

円錐台形状を有する小型PC定着具の性能に関する研究

黒沢建設株式会社 技術部 正会員 ○ 金上 明子
 鹿島建設株式会社
 建築設計エンジニアリング本部 友住 博明
 黒沢建設株式会社 技術部 正会員 平井 圭

1. はじめに

PC圧着工法を採用した超高層建築物において、下層階の柱は作用応力によって断面寸法が決定されるが、上層階では軸力が減少するために必要断面寸法は小さくできる。しかしながら、隅柱のような平面的に二方向から配置されたPCケーブルを定着する場合には、定着具の配置間隔の制限により断面寸法が決定されることがあり、耐力上の必要寸法よりも断面が大きくなる可能性がある。そこで、経済的な設計を行うためには、従来よりも配置寸法を小さくできる小型の定着具が必要となる。

現在一般に使用されている定着具は、平鋼を用いて支圧応力を伝達する支圧板形式と、円筒型の形状を有する定着具を用いて支圧応力を伝達する円筒定着具形式とに大別される。

支圧板形式の設計方法は既往の諸研究から得た計算式やPC規準書¹⁾に示された設計法により、必要寸法を簡便に求めることが可能となっている。一方、円筒型定着具形式の設計方法はその定着具の形状・寸法によって応力伝達が異なり複雑であるため、計算式により求めるのは困難である。よって円筒型定着具を設計するには実大モデルによる性能確認試験を行う必要がある。

本研究では、大量生産時にコストが低減でき、形状の自由度が比較的大きい鋳鋼製の円筒型を有する小型定着具について載荷試験を実施し、応力伝達状況と耐力の調査を行った。

2. 定着具の形状・寸法の決定

これまでの研究²⁾により、FEM解析を基に形状・寸法を決定した円筒型定着具（以下、定着具 T_{ST} という）の性能確認試験を行い、破壊強度を把握し、定着具 T_{ST} が緊張材引張荷重 P_u に対し十分な耐力を有していることを確認した。定着具 T_{ST} の形状・寸法を図-1および表-1に示す。

定着具 T_{ST} が余裕度のある耐力を呈したため、さらに小型化・軽量化を、そして部材断面寸法に直接関係する定着具配置間隔とへりあき距離を更に縮小することを目標とした定着具の研究を行った。

上記の点に留意して定着具の寸法を、FEM解析ならびに鈴木らの方法³⁾を用いて算出し、形状は短尺の円錐台形状とした。この定着具（以下、定着具 T_{CO} という）の形状・寸法を図-2および表-1に示す。定着具 T_{CO} はその全長を定着具 T_{ST} の約40%とし、十分な支圧面積を確保するため最大外径を T_{ST} の130%とした。また、定着具の周囲を拘束するスパイラル筋の巻径を小さくするために、円筒型定着具の先端を窄ませて角度を設け、円錐台形状の定着具とした。スパイラル筋の巻径については、 T_{ST} に比べ15mm小さくした。

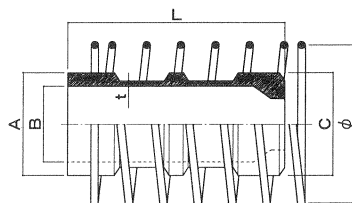


図-1 定着具 T_{ST} 形状

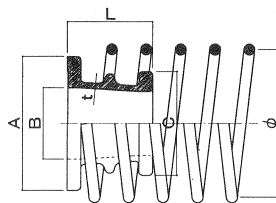


図-2 定着具 T_{CO} 形状

表-1 定着具寸法

| 定着具 タイプ | A [mm] | B [mm] | C [mm] | L [mm] | φ [mm] |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| T_{ST} | 150 | 110 | 150 | 315 | 230 |
| T_{CO} | 195 | 104 | 151 | 125 | 215 |

3. 試験概要

試算によって形状・寸法を決定した定着具 T_{CO} の性能を確認するために、この定着具をコンクリート中に配置して、載荷試験を実施して耐力の確認を行った。

供試体は直方体とし、断面寸法は実使用状態における最小へりあき寸法と最小配置間隔より決定した。供試体の寸法を表 - 2、図 - 3に示す。定着具 T_{CO} を用いることによって、供試体断面寸法(断面積)は定着具 T_{ST} に比べ81.1%に縮小された。

本定着具はPC圧着工法の2次ケーブル定着に使用することを想定しているため、コンクリートのプレストレス導入時強度は設計基準強度と同等とし、供試体コンクリート強度は 60N/mm^2 程度とした。載荷試験時のコンクリート圧縮強度は T_{ST} では 66.4N/mm^2 、 T_{CO} では 61.3N/mm^2 であった。

