

論文 局所的に劣化した RC 柱の圧縮性状に関する研究

安田 卓^{*1}・八十島 章^{*2}

要旨：局所的に生じたコンクリートの変状・構造的欠陥が RC 部材の圧縮性状に及ぼす影響を把握することを目的とし、局所的劣化を模擬した RC 柱部材の中心圧縮試験を行った。変状・構造的欠陥の模擬は、スリットによる鉄筋腐食ひび割れ、押出發泡ポリスチレンの埋め込みによるかぶり欠損、鉄筋切削による鉄筋腐食の断面減少とした。実験結果より、軸応力-軸ひずみ関係におけるスリット、かぶり欠損および鉄筋切削が及ぼす影響を把握した。破壊過程については、スリットおよび欠損部分を起点としてひび割れが進展し、変状領域に損傷が集中することが確認された。

キーワード：変状、局所的劣化、鉄筋腐食、低強度コンクリート、かぶり、中心圧縮

1. はじめに

高度経済成長期に鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物が数多く建設された。竣工から 50 年ほど経過しているため、これらの RC 構造物の多くが耐用年数に近づいており、近い将来、コンクリートの変状や構造的劣化が顕在化することが危惧される。特に、軸力を保持する曲げ柱が変状による材料劣化やジャンカ等の欠陥により、コンクリートが局所的破壊を引き起こし、想定以下の靱性で軸力保持能力を早期に喪失する場合には、それを起点とした柱の連鎖的破壊が発生して層崩壊に至る可能性も考えられる。

既往の研究¹⁾では、鉄筋が腐食した際に生成される腐食生成物の発生による体積膨張を原因としたコンクリートのひび割れを対象として、切削による鉄筋腐食およびスリットによるひび割れを模擬した RC 柱部材の中心圧縮試験が行なわれた。その結果、ひび割れを模擬したスリットおよびコンクリートの破壊の局所化が、軸応力-軸ひずみ関係の最大応力以降の挙動に影響を及ぼす可能性が指摘された。

本研究では、変状・構造的欠陥による圧縮特性の劣化度合いに着目し、変状により破壊の局所化を伴う RC 曲げ柱部材の構造性能低下に与える影響の把握を目的とする。既往の研究で用いられたスリットによるひび割れの模擬および切削による鉄筋腐食の模擬に加え、押出發泡ポリスチレンの埋め込みによるかぶり欠損を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、単一材料の変状・欠陥や複合劣化の相互作用が圧縮特性に及ぼす影響を把握する。

2. 実験概要

2.1 模擬方法

本研究で対象とする変状・構造的欠陥の現象は鉄筋腐食によるひび割れおよび鉄筋断面減少、かぶりの部分的な浮き・剥離、鉄筋腐食による付着劣化、ジャンカ（豆

板）や加水行為による圧縮強度低下である。変状・構造的欠陥の再現については、電食や暴露では変状を発生させる位置や量を制御することが困難であるため、ポリプロピレンシートや押出發泡ポリスチレンの埋め込みを利用して量と位置を制御する。変状を発生させる量は肉眼でははっきり確認できる程度とし、震災建築物の被災度区分判定²⁾における損傷度 II～IV 程度とする（表-1）。

コンクリートのひび割れは、図-1 に示すようにポリ

表-1 震災建築物の被災度区分判定

柱，耐力壁 の損傷度	損傷内容
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以下)
II	肉眼でははっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅 0.2～1mm 程度)
III	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極わずか (ひび割れ幅 1～2mm 程度)
IV	大きなひび割れ (2mm を超える) が多数生じ、コンクリートの剥落も著しく鉄筋がかなり露出している。
V	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱(耐力壁)に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜がみられるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。

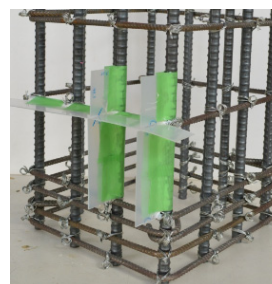


図-1 ひび割れの模擬

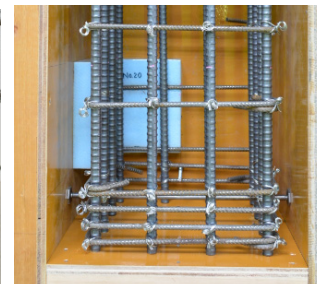


図-2 浮き・剥離の模擬

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系准教授 博士 (工学) (正会員)

