に伴うひずみの増大が強度低下の原因である」との仮説は一応の信頼性があるものと判断される。

3. ダイアフラムの仕様および充填コンクリートの種類の影響

前章では、本研究における仮説および解析方法の妥当性が高いことを確認した。そこで、本章では、ダイアフラムの仕様や充填コンクリートの種類を解析要因とし、前章と同様の手法によりコンクリートのひずみ分布を計算した。

3.1 解析概要

(1) 解析ケース

表-3 に、解析ケースを示す。本解析では、表中の「15-750-L34R」のケースを基準として、ダイアフラムの開口率、ダイアフラムの枚数、上段・下段のダイアフラムの間隔および充填コンクリートの種類を変化させた。そ

記号	セメント	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	遅延剤 (C×%)
EC35	普通 エコセメント	35	60	-
N35	普通ポルトランドセメント	35		-
L34	低熱ポルトランドセメント	34		-
L34R	低熱ポルトランドセメント	34		0.3

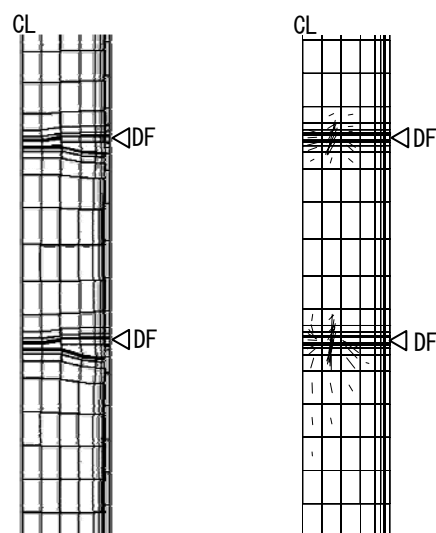


図-5 変形状況

図-6 主ひずみ図

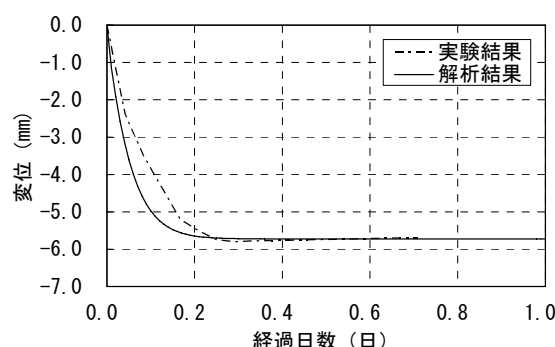


図-7 模擬柱の天端における沈降量

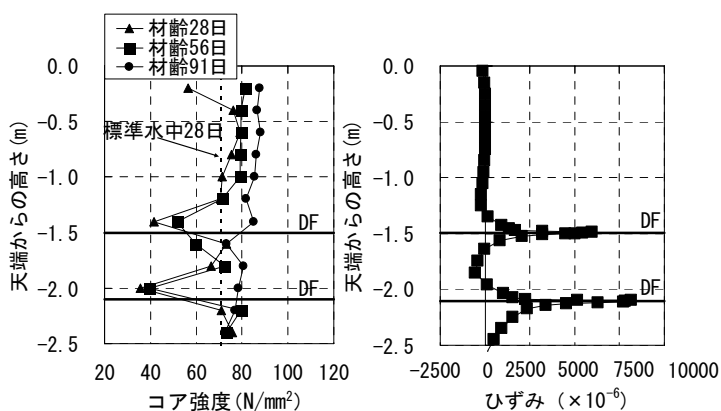


図-8 コアの強度分布
(実験結果)

図-9 主ひずみの分布
(解析結果)

表-3 解析ケース

ダイアフラムの仕様				コンクリート種類			
記号	DF 開口率 (%)	DF 枚数 (枚)	DF 間隔 (mm)	EC35	N35	L34	L34R
15-900	15	2	900				○
15-750			750	○	○	○	○
15-600		3	600				○
15-600+150			600+150				○
25-900	25	2	900				○
25-750			750				○
25-600		3	600				○
25-600+150			600+150				○
40-900	40	2	900				○
40-750			750	○	○	○	○
40-600		3	600				○
40-600+150			600+150				○

して、これらの組合せ計 18 ケースについて解析を実施した。なお、コンクリート種類は 2 章の解析に用いた L34R を含めて 4 種類とした。表-4 に、充填コンクリートの概要を示す。

