

450mm の位置に設けており、DF1-R1 試験体にはダイアフラム上面に高さ 240mm、幅 80mm、厚さ 16mm のリブプレートを各方面 2 枚ずつ、計 8 枚を取付けた。コンクリートの充填においては、鋼管からコンクリートへの軸力伝達メカニズムを把握するため、鋼管上部から 50mm 下げた位置まで充填した。また、ダイアフラムによるコンクリートへの軸力伝達機構を検討するため、試験体下部においてはスキンプレートとベースプレートに 20mm の隙間を設けた。ここで、鋼材及びコンクリートの材料特性を表-2 及び 3 にそれぞれ示す。

2.2 載荷及び計測計画

載荷装置図を図-2 に、変位計及びひずみゲージの計測位置及びナンバリングを図-3 にそれぞれ示す。本研究では、長期荷重のみを想定し CFT 柱脚上部から鉛直下向きの静的載荷を行った。試験体は高い剛性を有する鉄骨治具を介して反力床と固定し、試験体上部にはジャッキの荷重を計測するためにロードセルを設置し、その上部からジャッキにより鉛直方向の荷重を作用させた。

計測計画としては、各試験体最上部の四方位（東西南北）のスキンプレート中央に全体変位計を取付け、試験体全体の鉛直変位を計測した。また、南面と北面には六つの区間に分けて区間変位計を取付け、CFT 柱脚部の区間ごとの軸縮みを計測した。西面と南面のスキンプレートには水平方向に変位計を取付け、面外膨らみを計測しつつ、水平方向の変位計がスキンプレートに接触する位置の近傍及びその対称位置の東面と北面にひずみゲージを貼付け、同断面のスキンプレートのひずみ分布を計測した。なお、コンクリートにはモールドひずみゲージを埋め込んでおり、1 層目（ダイアフラム直下）はスキンプレートの位置に設けており、DF1-R1 試験体にはダイアフラム上面に高さ 240mm、幅 80mm、厚さ 16mm のリブプレート

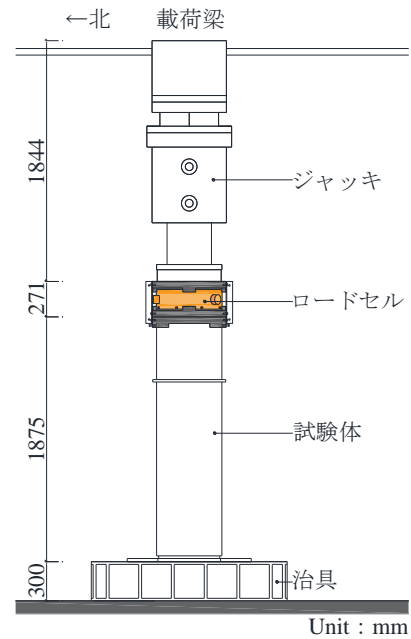


図-2 載荷装置図

表-2 鋼材の材料特性

部位	降伏強度	引張強度	ヤング係数
スキンプレート	376	507	2.2×10^5
リブプレート			
ダイアフラム	383	518	2.1×10^5
ベースプレート	370	541	2.1×10^5

Unit : MPa

表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時ひずみ (μ)	ヤング係数 (MPa)
71.5	2350	3.65×10^4

