超高強度コンクリートを用いた柱とその柱脚部に関する実験的研究 論文

竹中 啓之*1·菊田 繁美*1·濱田 聡*2·和泉 信之*3

要旨:超高強度コンクリートを用いた RC 造1 階柱とその直下の柱梁接合部近傍を模擬した試験体の載荷実 験をおこない,超高強度 RC 造柱の耐震性能,および超高強度 RC 造1 階柱が下階の柱梁接合部に与える影響 を実験的に検討した。実験に使用した1階柱部分のコンクリートの実強度は約180~190N/mm²であり,直下 の柱梁接合部のコンクリート強度は約 150N/mm² である。また、柱部および柱直下の接合部のコンクリート に鋼繊維を混入させることや、柱外周を鋼板で補強することで、超高強度 RC 造柱の耐震性能および靱性が向 上し、またコンクリート部分の損傷を抑える効果があることが確認できた。

キーワード:超高強度コンクリート,1階柱,柱脚柱梁接合部,鋼繊維補強,鋼板巻き補強

1. はじめに

著者らは、Fc130N/mm² 級のコンクリートを用いた 1 階柱とその柱脚部を模擬した試験体に関する載荷実験 を実施し,柱の耐震性能と,Fc130N/mm²級の1階柱が, その直下の、1 階柱よりコンクリート強度の低い柱梁接 合部に及ぼす影響を検討した¹⁾。また,柱のコンクリー ト強度については、実強度で約 150N/mm² のコンクリー トを用いた RC 造柱の実験を行い、その耐震性能を確認 している²⁾。本論文では、コンクリート強度については、 更に高強度を目指した1階のRC造柱とその直下の柱梁 接合部を模擬した試験体について載荷実験を行い、その

1400

ト加カスタブ

柱新面

500

耐震性能を確認した結果について報告する。また、超高 強度コンクリートを用いた RC 造柱に見られる大変形時 のかぶりコンクリートの飛散破壊や損傷を防止するた め、コンクリートに鋼繊維を混入³⁾させた試験体、およ び, 柱を鋼板で覆った試験体を用いて, 大変形時の破壊 性状の改善や耐力・靱性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

補強筋

-補硝筋

`¬

加力方向

ま合部/

1階柱

接合部

400

試験体の概要を図-1,試験体一覧を表-1に示す。試 験体は5体(UHRC21~UHRC25試験体)とし、大変形時の

> 柱かぶりコンクリート部の飛散破壊 の防止対策をとらない UHRC21 試験 体を基本試験体とする。試験体は, すべて, 柱とその直下の柱梁接合部, 基礎梁および下階の柱を模擬した約 1/4 縮尺とする。全試験体ともに柱せ ん断スパン比が 2.0, 1 階柱断面が 250mm×250mm, 下階柱断面が 315mm×315mm, 梁断面が 170mm× 250mm である。UHRC21 は, 柱コン クリートに鋼繊維を混入させない超 高強度コンクリート(以下,プレー ンコンクリートと呼ぶ)を用い,せ ん断補強筋比を 1.2%とする。 UHRC22 および UHRC23 は断面寸法 や鉄筋量はUHRC21と同じとし、柱 の耐震性の向上と大変形時のかぶり コンクリートの飛散防止を目的とし て, 柱部分のコンクリートに, UHRC22 では体積比で 0.5%,