プロピレンシートをコンクリート打設前に主筋および横補強筋の表面に接着し、コンクリートにスリットを入れることにより模擬した。ひび割れ幅に対応するポリプロピレンシートの厚さは1mmである。浮き・剥離は、図-2に示すように押出発泡ポリスチレンを型枠に貼り付けて打設し、脱型時に取り除くことにより模擬した。

鉄筋の腐食は、既往の研究³⁾を参考に、軸方向断面の腐食形状を切削により模擬した。かぶりコンクリート側から鉄筋腐食が卓越することを考慮して、ディスクサンダーを用い、図-3に示す鉄筋径の2倍の領域を切削した。切削は鉄筋腹部の最小径位置における切削深さにより行い、公称断面積と等価な断面積を有する楕円に対して、断面積比（切削率）が30%となるように決定した。切削長さは鉄筋径の2倍とし、切削位置は変状領域内の横補強筋の間の中央とした。なお、鉄筋の付着を完全に切るために、切削部にはビニールテープを貼付した。

2.2 試験体

試験体の形状および配筋を図-4に示す。主筋に用いた異形鉄筋D13および横補強筋に用いた異形鉄筋D6の引張試験結果を表-2に、コンクリートの材料試験結果を表-3に示す。試験体は実大の曲げ柱の1/2スケールで、配筋は1971年以降の耐震基準に基づく設計とした。試験体の断面は300mm×300mm、高さ600mmとし、主

筋にはD13の異形鉄筋を12本、横補強筋2-D6@100を配した。試験体上端から525mmを試験区間 L とし、変状位置は、曲げ柱の柱脚部での局所化変状を目論むため、試験区間下部0.5 D 区間（ D ：柱せい）に集中させた。ま

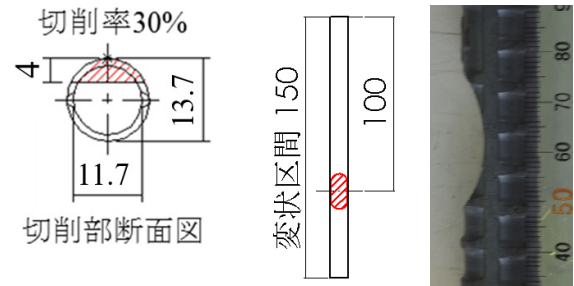


図-3 鉄筋切削による腐食の模擬

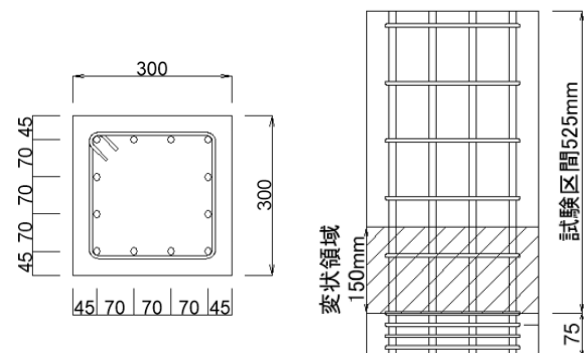


図-4 試験体の配筋

表-2 鉄筋引張試験結果

種別	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D13	500	353	190
D6	552	418*	206

*0.2%オフセット耐力

表-3 コンクリート材料試験結果

目標 強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 時歪 (%)
Fc9	11.4	16.7	0.248