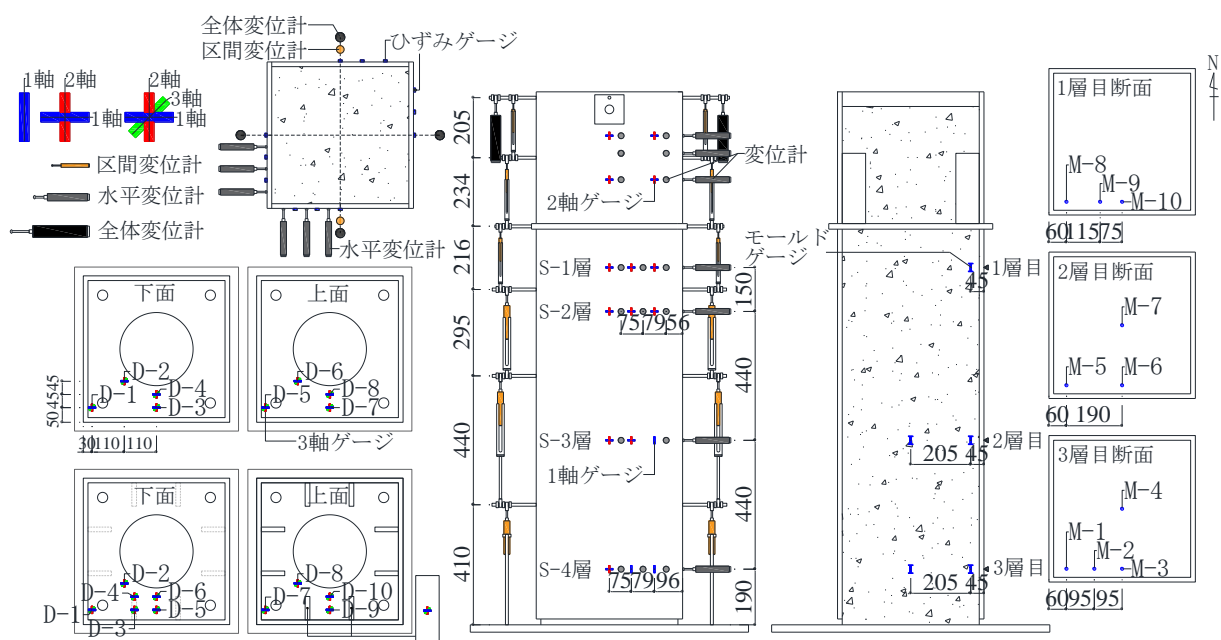


図-3 変位計及びひずみゲージの計測位置

プレート近傍にのみ配置し、2・3層目（試験体中部及び下部）は試験体中心部にも配置した。更に、ダイアフラム及びリブプレートには3軸ひずみゲージを貼付け、その主ひずみ分布を計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重－変形関係

各試験体の荷重－変形関係を図-4 に示す。ここで、変形はスキンプレートとベースプレート間に設けた隙間に集中することを考え、前述した試験体の南北面に取り付けている最下部区間変位計の平均値を採用した。

図-4 より、DF1-R0 試験体では約 1000kN、DF1-R1 試験体では約 1500kN から軸剛性の増加が確認できた。これは、作用する鉛直荷重がスキンプレートとコンクリートの付着耐力を超えた後、ダイアフラムが有効的に機能し始めコンクリートへの軸力伝達量が増加したことを表していると考えられる。また、DF1-R0 試験体では約 5000kN 以降から軸剛性の鈍化が確認できたのに対し、DF1-R1 試験体では約 8000kN において同様な現象が現れた。ここで、リブプレートを有する DF1-R1 試験体の軸剛性を維持する荷重領域が DF1-R0 試験体のそれよりも長くなる傾向を示しており、ダイアフラムに対するリブプレートの変形抑制効果が発揮したことが要因であると考えられる。

3.2 スキンプレートのひずみ

各試験体のスキンプレートのひずみ分布を図-5 に示す。ここで、ひずみはダイアフラム下のスキンプレートの北面と南面中央に貼付けた 2 軸ひずみゲージ（図-3 を参照）の鉛直方向の値である。

図-5 より、両試験体ともに鉛直荷重の約 1000kN までは最下部（S-4 層）の軸方向圧縮ひずみが最も小さい値を示していることが分かる。これは、前述したように初期段階にはスキンプレートとコンクリートの付着力により軸力が伝達され、その付着面積が最も大きい S-4 層のスキンプレートの軸力負担の低下に起因すると考えられる。また、同様に前述した通り約 1000kN 以降からダイ