下階柱断面

*3 千葉大学 大学院工学研究科建築・都市科学専攻教授 博(工) (正会員)

| 表一1 試験体一覧 | | | | | | |
|-----------|---------|---|-------------|-----------------|---------------------------------|--------|
| | | UHRC21 | UHRC22 | UHRC23 | UHRC24 | UHRC25 |
| 柱 | B×D(mm) | 250×250 | | | | |
| | 主筋 | 16+4-D13(USD685) Pg=3.25% | | | | |
| | 帯筋 | 4-U6.4@40(SBPD1275) pw=1.20% | | | 4-U6.4@50(SBPD1275) pw=0.96% | |
| | 軸力 | 3575kN(軸力比約 0.3) | | | | |
| | 備考 | ວ°Lາວາກ/II_k | 鋼繊維混入コンクリート | | プレーンコンクリート | |
| | |) | 0.50% | 1.00% | PL4.5(SS400)鋼板巻き | 0)鋼板巻き |
| | B×D(mm) | 下階柱を内包する 8 角形 | | | | |
| | 横補強筋 | 4-U6.4(SBPD1275) 4 セット | | | | |
| 按口叩 | 備考 | プレーンコンクリート 鋼繊 | | 維混入コンクリート 1.00% | | |
| | | 柱梁接合部にコーナー補強筋(D4(SD295A), 長さ330mm, 高さ方向に 50mm ピッチで配筋) | | | | |
| 梁 | B×D(mm) | 170×250 | | | | |
| | 主筋 | 4-D13(SD390) | | | | |
| | 肋筋 | 4-D6@50(SD295) | | | | |
| 下階柱 | B×D(mm) | 315×315 | | | | |
| | 主筋 | 12+(16+4)-D13(USD685) | | | | |
| | 帯筋 | 4-U6.4@40(SBPD1275) pw=1.90% | | | | |



写真-1 接合部概要

UHRC23 では体積比で1.0%の鋼繊維(長さ30mm,太さ 0.6mm)を混入させている。1 階柱直下の柱梁接合部に ついて、UHRC21 およびUHRC22 はプレーンコンクリー トとし、HHRC23 は柱部分と同様に体積比で1.0%の鋼繊 維をコンクリートに混入させている。UHRC24 は柱部分 にプレーンコンクリートを使用し、厚さ4.5mmのSS400 鋼板を巻き付けたもので、断面は基本試験体UHRC21 と 同様にしているが、せん断補強筋比は 0.96%と鋼板を巻 いていない柱よりも小さくしている。UHRC25 は UHRC24 の 45°方向加力とし、断面などはUHRC24 と 同様としている。UHRC24 およびUHRC25 の柱直下の接 合部はUHRC23 と同様に体積で1%の鋼繊維を混入させ ている。全試験体ともに、柱直下の柱梁接合部には、接 合部のコーナー補強として下階の柱を内包する大きさ

表-2 コンクリート材料試験結果

| - | | | | |
|------------|-------|------------|------------|------------|
| 試驗休夕 | 部位 | 圧縮強度 | わか 係数 | 割裂強度 |
| 마시께저 [가 기] | 비미고 | (N/mm^2) | (N/mm^2) | (N/mm^2) |
| | 柱(コア) | 186 | 47400 | - |
| | 柱 | 191 | 45700 | 6.1 |
| UHRC21 | 接合部 | 143 | 43200 | 6.3 |
| | 下階柱 | 98 | 40700 | 6.0 |
| | 梁・壁 | 64 | 36000 | 4.3 |
| | 柱(コア) | 187 | 45200 | - |
| | 柱 | 186 | 46700 | 7.5 |
| UHRC22 | 接合部 | 153 | 44500 | - |
| | 下階柱 | 104 | 40700 | 6.4 |
| | 梁・壁 | 70 | 36300 | 4.7 |
| | 柱(コア) | 187 | 46500 | - |
| | 柱 | 189 | 46800 | 9.1 |
| UHRC23 | 接合部 | 143 | 45400 | 7.3 |
| | 下階柱 | 105 | 41300 | 6.1 |
| | 梁・壁 | 69 | 35900 | 4.4 |
| | 柱(コア) | 192 | 46700 | - |
| | 柱 | 183 | 48700 | 7.5 |
| UHRC24 | 接合部 | 152 | 45800 | 6.5 |
| | 下階柱 | 107 | 42300 | 5.2 |
| | 梁・壁 | 71 | 36300 | 4.3 |
| | 柱(コア) | 192 | 46700 | - |
| | 柱 | 190 | 47800 | 7.7 |
| UHRC25 | 接合部 | 152 | 45800 | 6.5 |
| | 下階柱 | 108 | 43100 | 4.9 |
| | 梁・壁 | 69 | 37500 | 5.1 |