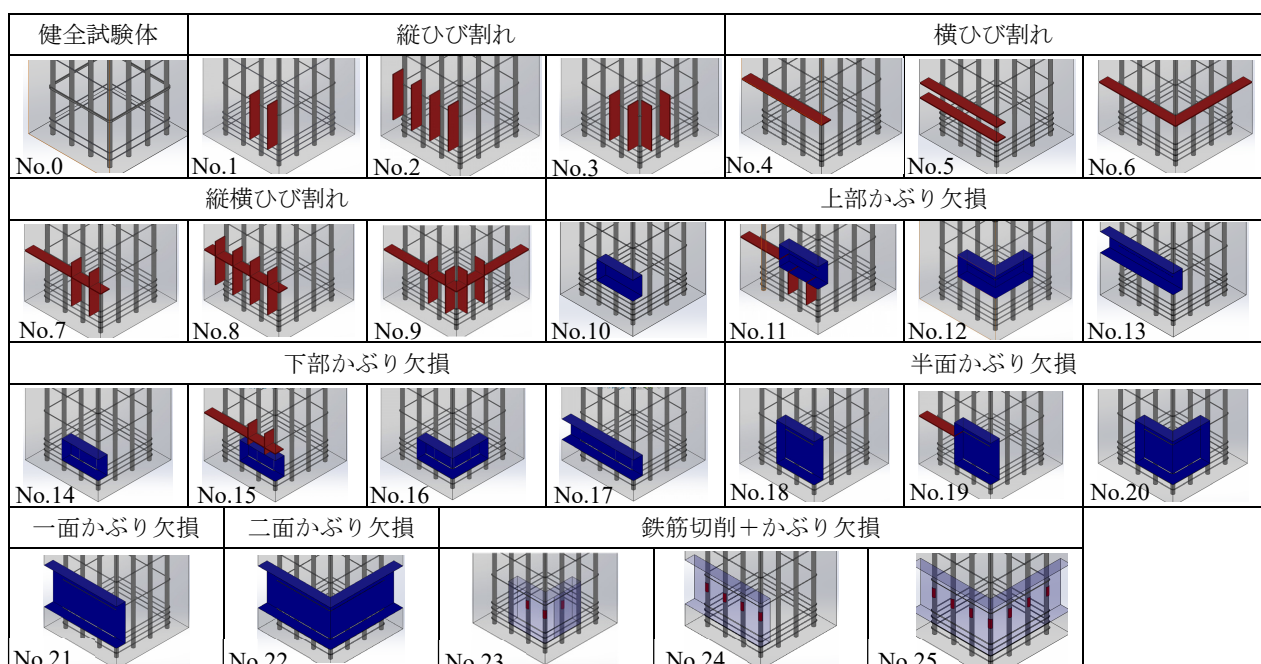


図-5 変状・構造的欠陥を模擬した試験体一覧

た、加水行為による圧縮強度の低下を再現するため、目標圧縮強度 9MPa の低強度コンクリートを利用した。コンクリートの材料試験は、試験体加力の前後で行い、現場封緘養生の 100φ×200mm シリンダーによる圧縮試験結果の平均値とした。

試験体一覧を図-5 に示す。試験体は健全試験体 No.0-1～No.0-3 の 3 体を含める全 28 体である。No.1～No.3 は主筋の腐食、No.4～No.6 は横補強筋の腐食による体積膨張に伴って発生したかぶりコンクリートのひび割れを再現し、No.7～No.9 は主筋および横補強筋の腐食により発生したひび割れを再現している。No.10 は変状領域の右上部、No.14 は右下部、No.18 は右半分、No.12、No.16 および No.20 は隅角部のかぶりが剥離した試験体で、No.11、No.15 および No.19 はかぶり剥離とひび割れの複合劣化を再現している。No.13 は変状領域の上部、No.17 は下部、No.21 は一面全て、No.22 は二面のかぶりが剥離した試験体である。No.23、No.24 および No.25 は被災度区分判定における損傷度 IV 程度を想定し、かぶり剥離部分の鉄筋が断面欠損している試験体である。No.3、No.9、No.12、No.16、No.20、No.22、No.23 および No.25 は変状・構造的欠陥が二面に生じたものを想定している。

2.3 加力・計測方法

加力および計測方法を図-6 に示す。加力には 2MN ユニバーサル万能試験機を用いて、一方向単調圧縮载荷を行った。計測項目は軸圧縮力および試験区間の軸方向変形量である。変位計は全ての面に 2 本ずつ等間隔に設置した。载荷に伴う変位計設置用インサートの変形を補正できるようにし、外側の変位計計測値から内側の変位計計測値の 2 倍を差し引くことにより、試験体表面における軸方向変形量として算出した。

3. 実験結果

3.1 軸応力-軸ひずみ関係

実験結果一覧を表-4 に、全試験体の軸応力-軸ひずみ関係を図-7 に示す。軸応力は荷重を試験体断面 300mm×300mm の断面積で除した値とし、軸ひずみは試験区間変形量を試験区間長 525mm で除した値である。