(2) 解析モデル

図-10 および 11 に、解析対象とその要素分割図の一例を示す (15-750)。モデル化や要素分割の方法、境界条件などは 2 章の解析の場合と基本的に同様である。

(3) 入力値

本章で解析対象としたコンクリートに対しても、事前に、2 章の場合と同様に、沈降試験および凝結試験を行った⁷⁾。その結果を踏まえ、コンクリートのブリーディングひずみの時間関数には沈降試験で得られた各コンクリートの回帰式を与えた。また、始発時には凝結試験で得られた測定値を入力した。図-12 および表-5 に、ブリーディングひずみおよびヤング係数の入力値を示す。その他の入力値は、2 章の解析の場合と同様である。

3.2 解析結果

図-13 に、ダイアフラム近傍の変形状況の例を示す (経過日数 1 日)。同図によると、ケースによって変形量などに差が生じている。しかし、ダイアフラム直下のコンクリートが沈降し、かつ、ダイアフラムの開口部分

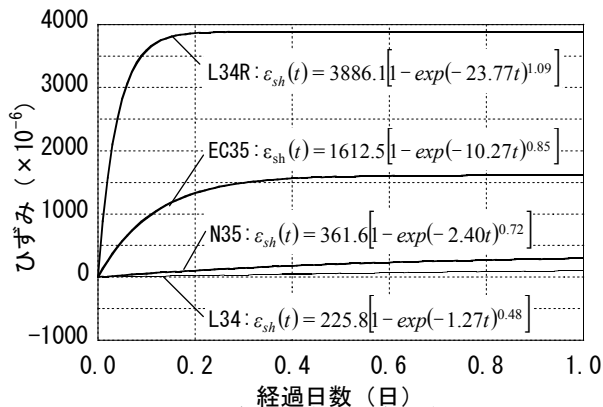


図-12 ブリーディングひずみの入力値

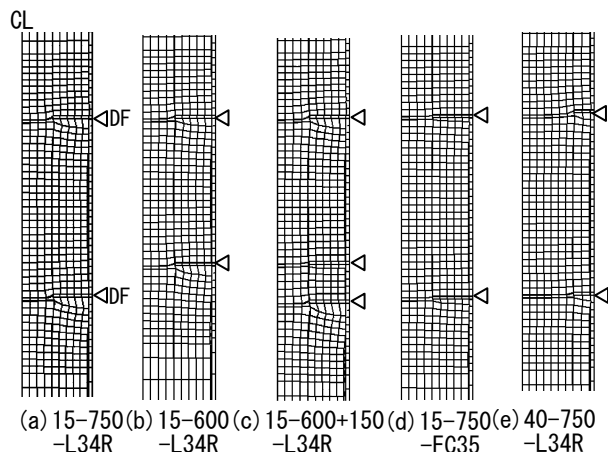


図-13 変形状況

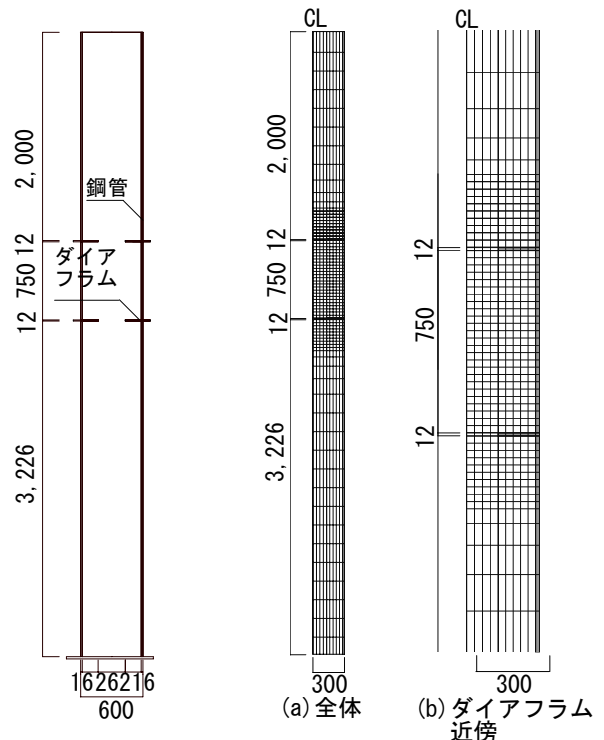


図-10 解析対象 (15-750)