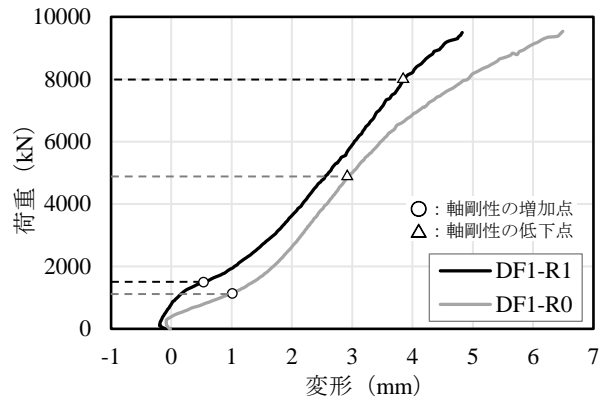


図-4 荷重－変形関係

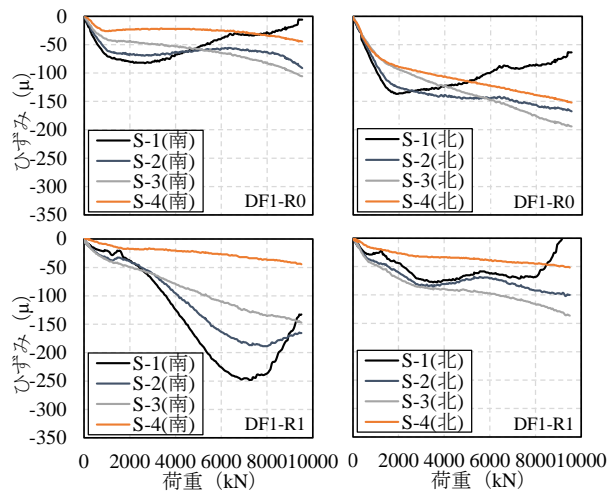


図-5 スキンプレートのひずみ

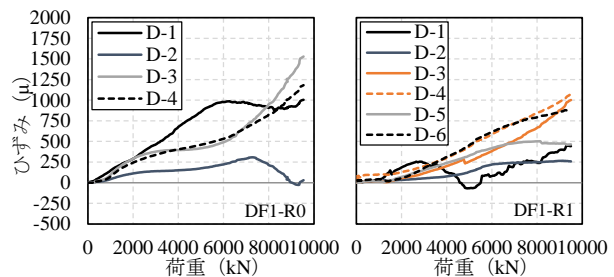


図-6 ダイアフラムの最大主ひずみ

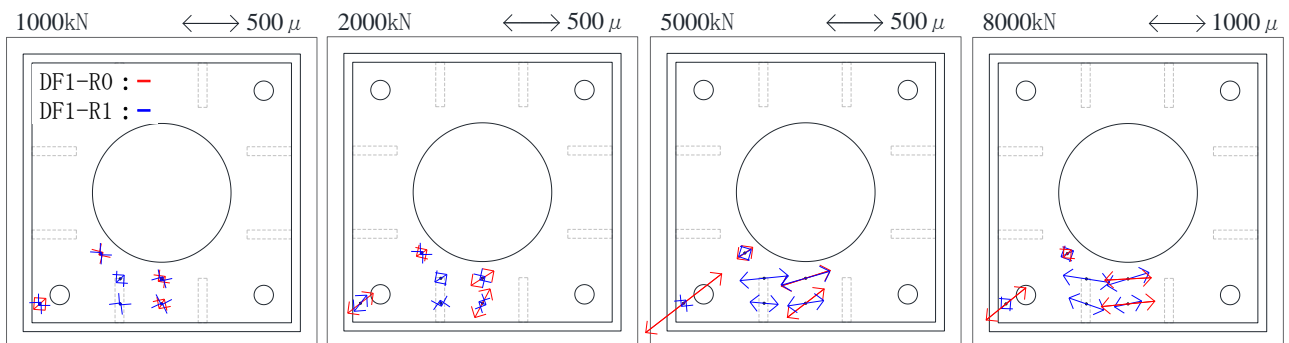


図-7 ダイアフラムの最大主ひずみの大きさと向き

アフラムの機能が発揮しており、コンクリートへの軸力伝達が有効的に進行されたため、両試験体スキンプレートの軸方向圧縮ひずみの増加量が減少していることが確認できた。

また、同図より両試験体のスキンプレートとベースプレートに 20mm の隙間を設けているため、ダイアフラムにより軸力が有効的に伝達される以降はコンクリートの軸力分担が卓越し、スキンプレートの軸方向圧縮ひずみの増加が限定的であることが分かる。