供試体中の定着具周囲に補強筋としてスパイラル筋を配置してあるが、供試体 T_{ST} に用いたのは細径異形PC鋼棒(SBPD: 耐力 $1,275\text{N/mm}^2$)であったが、供試体 T_{CO} では異形棒鋼(SD345: 降伏点 $345\sim 440\text{N/mm}^2$)とした。これは供試体 T_{ST} の試験結果より、レベル4時でもスパイラル筋には降伏ひずみの10%程度のひずみしか発生していないことから耐力に十分余裕があると判断し、 T_{CO} に用いるスパイラル筋は耐力の低いものを採用した。

載荷状態での応力伝達を確認するために、ひずみゲージを定着具の軸方向およびスパイラル筋の円周方向に貼り付けた。ひずみゲージ貼り付け位置を図 - 4に示す。図中の▲印はスパイラル筋、×印は定着具に貼り付けたひずみゲージである。また定着具のめり込み量を確認するために、アンカーヘッドのめり込み量およびコンクリート変形量について各々4個の変位計を用いて測定した。

4. 載荷および計測

載荷は単調増加載荷とし、供試体上面の定着具部分にアンカーヘッドを設置し、容量 $5,000\text{kN}$ 万能試験機にて載荷した。荷重段階を表 - 3に、載荷および計測器配置方法を図 - 5に示す。測定項目は、1)アンカーヘッドめり込み量、2)コンクリート変形量、3)コンクリート表面のひび割れ、4)定着体ひずみ、5)スパイラル筋ひずみの5項目とした。定着具のめり込み量をアンカーヘッドめり込み量からコンクリート変形量を減じて求めた。コンクリート表面のひび割れについては、各荷重段階で確認し、クラックスケールにてひび割れ幅を測定した。

5. 開発定着体の試験結果判定基準

一般的にPC定着具の性能判定は各定着工法で定められている基準のほかPC規準書に記載されている基準がある。本定着具に関しては客観的に性能を評価することができるPC規準書に記載されている判定基準を採用することとした。表 - 4に性能判定基準を示す。

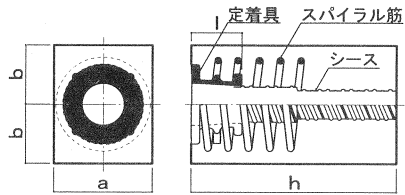


図 - 3 供試体の形状

表 - 2 供試体の寸法

| 定着具タイプ | a [mm] | b [mm] | h [mm] | l [mm] | F_c [N/mm^2] |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|
| T_{ST} | 260 | 165 | 550 | 315 | 60 |
| T_{CO} | 240 | 145 | 500 | 125 | 60 |
| T_{CO}/T_{ST} | 0.92 | 0.88 | 0.91 | 0.40 | — |

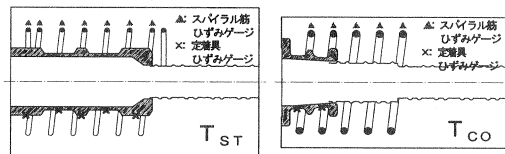


図 - 4 ひずみゲージ位置

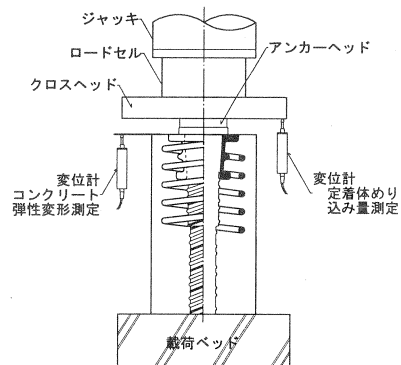


図 - 5 載荷および計測器配置方法

表 - 3 荷重段階

| 荷重段階 | 供試体 | | 備考 |
|------|-----------------------|------------|-------|
| | T_{ST} | T_{CO} | |
| 常時荷重 | $0.8 P_y$ | 1,497.6 kN | |
| レベル1 | $1.1 \times 0.85 P_y$ | 1,750.3 kN | 5分間保持 |
| レベル2 | P_y | 1,872 kN | 5分間保持 |
| レベル3 | $0.95 P_u$ | 2,086.2 kN | 5分間保持 |
| レベル4 | P_u | 2,196 kN | |

3段階の荷重レベルに対してコンクリート表面のひび割れ幅と定着具のめり込み量に基準値を設けて照査した。PC規準書では定着具のめり込み量に対する値は定められていないが、本定着具は円錐台型であるため定着具のめり込み量が性能に大きく影響すると考えられるため、軸対称モデルによる弾塑性FEM解析を行い、各荷重段階における変形を算出し、その結果からめり込み量に対する基準値(表中の◎)を定めた。