のハンチを設けており、ハンチにはコンクリートの割裂 防止のためコーナー補強筋を配筋している。コンクリー ト材料試験結果を表-2に、鋼材・鉄筋の材料試験結果

| 部位 | 径 厚さ | 材種 | 降伏 強度 (N/mm ²) | ヤング 係数 (N/mm ²) | 引張 強度 (N/mm ²) |
|-------------|---------|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 柱主筋 | D13 | USD 685 | 761 | 188400 | 958 |
| 梁主筋 | D13 | SD390 | 424 | 187600 | 600 |
| 帯筋 | U6.4 | SBPD 1275 | 1282 | 182000 | 1334 |
| 肋筋 | D6 | SD295 | 401 | 185700 | 526 |
| コーナー 補強筋 | D4 | SD295 | 310 | 165400 | 530 |
| 柱鋼板 | PL4.5 | SS400 | 306* | 206500 | 453 |

表-3 鉄筋・鋼材材料試験結果

*0.2%オフセット



写真-2 加力装置



図-2 加力スケジュール

を表-3 に示す。 コンクリートの圧縮強度は柱部分が プレーンコンクリート (UHRC21,24,25 用) で 183~ 191N/mm², 鋼繊維を 0.5%混入させたもの(UHRC22 用) で 186N/mm², 1.0%混入させたもの(UHRC23 用)で 189N/mm² となった。また, 試験体柱部分と同一の寸法 (250mm×250mm×1000mm) のコンクリートコア抜き 用の供試体を製作し, コア抜きテストピースの強度も調 べた。コア抜き強度はプレーンコンクリートで 186~ 192N/mm², 鋼繊維を 0.5%混入させたもので 187N/mm², 1.0%混入させたもので 187N/mm²となった。なお, 試験 体の柱部分とそれらのコンクリートテストピースは, コ ンクリートを打設してから 48 時間後に蒸気養生をおこ なった (80℃で 48 時間)。柱梁接合部コンクリートは, プレーンコンクリートで 143~153N/mm², 鋼繊維を 1.0% 混入させたコンクリートで 143~152N/mm² であった。 また, 下階柱は 98~108N/mm², 梁は 64~71N/mm²であ り, 柱主筋には USD685 材,梁主筋には SD390 材を, 柱・ 柱梁接合部および下階柱のせん断補強筋には SBPD1275 材,梁せん断補強筋には SD295A 材を使用した。

2.2 加力装置・加力スケジュール

加力装置を**写真-1**に、加力スケジュールを図-2に 示す。すべての試験体について、コンクリート強度に柱 断面積を乗じた値の約 0.3 倍の一定軸力を負荷させた状 態で、柱中央が反曲点となるように正負交番繰り返し水 平加力をおこなう。