3.3 ダイアフラムの最大主ひずみ

鉛直荷重によるダイアフラムの最大主ひずみの進展を図-6 に、代表的な鉛直荷重における主ひずみの大きさと向きを図-7 にそれぞれ示す。ここで、ダイアフラムの最大主ひずみは 3 軸ひずみゲージの計測結果を用いて、ロゼット解析計算法³⁾に基づき算出した。また、試験体製作段階にダイアフラム上面のひずみゲージに不具合が発生したため、下面の値を採用する。

図-6 より、スキンプレートとコンクリートの付着力による軸力伝達が主となる鉛直荷重の約 1000kN までは、両試験体におけるダイアフラムの最大主ひずみの値が極めて小さいことが分かる。また、それ以降からダイアフラムが有効的に機能し始めることで、その最大主ひずみの増加が顕著であった。同図より、DF1-R0 試験体においてはスキンプレート近傍 (D-1) の最大主ひずみが卓越していることに対し、DF1-R1 試験体では計測位置による最大主ひずみの差異が小さかった。これは、DF1-R1 試験体のダイアフラムはリブプレートの変形抑制効果により、コンクリートへの軸力伝達がより均等になることが要因であると考えられる。

図-7 に示す最大主ひずみの向きに着目すると、両試験体ともにダイアフラム対角線上の D-1 及び D-2 の最大主ひずみはその中心を向かっているのに対し、その他の位置の (D-3~D-6) 最大主ひずみはスキンプレートと平行する向きとなり、ダイアフラムは鉛直方向に膨らんでいく傾向を示した。この変形メカニズムはダイアフラムによる下部コンクリートへの軸力伝達機能の発揮を示唆していると考えられる。

以上の結果より、ダイアフラムは下部コンクリートへの軸力伝達機能を発揮する変形メカニズムを示しつつ、リブプレートの設置によりダイアフラムの隅側など局所的な応力集中を防ぐことができ、コンクリートへの軸力伝達がより効果的であることが分かる。

3.4 コンクリートのひずみ

コンクリートのひずみ分布を図-8 に示す。ここで、各層のモールドひずみゲージの埋め込み位置及びナンバリングは図-3 を参照されたい。

図-8 より、両試験体のコンクリートの軸方向圧縮ひずみにおいて 2 層目と 3 層目ではその大きさと分布は同様な傾向を示しているが、1 層目では DF1-R0 試験体のコンクリート圧縮ひずみが DF1-R1 試験体のそれよりも大きくなり、特に DF1-R0 試験体の隅側 (M-8) 圧縮ひずみはコンクリートの圧縮強度時ひずみ 2350μ を大きく上回る結果となっていることが分かる。また、1 層目のコンクリート圧縮ひずみに対する 2 層目と 3 層目の差においては、DF1-R1 試験体と比べ DF1-R0 試験体の方が顕著であることが確認できる。これは、DF1-R1 試験体ではリブプレートの変形抑制効果によりコンクリートへの軸力伝達は凡そ均等になるものの、リブプレートの有無に関