いずれの試験体も軸ひずみ 1%以降において、かぶりコンクリートの剥落が生じ、それに伴い緩やかな応力低下が確認された。軸ひずみ 2%付近から横補強筋のフックが外れ、横補強筋による拘束効果が小さくなり、軸応力が最大応力の半分程度まで低下した。軸ひずみ 3%程度では、試験体中央部のかぶりコンクリートがほぼ剥落し、主筋の座屈が確認された。最大応力以降の圧縮軟化挙動は、急激な応力低下が起らず、軟化勾配は緩やかな傾向が見られた。そこで、変状・構造的欠陥の圧縮特性に与える影響を把握するために、最大応力および応力軟化勾配に関して、ひび割れ長さ、かぶり欠損量、鉄筋

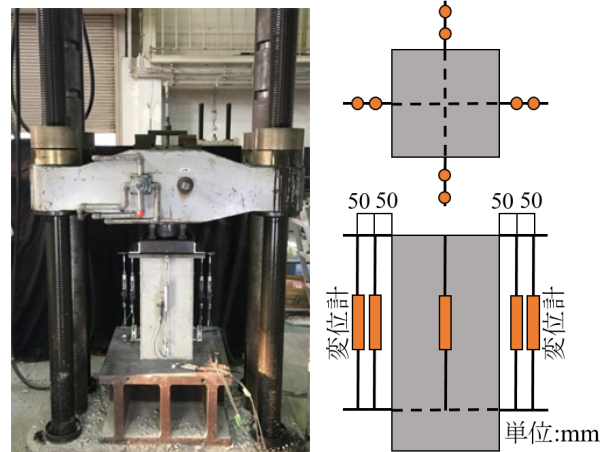


図-6 加力・計測方法

表-4 実験結果一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大応力 (MPa)	最大応力時の歪(%)
No.0-1	1305	14.5	0.34
No.0-2	1290	14.3	0.41
No.0-3	1320	14.7	0.36
No.1	1324	14.7	0.37
No.2	1284	14.3	0.43
No.3	1284	14.3	0.46
No.4	1300	14.4	0.40
No.5	1314	14.6	0.36
No.6	1301	14.5	0.32
No.7	1304	14.5	0.39
No.8	1316	14.6	0.31
No.9	1289	14.3	0.34
No.10	1285	14.3	0.36
No.11	1271	14.1	0.40
No.12	1282	14.2	0.37
No.13	1228	13.6	0.36
No.14	1269	14.1	0.39
No.15	1277	14.2	0.35
No.16	1261	14.0	0.38
No.17	1235	13.7	0.40
No.18	1255	14.3	0.39
No.19	1273	14.1	0.41
No.20	1228	13.6	0.36
No.21	1218	13.5	0.35
No.22	1138	12.6	0.37
No.23	1246	13.8	0.35
No.24	1178	13.1	0.38
No.25	1129	12.5	0.48