表 - 4 試験結果判定基準

| 荷重段階 | 適合すべき条件 |
|---|---|
| 1 1.1× 緊張材の 許容引張荷重 1,750.3kN (1.1×0.85P _y) | ・ひび割れ幅が0.1mmを以下であること。 5分間以上の持続載荷を行い、ひび割れが著しく進展しないことを確認すること。 ◎定着具のめり込みは0.2mm以内とする。 |
| 2 緊張材の規格降伏荷重 1,872kN (P _y =0.85P _u) | ・ひび割れ幅が0.2mm以下であること。 ・定着具に有害な変形、損傷、めり込み等めり込み等を生じないこと。 ◎定着具のめり込みは0.4mm以内とする。 |
| 3 0.95× 緊張材の 規格引張荷重 2,086.2kN (0.95×P _u) | ・コンクリートが、5分間以上安全に当該荷重を支持し得ること。 ・定着具に有害な変形、損傷、めり込み等を生じないこと。 ◎定着具のめり込みは1.0mm以内とする。 |

6. 試験結果

6.1 判定

試験から得た判定結果を表 - 5に示す。

表 - 5を見ると、PC規準書に示されている判定項目については、T_{ST}、T_{CO}とも各荷重段階でも判定基準を満たしている。しかしながらめり込み量についてはT_{ST}、T_{CO}ともにレベル1、レベル2において独自に定めた判定基準を超えている。ただし、各荷重段階においてT_{ST}はひび割れ幅が微細であり、T_{CO}はひび割れの発生がない。よっていずれも有害な変形とはいえず、またレベル3においてはT_{ST}、T_{CO}ともにいずれの判定基準も満足していることから、定着具の性能不足ではないと判断した。そして、最大荷重はT_{ST}が2,770kN、T_{CO}は3,300kN以上であった。最大荷重時のひび割れ状況を図 - 6に示す。供試体T_{ST}はスパイラル筋外周のコンクリートかぶりが薄い箇所に縦ひび割れが発生し、荷重レベルが上がるにつれこのひび割れが下方に進展した。供試体T_{CO}のひび割れ状況は、載荷面と側面の上部に定着具のめり込みによる約0.08mmのひび割れが発生したのみであった。

表 - 5 試験結果および判定結果

| 荷重段階 | 判定基準 条件 | 判定結果 | | | |
|------|-------------------|-----------------|----|-----------------|----|
| | | T _{ST} | | T _{CO} | |
| | | 測定値 | 判定 | 測定値 | 判定 |
| レベル1 | ひび割れ幅: 0.1mm以下 | 0.06 | ○ | なし | ○ |
| | 有害な変形・損傷・めり込み: なし | なし | ○ | なし | ○ |
| | めり込み量: 0.2mm以内 | 0.60 | × | 0.58 | × |
| レベル2 | ひび割れ幅: 0.2mm以下 | 0.10 | ○ | なし | ○ |
| | 有害な変形・損傷・めり込み: なし | なし | ○ | なし | ○ |
| | めり込み量: 0.4mm以内 | 0.64 | × | 0.63 | × |
| レベル3 | ひび割れ幅: 0.3mm以下 | 0.13 | ○ | 0.08 | ○ |
| | 有害な変形・損傷・めり込み: なし | なし | ○ | なし | ○ |
| | めり込み量: 1.0mm以内 | 0.74 | ○ | 0.72 | ○ |
| 最大荷重 | — | 2,771.4 kN | | 3,300 kN | |

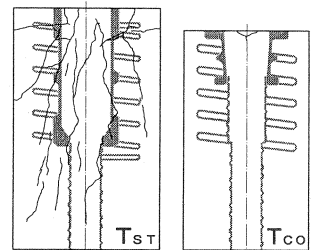


図 - 6 ひび割れ発生状況

6.2 荷重 - めり込み量関係

載荷試験から得た荷重と定着具のめり込み量の関係を図 - 7に示す。いずれの定着具もレベル3以下の荷重では同様の剛性を示し、グラフの挙動が線形であることから、弾性範囲内であると考えられる。T_{ST}は載荷荷重が2,200kN時にめり込み量が約0.2mm増加し、その後載荷荷重が2,500kNを超えるとめり込み量のみが増加している。一方、T_{CO}では3,300kNまで載荷を行ったが荷重 - めり込み量関係は線形的挙動を保持していた。これは、T_{CO}は定着具周辺のコンクリートがスパイラル筋によって有効に補強されていて、その拘束効果によりめり込み量が抑制されたと推測できる。なお、T_{CO}に関しては目標としていた荷重を十分に上回る荷重まで載荷したため、破壊に至るまでは載荷を行わなかった。