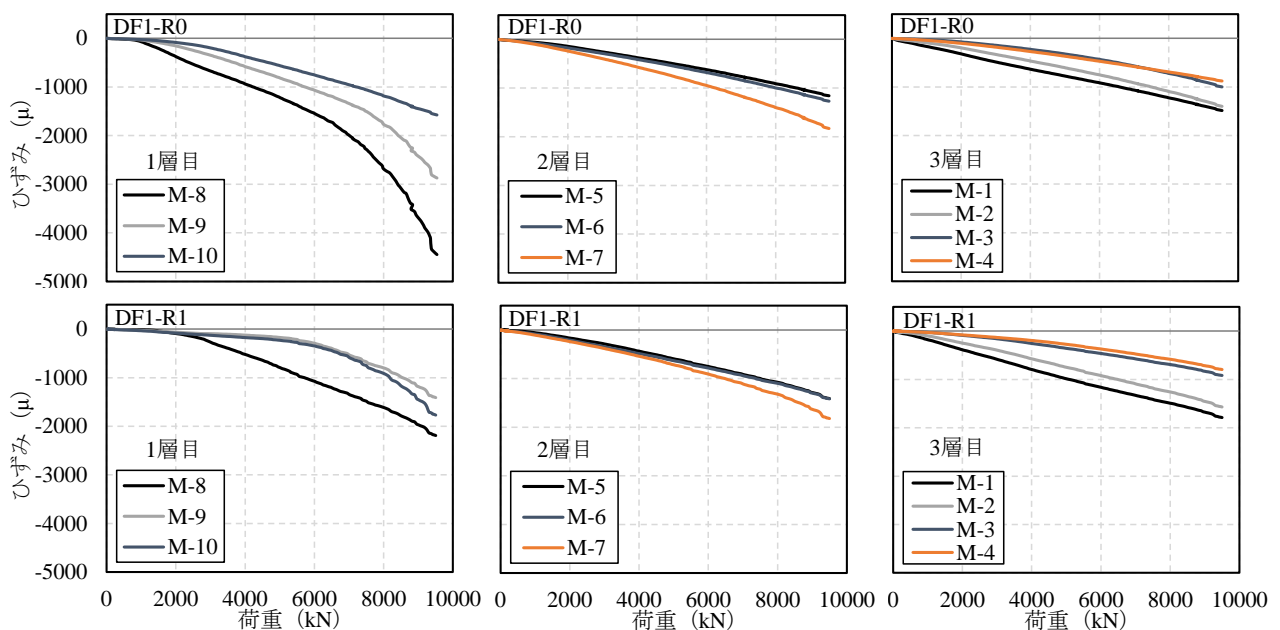


図-8 コンクリートのひずみ

ならずダイアフラムの下部コンクリートに対して局所的な圧縮性状が作用していることを示唆していると考えられる。

同図より、1層目において鉛直荷重の約1000kN以降からダイアフラムが有効的に機能し始めることで、軸方向圧縮ひずみの増加が顕著に現れるのに対し、2層目と3層目では初期段階からひずみの増加が確認できる。これは、ダイアフラム直下よりも試験体下部の方がスキンプレートとコンクリートの付着面積が大きいいため、ダイアフラムが有効的に機能する以前から付着力による軸力伝達が発揮されたことを示している。

以上の結果より、ダイアフラムの下部コンクリートには均等に軸力が伝達されておらず、リブプレートを有する場合でも僅かな局部圧縮性状が確認できており、特にその傾向はダイアフラム直下において顕著に現れることが分かる。

4. 有孔ダイアフラムのずれ耐力評価

4.1 現行指針の評価式

既往の研究^{1), 2)}では、有孔ダイアフラムを有するCFT柱脚の押し抜き荷重実験結果に基づき、そのずれ耐力評価式を式(1)~(3)のように与えている。ここで、 α_c は補正係数、 A_c はコンクリートの断面積、 A_d はダイアフラムの鋼管内投影面積、 σ_{cb} はコンクリート圧縮強度、 φ は鋼管内周長、 t_d はダイアフラムの板厚、 σ_y はダイアフラム降伏強度である。

$$P_s = \alpha_c (A_c \times A_d)^{1/2} \times \sigma_{cb} \quad (1)$$

$$P_d = \varphi \times t_d \times (\sigma_y / 3)^{1/2} \quad (2)$$

$$P_{mb, pred} = \min(P_s, P_d) \quad (3)$$

現行のずれ耐力の評価方法は、充填コンクリートに対するダイアフラムの圧縮によって決まる P_s と、ダイアフラムがせん断降伏することによって決まる P_d に基づき算出される値の小さい方をずれ耐力計算値 $P_{mb, pred}$ として評価する。本研究では、前章で報告した実験結果のようにコンクリートの圧縮ひずみが著しく、更にダイアフラムの変形によってコンクリートに局所的な圧縮性状が卓越すると考えられることから、コンクリートの圧縮によって耐力を評価する P_s について、支圧面積及び支圧強度を用いた評価式の提案を試みる。

4.2 コンクリートの支圧性状を考慮した提案式

(1) 支圧面積の評価

前述した通り、ダイアフラムの変形がコンクリートに与える支圧影響に着目し、本研究ではプレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（以下：PC規準）⁴⁾における有効支圧表面積の考え方（図-9）を適用し、各試験体の充填コンクリートの支圧面積評価を試みる。PC規準の有効支圧表面積の概念を本実験モデルに適用した支