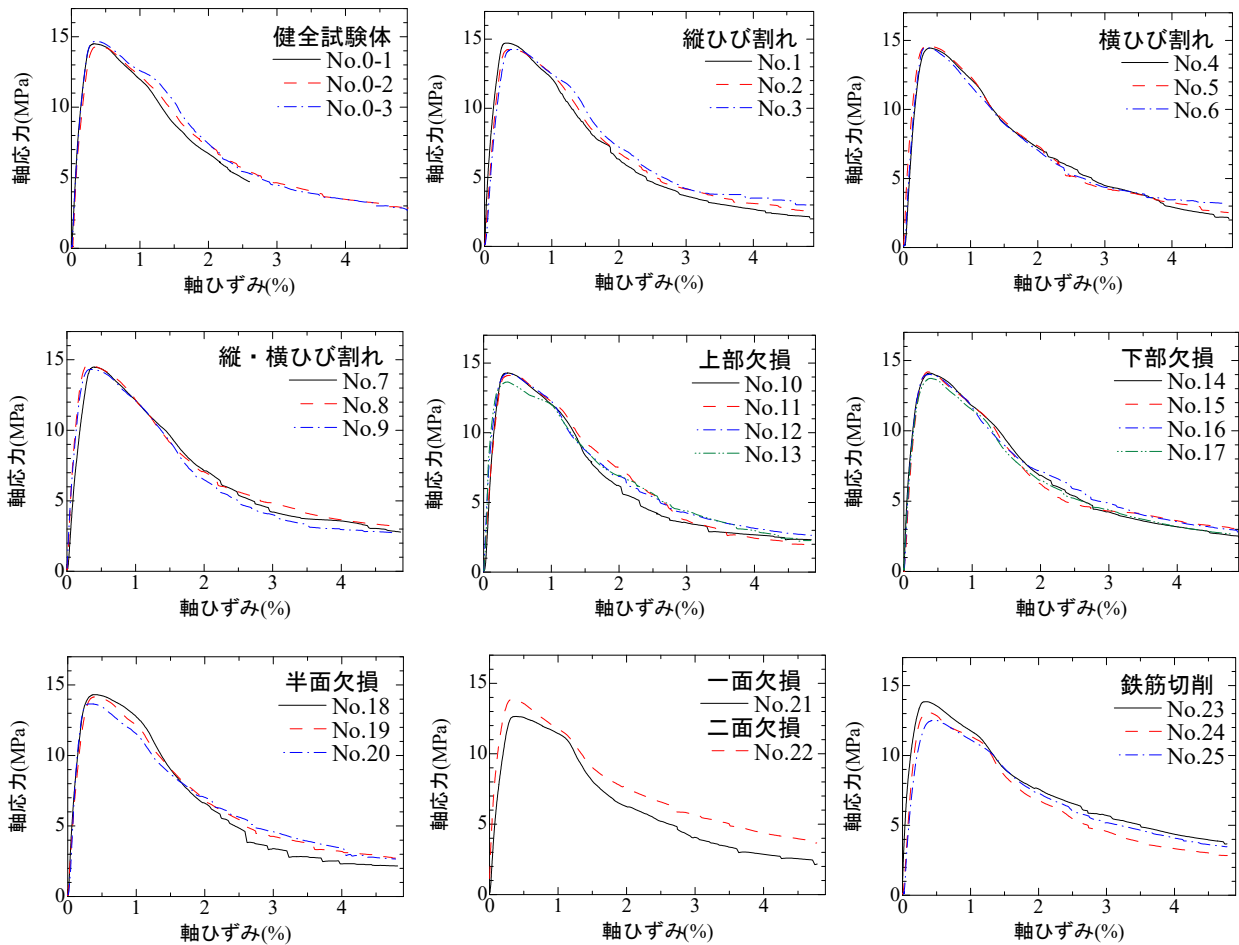


図-7 軸応力-軸ひずみ関係

切削有無の影響を検討する。検討した応力軟化勾配は、かぶりコンクリートの剥落が生じた程度までを対象とし、各試験体の軸応力-軸ひずみ関係を最大応力および最大応力時ひずみで基準化して、最大応力から応力が 20%低下した点までの直線回帰による傾きと設定した（図-8）。

(1) ひび割れ長さによる比較

最大応力および基準化応力の軟化勾配-ひび割れ長さ比の関係を図-9 に示す。ひび割れ長さ比 L_{cr}/L^0 は、スリット長さの和を試験区間長で除した値である。なお、図中には、最小二乗法による回帰計算の結果も示している。

スリットでひび割れを模擬した試験体 No.1~No.9 の最大応力は、健全試験体 No.0 とほぼ同じ値であり、スリットの量および位置は最大応力にほとんど影響しないことが確認できる。また、スリットを入れる面数の比較では、一面のみに設置した試験体と二面に設置した試験体の最大応力はほぼ同じであった。また、基準化応力の軟化勾配については、ひび割れ長さ比およびスリットの量・位置に関わらず、いずれの試験体も健全試験体 No.0 と同様であり、回帰直線の傾きもほぼゼロであった。局所的な領域におけるスリットの量および位置は、応力軟化勾配にほとんど影響を及ぼさないことが確かめられた。