図-11 要素分割図 (15-750)

表-5 ヤング係数の入力値 ($t \geq t_0$ の場合)

コンクリート種類	入力値: $E(t) = \phi \times 4700 \times f_c(t)^{0.5}$
EC35	$f_c(t) = \frac{t-t_0}{5.8+0.95(t-t_0)} \times 86.0$ ここに, $t_0 = 0.56$
N35	$f_c(t) = \frac{t-t_0}{4.5+0.95(t-t_0)} \times 86.9$ ここに, $t_0 = 0.26$
L34	$f_c(t) = \frac{t-t_0}{22.0+0.76(t-t_0)} \times 93.0$ ここに, $t_0 = 0.27$

*1 記号は表-2 を参照, *2 $t < t_0$ の場合 $E(t) = 100 \text{ N/mm}^2$, *3 L34R の場合は表-2 を参照。

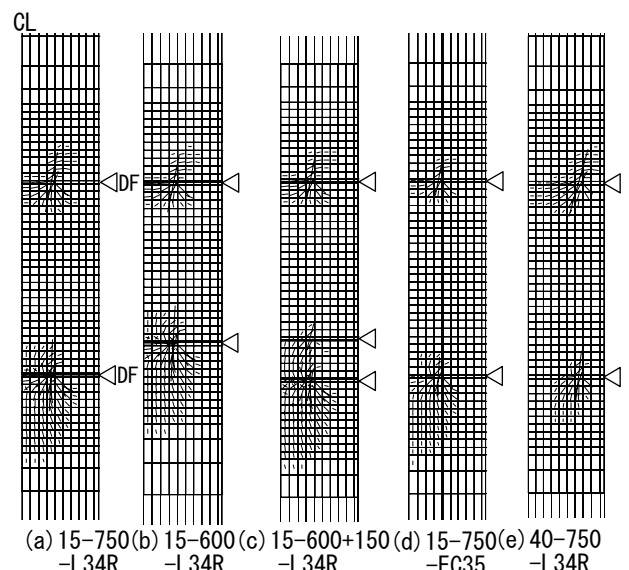


図-14 主ひずみ図

のコンクリートが下方に向かって沈み込むという変形モードは、ケースにかかわらず同様である。図-14に、ダイアフラム近傍の主ひずみ（拘束ひずみ）図の例を示す（経過日数 1 日）。ここで、図中には、大きな引張ひずみ（ 500×10^{-6} 以上）のみを表示した。同図によると、いずれのケースの場合も、上段・下段のダイアフラム近傍に大きな引張ひずみの領域が広がっている。ただし、その領域の広さはケースによって異なっている。

3.3 各種要因の影響

ここでは、上段・下段のダイアフラム近傍における、大きなひずみ（ 500×10^{-6} 以上）の生じた領域（以下、大ひずみ領域という）の面積を計算し、この値を指標として、コンクリートの強度低下に対する各種要因の影響を検討した。なお、ダイアフラムが 3 枚の場合は、中段ダイアフラム近傍の大ひずみ領域も下段ダイアフラムに含めて面積を計算した。

(1) ダイアフラムの仕様の影響

図-15に、大ひずみ領域の面積とダイアフラム開口率の関係を示す（L34R の場合）。下段ダイアフラムに着目すると、大ひずみ領域の面積は、ダイアフラム開口率が大きいほど小さくなっている。また、ダイアフラム枚数が 2 枚の場合、ダイアフラム間隔は、大ひずみ領域の面積にほとんど影響を与えていない。一方、上段ダイアフラムでは、大ひずみ領域の面積は、ダイアフラムの仕様にかかわらずほぼ一定である。ただし、本解析モデルでは、上段ダイアフラム上方のコンクリートの自由な沈降を許容しているため、このことは、解析条件から考えて、CFT 柱の最上階のみに適合する事項であると考えられる。

以上のことから、途中階のダイアフラムの場合、コンクリートに強度低下の生じる領域は、ダイアフラムの開口率が大きいほど狭くなり、ダイアフラム間隔には左右されない可能性が高いものと考えられる。