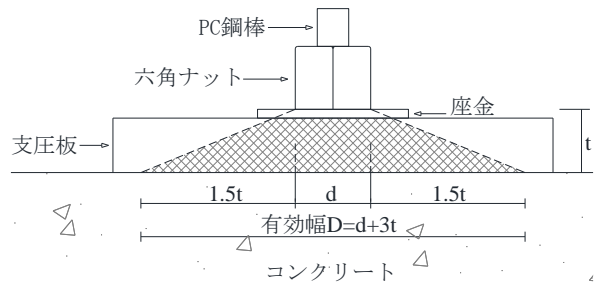


図-9 PC規準⁴⁾における有効支圧表面積の概念図

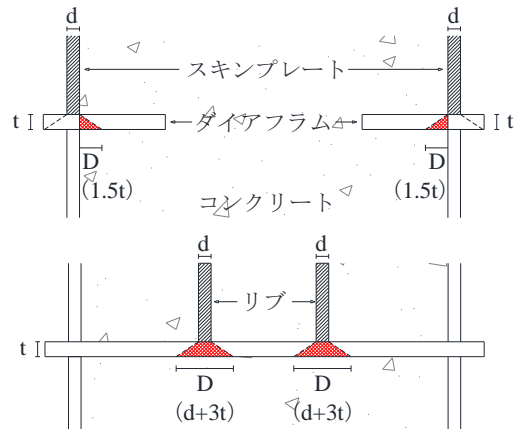
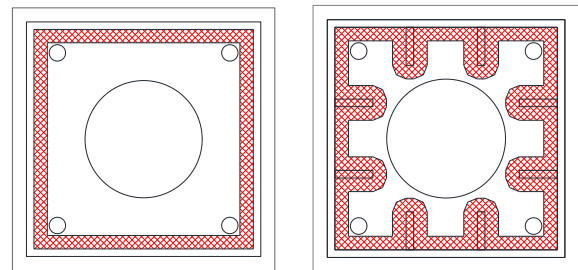


図-10 支圧面積の算定方法



支圧面積：50103mm²

(a) DF1-R0 試験体

支圧面積：93017mm²

(b) DF1-R1 試験体

図-11 支圧面積の算定結果

表-4 支圧強度の算定結果

DF1-R0 試験体	DF1-R1 試験体
98.3	72.2

Unit : MPa

圧面積の算定方法を図-10に、それらに準拠した両試験体の支圧面積の算定結果を図-11に示す。ここで、六角ナットをスキンプレート、支圧板をダイアフラムと仮定し、鋼管内のコンクリート領域に接する部分を有効幅Dとした。また、DF1-R1試験体においてはリブプレートのダイアフラムに対する変形抑制効果を反映し、スキンプレートと同様に支圧面積の増大への寄与分を加算した。

図-11より、両試験体ともにスキンプレート近傍に支圧面積が集中する結果となり、DF1-R1試験体においてはリブプレートの影響によりダイアフラム中央のエリア

まで支圧領域が広がり、その支圧面積は DF1-R0 試験体の 1.85 倍程度となっていることが分かる。

(2) 支圧強度の評価

式(1)の P_s 算出においては、コンクリートの圧縮強度 σ_{cb} を用いているが、本研究では支圧性状を考慮するため、式(4)により算出した支圧強度 σ_{bb} をコンクリート強度として代用する。ここで、 A_c はコンクリートの断面積、 A_l は支圧面積である。支圧面積 A_l は前項で算出した結果を用いたものであり、各試験体の支圧強度の算出結果を表-4 に示す。

$$\sigma_{bb} = 1.8\sigma_{cb}^{(0.8-\sigma_{cb}/2000)} \times (A_c \times A_l)^{1/2} \quad (4)$$

表-4 より、両試験体におけるコンクリートの支圧強度はその圧縮強度を上回りつつ、支圧面積が小さい DF1-R0 試験体では 1.3 倍程度となっており、式(4)は本研究で注目しているコンクリートに対するダイアフラムの支圧性状を考慮できていると考えられる。