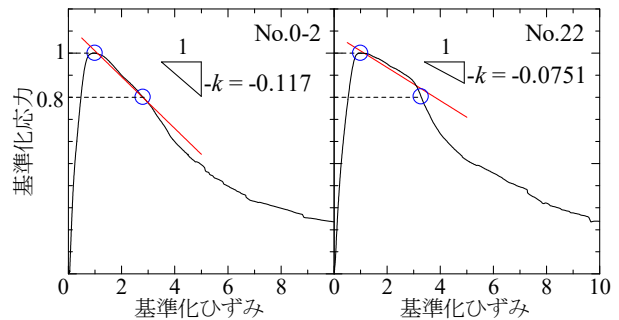


図-8 基準化応力の軟化勾配 k の例

(2) かぶり欠損による比較

最大応力および基準化応力の軟化勾配-かぶり欠損比関係を図-10 に示す。かぶり欠損比 V_{loss}/V_{cover} は、押出発泡ポリスチレンによるかぶり欠損部の体積 V_{loss} を試験区間におけるかぶりコンクリートの体積 V_{cover} で除した値である。スリットと押出発泡ポリスチレンを併用した試験体 No.11, No.15, No.19 については、かぶり欠損のみを考慮した。なお、図中には、最小二乗法による回帰計算の結果も示している。

かぶりの部分的な浮き・剥離を模擬した試験体 No.10~No.22 は、健全試験体 No.0 と比較して、最大応力が低くなり、試験体 No.20~No.22 とかぶり欠損の量が増える