3. 実験結果

3.1 実験経過

各試験体の 1/100rad.ピーク時と 1/20rad.ピーク時の状 況を写真-2 に、荷重変形角関係を図-3 に示す。荷重 変形関係の図には、P-δ効果を示す一点鎖線を併せて 記す。各試験体とも、1/100rad.で柱主筋が圧縮降伏した。 鋼板を巻いていない UHRC21, 22, 23 は 1/100rad.から 1/50rad.に向かうときに、柱端部コーナーのかぶりコンク リートが大きな音とともに、UHRC21は飛散し、UHRC22, 23は、鋼繊維の効果で圧壊および僅かなコンクリート表 面のみの飛散が見られた。かぶりコンクリートの飛散に より、荷重変形関係において一時的な耐力低下が見られ た。柱に鋼板を巻いた UHRC24, 25 も、他の試験体と同 様に 1/100rad.から 1/50rad.へ向かう最中にコンクリート が割れる音がしたが、鋼板を巻いていない試験体に見ら れた一時的な耐力低下は見られず、安定した履歴を示し た。1/50rad.以降は、すべての試験体で 1/20rad.の大変形 時まで耐力低下は見られず、安定した履歴を描いた。 柱直下の接合部については、各試験体ともに、1/300~ 1/200rad.で接合部側面に斜めひび割れが発生した。 1/25rad.終了時において,柱直下の接合部に鋼繊維を混入 させていない UHRC21 の接合部側面残留ひび割れ幅が 0.1~0.15mm であったのに対して、鋼繊維を混入させた UHRC23,UHRC24 の残留ひび割れ幅が 0.04~0.08mm 程 度と小さかったことから、ハンチを付けて接合部を拡幅 することで柱からの支圧力に対する接合部の損傷を小 さくでき¹⁾, さらに今回, 鋼繊維を混入させることによ ってひび割れ幅をより小さく抑える効果があることが わかった。



3.2 接合部状況

接合部に設けたハンチ部分のコーナー補強筋のひず み分布を UHRC21, UHRC23, UHRC24 について図-4 に示す。コーナー補強筋は図-1に示すように,接合部 のハンチに沿って縦方向に6段直筋を配している。図-4には,柱下面から数えて2番目3番目5番目のコーナ

ー補強筋のひずみ分布を示している。 3 体とも接合部上方のコーナー補強 筋は最大変形時にほぼ降伏ひずみに 達しており,コーナー補強筋が接合部 ハンチの割裂防止に効果があること が分かる。また, UHRC21, UHRC23, UHRC24 の順でコーナー補強筋のひ ずみが大きくなっているが,これは大 変形時において柱脚位置での柱コー ナーかぶりコンクリートは,コンクリ ートに補強をしていない UHRC21 で は柱端部の圧壊が進み,柱から接合部 に入る圧縮力が減少するためと考え られる。UHRC21 よりもコーナーか ぶりコンクリート部の圧壊の少ない UHRC23, さらには鋼板で柱を補強し, かぶりコンクリートの圧壊がさらに 少ない UHRC24 の順で接合部に入力 される圧縮力が増え,コーナー補強筋 のひずみが大きくなっていると考え られる。実験終了時の接合部の状況を 写真-3に示す。

3.3 鋼板のひずみ分布

UHRC24,UHRC25 の柱に巻いた鋼 板の水平方向ひずみの分布を図-5 に示す。UHRC24 において,加力方 向と並行する面では最終サイクルま で鋼板は降伏には至らなかった。加力 方向と直行する面の鋼板は1/50rad.で 降伏に至り,そのひずみ分布形状から, 特に柱の上下で拘束効果を発揮して いることが分かる。45 度方向加力と した UHRC25 の鋼板のひずみ分布に ついても,柱水平変形角1/50rad.以降 で降伏に至ることなど,UHRC24 と ほぼ同様な傾向を示していることが わかる。

4. 考察

4.1 包絡曲線と試験体耐力の比較

各試験体の包絡曲線の比較を図-6に、諸耐力の比較を表-4に示す。 包絡線の比較より,柱を鋼板で巻いた もの以外は柱水平変形角 1/100rad.か ら1/50rad.へ向かうサイクルで、かぶ りコンクリートの圧壊により柱の耐 力が一時的低下した影響で耐力の上