(2) コンクリート種類の影響

図-16に、コンクリート種類ごとの大ひずみ領域の面積を示す（ダイアフラム間隔 750mm の場合）。前項の場合と同様に、下段ダイアフラムに着目すると、コンクリートの大ひずみ領域の面積は、ダイアフラム開口率にかかわらず、ブリーディングひずみの小さいコンクリートほど小さくなっている。また、エコセメントを用いた場合（EC35）、大ひずみ領域の面積は、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントを用いた場合（N35, L34）よりも大きくなっている。したがって、ダイアフラム開口率の小さい CFT 柱にエコセメントを用いた高流動コンクリートを充填すると、他のセメントを用いた場合よりも強度低下の生じる領域が広がる可能性があるといえる。

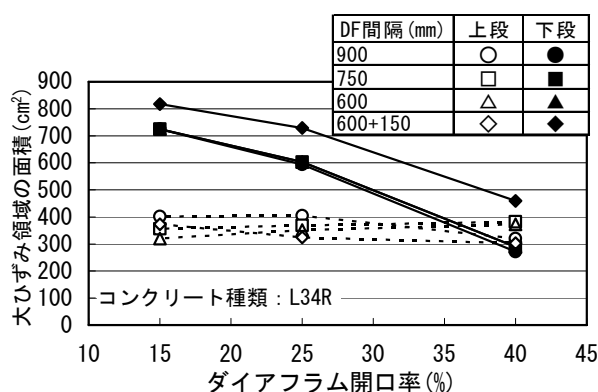


図-15 大ひずみ領域の面積とダイアフラム開口率の関係

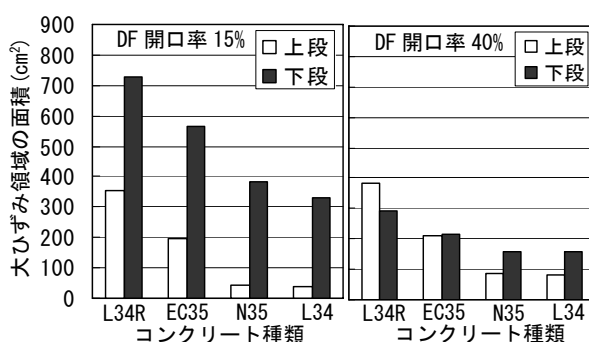


図-16 コンクリート種類ごとの大ひずみ領域の面積

4. まとめ

本研究では、ブリーディングなどに伴ってコンクリートが沈降する際に、ダイアフラム近傍のコンクリートのひずみが増大し、そのことが強度低下の直接的な原因になっているという仮説に基づいて、CFT 柱の極若材齢のコンクリート挙動を有限要素法によりシミュレートした。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 実験結果において強度低下の生じた位置と解析結果において引張ひずみの増加した位置がほぼ一致することから、ブリーディングに伴うダイアフラム近傍の引張ひずみの増大がコンクリートの強度低下の原因である可能性が高いと考えられる。
- (2) ダイアフラム近傍におけるコンクリートに強度低下の生じる領域は、ダイアフラムの開口率が大きいほど狭くなる。また、ダイアフラムの間隔には左右されない。
- (3) ダイアフラム近傍におけるコンクリートに強度低下の生じる領域は、充填コンクリートのブリーディングに伴うひずみが小さいほど狭くなる。

本報は、「環境配慮型セメントを用いたコンクリート充填鋼管造に関する施工技術の開発コンソーシアム」が国土交通省平成 18 年度住宅・建築先端技術開発助成事業の助成を得て実施した研究の一部を報告するものである。

参考文献

- 1) 梅本宗宏，槇島修，松本和行，西田浩和，森浩之，大内千彦，梶田秀幸，黒島毅：CFT 柱の構造体コンクリート強度確認実験（その 3 硬化コンクリートの試験結果），日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp. 847-848，2002. 8
- 2) 中川雄二，川崎三十四，松本範義，成川史春，和田真平：鋼管コンクリート構造柱の実用化実大施工実験（その 3 鋼管の応力分布、硬化コンクリート），日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.855-856，1998.8
- 3) 中込昭，江口清，寺西浩司，西川秀則：充填形鋼管コンクリート柱の圧入施工実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.1055-1060，1993.6
- 4) 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・同解説の運用及び計算例等，pp.2-36-2-40，2003.9
- 5) 田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.3
- 6) 笠井芳夫，横山清：コンクリートの初期材令における圧縮応力とひずみ度との関係，コンクリート・ジャーナル，Vol.9，No.2，pp.1-12，1971.2
- 7) 寺西浩司，山田一徳，梶田秀幸：CFT 柱に充填するコンクリートの収縮挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，2008.7（予定）