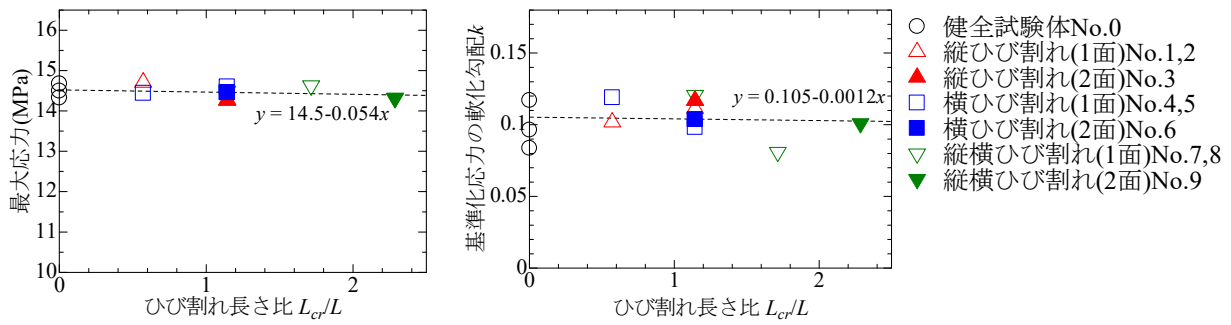


図-9 最大応力および基準化応力の軟化勾配－ひび割れ長さ比関係

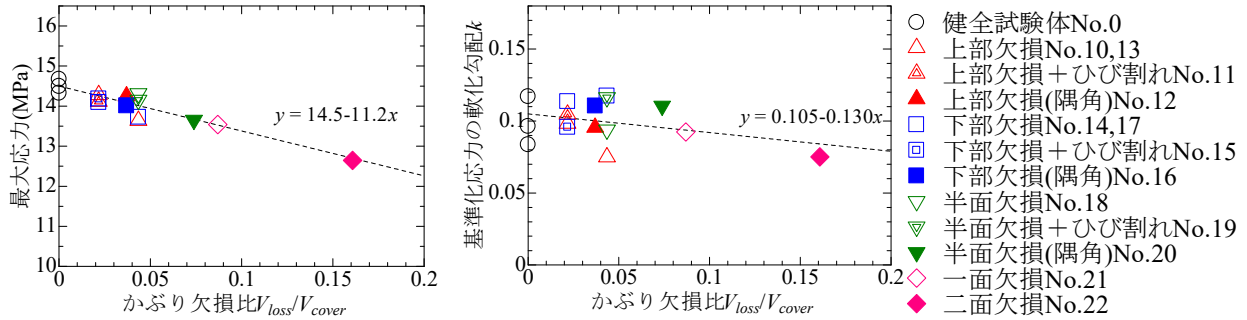


図-10 最大応力および基準化応力の軟化勾配－かぶり欠損比関係（かぶり欠損による比較）

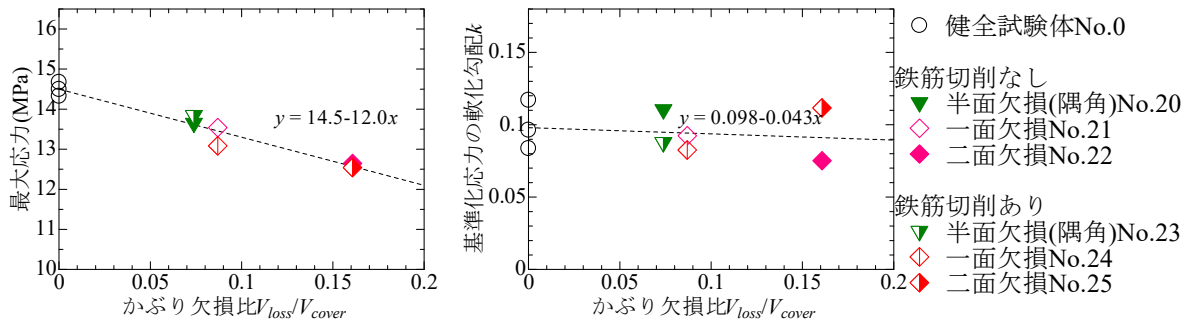


図-11 最大応力および基準化応力の軟化勾配－かぶり欠損比関係（鉄筋切削の有無による比較）

につれて、最大応力の低下が顕著であった。基準化応力の軟化勾配は、かぶり欠損の量が増大すると緩やかになり、かぶり欠損比と関連することが確かめられた。かぶり欠損位置による影響は、最大応力では見られなかったが、基準化応力の軟化勾配では上部かぶり欠損の試験体のほうが下部かぶり欠損の試験体よりも若干緩やかになる傾向が見られた。スリットによる模擬ひび割れとかぶり欠損の複合劣化については、かぶり欠損による影響が支配的で、スリットと押出発泡ポリスチレンの併用による圧縮特性への影響はほとんど確認されなかった。

(3) 鉄筋切削の有無による比較

かぶり欠損部における鉄筋切削の有無で比較した、最大応力および基準化応力の軟化勾配－かぶり欠損比関係を図-11に示す。なお、図中には、最小二乗法による回帰計算の結果も示している。最大応力については、鉄筋切削の有無による違いがほとんどなく、かぶり欠損量が主な影響因子であることがうかがえる。基準化応力の軟

化勾配については、鉄筋切削を隅角部に施した試験体 No.23 および一面に施した試験体 No.24 は、鉄筋切削のない試験体よりも軟化勾配が緩やかになる傾向が見られた。一方、鉄筋切削を二面に施した試験体 No.25 は、鉄筋切削のない試験体よりも軟化勾配が急であった。

3.2 破壊状況

試験体の軸ひずみ 1%付近での代表的な破壊状況を図-12に、最終破壊状態を図-13に示す。健全試験体 No.0 は、中央部からひび割れが生じ、徐々にかぶりが剥落しながら荷重低下に至った。試験体 No.7 はスリットを起点とし、試験体上部に向かってひび割れが進展する損傷過程が確認できた。また、変形が進むにつれ、スリット間に横方向のひび割れが生じ、変状領域に損傷が集中した。試験体 No.13, No.15 および No.20 についてもかぶり欠損部分付近からひび割れが発生しており、変状領域周辺に損傷が集中した。かぶりの欠損が一面である試験体 No.13, No.15 および No.20 は変状領域を有する面の損傷