(3) ずれ耐力評価式の提案

前述したコンクリートの支圧性状を考慮した強度 σ_{bb} を適用し、ダイアフラムのずれ耐力 P_s' の評価式を式(5)に示す。ここで、 A_l はコンクリートの支圧面積、 σ_{bb} はコンクリートの支圧強度である。

$$P_s' = A_l \times \sigma_{bb} \quad (5)$$

両試験体のずれ耐力において、現行指針の式(1)と本研究の提案式(5)による計算値と実験値を比較し図-12 に示す。ここで、実験値はコンクリートが圧縮強度に達した鉛直荷重であり、コンクリートの圧縮強度の到達点はダイアフラム直下(1層目)に埋め込んだモールドゲージの軸方向圧縮ひずみが 2350μ に達する点とする。図-12 より、現行指針の式ではダイアフラムがコンクリートを均等に圧縮することを前提としているため、その算定結果は実験値を大幅に上回ることに對し、本研究で提案したダイアフラムによるコンクリートの支圧性状を考慮する評価方法は、実験値をやや下回る安全側の評価となっており、その評価精度の向上も確認できた。

5. 結論

本研究では、有孔ダイアフラムを有する CFT 柱脚の鉛直載荷実験結果に基づき、ダイアフラムによるコンクリートへの軸力伝達機構について検討したうえ、ダイアフラムによるコンクリートの支圧性状を考慮したずれ耐力評価方法を提案した。以下に得られた知見をまとめる。

- ・ダイアフラムにリブプレートを取付けた DF1-R1 試験体はそれのない DF1-R0 試験体と比べ、軸剛性を維持する鉛直荷重領域が大きく、DF1-R0 試験体では約 5000kN、DF1-R1 試験体では約 8000kN 以降から軸剛性の鈍化が確認できた。
- ・ダイアフラムによるコンクリートへの軸力伝達におい

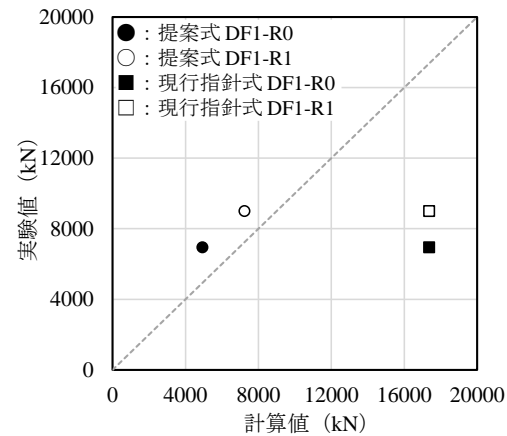


図-12 ずれ耐力の計算値と実験値の比較

て、両試験体とも支圧性状が確認され、リブプレートのない DF1-R0 試験体でその傾向がより顕著であることが分かった。

- ・ダイアフラムによるコンクリートへの支圧影響を考慮し提案したずれ耐力評価方法は、実験結果をやや過小評価し精度向上の余地があるものの、実験結果を概ね捉えることができた。

今後は、本実験結果を有限要素解析により再現し、コンクリートの応力度分布をより詳細に把握し、支圧面積や強度の評価精度を向上しつつ、更に CFT 柱脚に曲げ圧縮が作用する場合についても検討を進める予定である。

謝辞

本研究における載荷実験及び結果分析の遂行にあたり、株式会社日建設計の小林和子氏、平井健一氏、川田工業株式会社の下斗米久氏、株式会社ブリヂストンの丸山健司氏、加藤秀章氏、太田雅己氏、京都大学の聲高裕治氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 河野昭彦，崎野健治，岡本勇紀，豊里健二：コンクリート充填鋼管柱の有孔ダイアフラムによるずれ止め効果の定量的評価，日本建築学会構造系論文集，No.598，pp.163-167，2005.12
- 3) 東京測器：ロゼット解析の計算法（製品総合カタログ 2023-2024）
- 4) 日本建築学会：プレストレストコンクリート計施工規準・同解説，2022.3
- 5) 坂田博史，森田真由美，中塚侑：コンクリートの支圧応力-めり込み変形特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol.56B，pp.81-86，2010.3