写真-4 実験終了時の接合部の状況



図-5 鋼板のひずみ分布

昇割合が小さくなり,耐力が頭打ちとなっていることが 分かる。UHRC21は1/50rad.に最大耐力(703.7kN)を示し た。UHRC22 は UHRC21 より 1%, UHRC23 は 2%しか 最大耐力は増加しなかったものの, UHRC23 では最大耐 力発生点が 1/33rad. となり、また最大耐力以降も UHRC21 より高い耐力を維持し、鋼繊維の効果によって 柱の靱性が向上したことが分かる。UHRC24はUHRC21 と同じく 1/50rad.で最大耐力を示したが、その値は鋼板 を巻いていない UHRC21 に比べて約 20%上昇した。 1/50rad.以降も UHRC23 以上の耐力を維持しつづけ、鋼 板を巻くことによって最大耐力・靱性ともに向上したこ とが分かる。また、UHRC24 と UHRC25 の比較により、 45 度方向加力になると最大耐力で約 7%最大耐力が小 さくなった。実験時の曲げひび割れ強度は、UHRC21と UHRC22 ではほぼ同じであったが、鋼繊維を 1.0%混入 させた UHRC23 では1割程度の強度の上昇が見られた。

実験値と計算値を比較すると、断面分割法により得ら れた UHRC21 の最大曲げ強度計算値について、UHRC21 ~UHRC23 では、(実験値/計算値)が 0.95~0.99 とな り,計算値は若干大きめの値となっているが、概ね強度 を評価できると考えられる。また、UHRC24 については 0.93 となり、計算値は実験値をやや大きめに評価してい る。UHRC24 については、コンクリート部分をすべてコ ンファインドコンクリートとした。

4.2 等価粘性減衰定数

各試験体の等価粘性減衰定数の推移を図-7 に示す。 UHRC22 の推移が他に比べて若干低く, ばらつきはある ものの, すべての試験体で柱主筋降伏後の 1/100rad.以降 は, ほぼ同じ傾向を示した。

5. まとめ

実強度で 180~190N/mm² のコンクリートを用いて, プレーンコンクリート柱・コンクリートに鋼繊維を混入 させた柱・鋼板を巻いた柱について行った載荷実験結果 より得られた知見を以下に記す。

- (1) 柱コンクリートに鋼繊維を混入させたものはプレー ンコンクリート柱より靱性が向上し、鋼板を巻いた ものは耐力・靱性ともに向上することが分かった。
- (2) 180~190N/mm² 級のコンクリート柱直下の接合部は 2割程度強度を落とした 150N/mm²級のコンクリート を用いて、コーナーを拡幅させることや、コンクリ ートに鋼繊維を混入させるなどの対策をとることで 接合部の損傷を小さくできることが分かった。
- (3) コンクリートに鋼繊維を混入させた柱は、靱性能の 向上は確認できたが、今回の混入量では最大曲げ耐 力に及ぼす影響は小さく、鋼繊維を考慮しない断面 分割法で概ね曲げ耐力を評価できると考えられる。



表一4 試験体諸耐力

| UHRC | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| exMc | 194 | 195 | 213 | — | — |
| cMc | 182 | — | — | — | — |
| exMmax | 346 | 349 | 359 | 422 | 393 |
| cMmax | 362 | _ | _ | 455 | _ |

exMc:曲げひび割れ強度実験値(kN·m) cMc:曲げひび割れ強度計算値(kN·m) exMmax:最大曲げ強度実験値(kN·m)

cMmax:コアコンクリートを New RC で提案されたコンファイ ンドコンクリートとした断面分割法による最大曲げ強度計算値 (kN·m)



参考文献

- 菊田繁美,和泉信之,濱田聡,竹中啓之:超高強度 コンクリートを用いた1階柱とその柱脚接合に関す る実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.553-558, 2007.7
- 菊田繁美,千葉脩,羽鳥敏明,飯塚信一:超高強度 材料を用いた鉄筋コンクリート柱に関する実験研 究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.781-786, 2004.7
- 井戸康浩,菊田繁美,梅本宗宏,端直人:鋼繊維補 強した超高強度コンクリートの基礎的研究,日本建 築学会大会学術講演梗概集(中国)A-1分冊, pp.527-528,2008.9