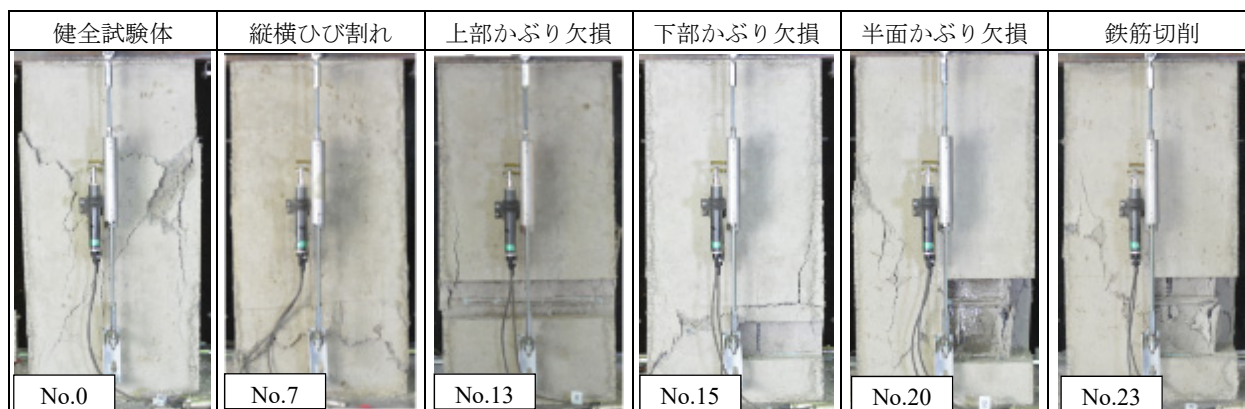


図-12 軸ひずみ 1%付近での破壊状況

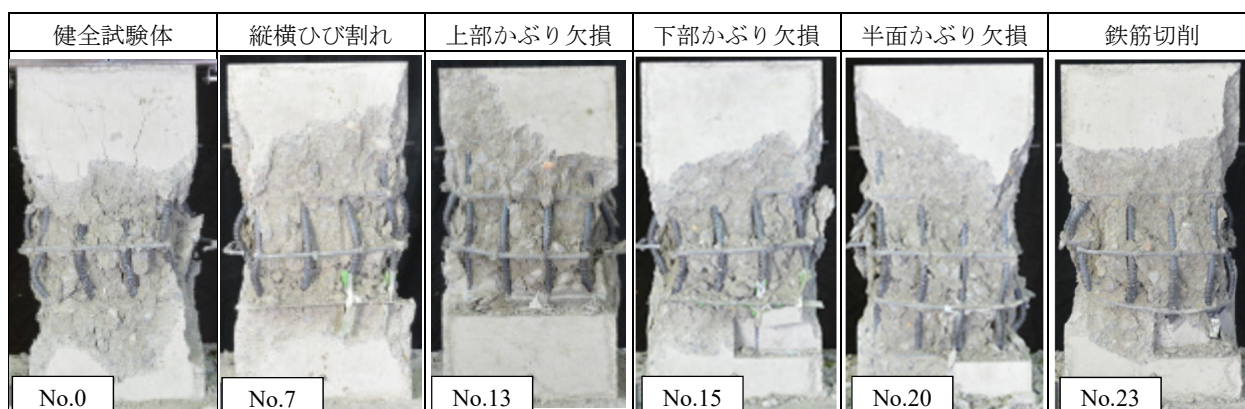


図-13 最終破壊状態

は少なく、対面側の損傷が顕著であった。No.20 と No.23 の比較においては、鉄筋切削の有無による破壊過程の違いは確認されなかった。

最終破壊状態においては、スリットの位置や程度に関わらず、スリットを有する試験体は健全試験体と同様に試験体中央部で主筋の座屈が発生して最終破壊に至った。かぶり欠損の試験体では、かぶりコンクリートおよび横補強筋による拘束効果が小さいために、かぶり欠損付近で主筋の座屈が生じて最終破壊に至った。また、鉄筋切削の試験体においては、かぶりコンクリートの拘束効果がないために、切削位置が座屈の基点となり、主筋の座屈形状も他の試験体と若干異なっていた。柱の最終破壊においては、スリットの量と位置はほとんど影響せず、かぶり欠損量が主な影響因子であることが示唆された。

4. まとめ

局所の変状・欠陥を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、圧縮特性を把握した。以下に得られた知見を示す。

- (1) スリットの量および位置は、最大応力にほとんど影響しないことが確認できた。応力軟化勾配についても、局所的な領域におけるスリットの量と位置による影響はほとんどなかった。
- (2) かぶり欠損の量が増加するにつれて、最大応力が低下し、最大応力以降の軟化勾配は緩やかになる傾向

が確認された。

- (3) 鉄筋切削の有無と最大応力および最大応力以降の軟化勾配との明瞭な関係は見られなかった。

今後、本実験と同様の変状・構造的欠陥を有する柱試験体を用いた曲げせん断加力実験を行い、局所的劣化による曲げ柱の構造性能低下レベルを評価する予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費助成事業（基盤研究（C）課題番号 18K04423）の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 藻川哲平，八十島章，金久保利之，大屋戸理明：鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.151-156，2016.7
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，財団法人 日本建築防災協会，pp.19-21，2001
- 3) 墨野倉駿，金久保利之，八十島章，大屋戸理明：腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.973-978，2015.7