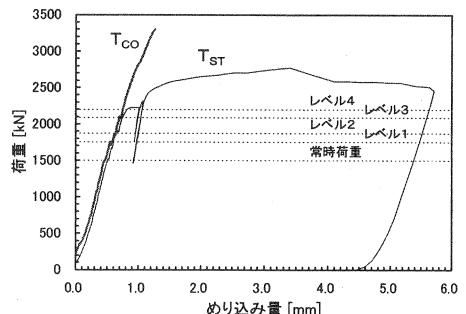


図 - 7 荷重 - めり込み量関係

6.3 ひずみ分布

試験から得た供試体 T_{ST} と T_{CO} の定着具, スパイラル筋の各荷重レベルのひずみ分布を図-8, 図-9に示す。

図-8によれば, T_{ST} の定着具ひずみは載荷面側のひずみが大きく, それ以外の位置では肉厚の薄いリブの谷間はひずみが大きく, リブ部分はひずみが小さい結果となっている。一方, 図-9によれば, T_{CO} の定着具ひずみ分布は定着具形状と同様な形状となっている。すなわち載荷面側のひずみは先端側のひずみよりも常に大きく, その差は最大荷重時で, $1,000 \mu$ 程度である。

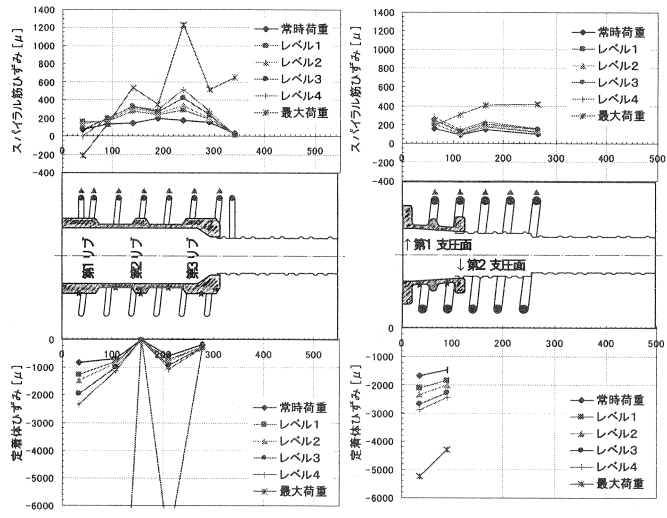


図-8 供試体 T_{ST} ひずみ分布 図-9 供試体 T_{CO} ひずみ分布

T_{ST} のスパイラル筋ひずみ分布については, 常時荷重時は一様に分布していたひずみは, その後最大荷重に到達するまでに定着具先端側が増加する傾向を示し, また第1リブに近い位置にあるスパイラル筋では, レベル2以降ひずみが減少している。 T_{CO} については, レベル4までは第1支圧面に近いほどひずみが大きく, 最大荷重時では第1支圧面に近い位置にあるひずみが減少し定着具先端側のひずみが増大している。これらのことから, いずれの定着具もひずみ分布形状は若干異なるものの, 概して常時荷重までは全体的にひずみが増加し, 載荷面直下のコンクリートにひび割れが発生するとともに定着具先端側のスパイラル筋ひずみが増大傾向を示す。これは載荷面直下のコンクリートにひび割れが発生し, 支圧力を負担できなくなり, 支圧力は定着具先端側のスパイラル筋で拘束されている健全なコンクリートで負担されると推測される。またスパイラル筋は載荷荷重の増大とともにひずみが増大しているため有効に作用しており, 耐力の増大につながっているといえる。今回の供試体 T_{CO} の試験では, レベル4時にはいずれの材料も降伏ひずみを超越するひずみは発生していなかった。

7. まとめ

PC圧着工法の緊張材定着具の小型化および配置寸法の縮小を図る目的で開発した円錐台形状を有する小型定着具の載荷試験を実施した結果, 以下のことが確認された。

- (1) 円筒型定着具に, 若干のテーパを与え円錐台形状とすることで配置間隔が縮小される。
- (2) 円筒型定着具の支圧応力作用位置は, 荷重が増大すると定着具先端側に移動する。
- (3) 円筒型定着具先端以降を適当に補強することで耐力が上昇する。

本研究によって開発された定着体 T_{CO} は, 従来のPC鋼より線定着具に比べ定着具最小配置間隔および最小へりあきを小さくすることが可能となったが, 耐力上は余裕があるため補強方法について配置位置, 寸法等を検討し, 改良を加えることで更に小型化できる可能性がある。

8. 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説: 日本建築学会
- 2) 境治彦, 丸田誠, 吉松敏行, 友住博明, 平井圭, 山村明子; “小型PC定着具の性能確認実験”, 日本建築学会学術講演梗概集, H13, PP. 953~954
- 3) 鈴木計夫, 中塚 佑: “円形補強筋をもつPC鋼材定着部の強度および破壊機構に関する研究”, 日本建築学会論文報告集, S57.5, PP. 17~26