論文　部分的に主筋の付着を切った RC 梁･RC 有孔梁に関する研究

真田　暁子[*1]・丸田　誠[*2]

要旨：危険断面からの一定区間の主筋の付着を切った，部分アンボンド梁 RC 部材，部分アンボンド RC 有孔梁部材の基本的な構造性能を把握するために，アンボンド区間長，開孔の有無を因子とした部材実験を実施した。実験結果から，主筋をアンボンド化することにより，危険断面に損傷が集中してひびわれ本数が減少し，有孔梁に適用した場合に開孔周りのせん断ひび割れ幅が抑制されるなど，損傷低減効果が確認された。また，これらの試験体を非線形 FEM で解析した結果，荷重-変形関係，損傷状況ともに良好にシミュレーションできた。

キーワード：部分アンボンド，アンボンド区間，有孔梁，ひび割れ幅，非線形 FEM 解析

1. はじめに

近年，RC 部材の主筋の付着を部分的に切った部分アンボンド RC 部材[1)]や部分アンボンド RC 有孔梁[2)]に関する研究が盛んであり，部分アンボンド RC 部材ではアンボンド区間に損傷が入りにくいためひび割れ本数が減少すること，開孔周辺の主筋の付着を切った部分アンボンド RC 有孔梁では開孔部のせん断破壊が発生しにくくなることなどが報告されている。

しかし，既往の研究で検討された部分アンボンド RC 梁部材は，せん断応力度のレベルが小さいこと[1)]，部分アンボンド RC 有孔梁部材では開孔位置・アンボンド区間長に関する検討が無く，また開孔周辺の補強筋量が多く配筋が煩雑であること[2)]などの課題があった。そこで，一般的な高層建物の梁部材に適用可能な部分アンボンド RC 梁･有孔梁部材の構造性能を把握するために，アンボンド区間長，開孔位置，開孔周辺の補強筋量を因子とした構造実験を実施した。また，平面保持やトラス機構の仮定が成立しない部分アンボンド RC 部材の耐力及び変形性能の評価が可能か検証するため非線形 FEM 解析による検討も実施した。

2. 構造実験

2.1 試験体

表－１に試験体一覧とコンクリートの圧縮強度 σ_B と引張強度 σ_t，**表－２**に鉄筋材料強度一覧，**図－１**に試験体配筋図を示す。実験因子は主筋のアンボンド区間，開孔の有無，開孔位置，開孔補強筋の有無の組合せとした。試験体はいずれも，断面 b×D=240mm×360mm，M/QD=2.5 と同一形状とし，片側一段配筋とした。また，アンボンド区間は危険断面からの一定区間

表－1　試験体一覧

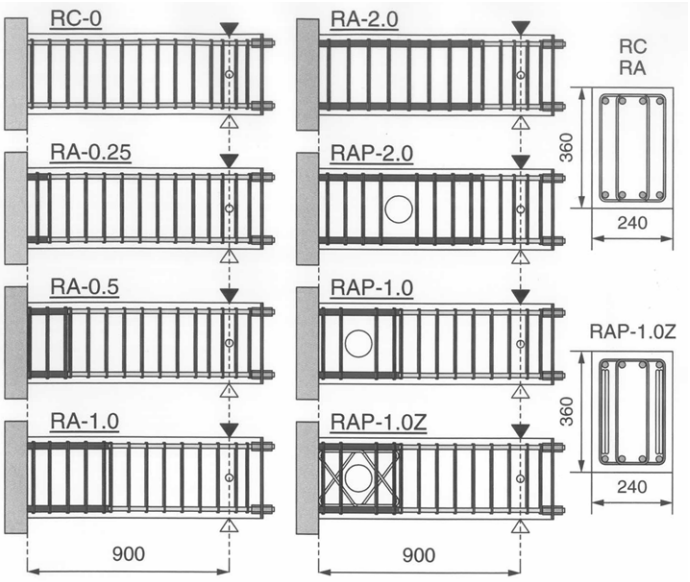
試験体名	断面	M/QD	σ_B (N/mm^2)	σ_t (N/mm^2)	主筋	横補強筋	アンボンド区間	開孔位置	開孔補強	備考
RC-0	240mm × 360mm	2.5	34.5	2.8	4-D19 (SD490)	4-D6 @80 (SD295)	－	－	－	RC
RA-0.25			35.1	2.8			0.25D			アンボンド区間 0.25D~2.0D
RA-0.5			35.1	2.8			0.5D			
RA-1.0			34.5	2.8			1.0D			
RA-2.0			35.7	3.0			2.0D			
RAP-2.0			35.7	3.0				1.0D	無	開孔無補強
RAP-1.0			36.3	2.9			1.0D	0.5D	無	開孔無補強
RAP-1.0Z			36.3	2.9					Z 筋	開孔補強 Z 筋

試験体名：（構造形式）-（アンボンド区間）-（補強方法）σB：コンクリート圧縮強度，σt：コンクリート引張強度
構造形式：RC（RC），RA（部分アンボンド），RAP（部分アンボンド有孔梁），補強方法： Z（Z 筋）

*1 鹿島建設(株)　技術研究所　建築解析グループ　研究員　修士（工学）(正会員)
*2 鹿島建設(株)　技術研究所　建築構造グループ　上席研究員　博士（工学）(正会員)

（0~2.0D，D:梁せい）とし，開孔を設けた部分アンボンドRC有孔梁ではアンボンド区間の中央（0.5Dor1.0D）を開孔位置とした。主筋の付着を切るアンボンド区間は，主筋に厚さ2mmに粘土を巻きつけ，粘土の上にテフロンテープを巻き，コンクリートと縁を切った。

RC-0，RA-0.25，RA-0.5，RA-1.0，RA-2.0（以降，RAシリーズ）は，アンボンド区間長を実験因子とした試験体で，アンボンド区間を 0～2.0D とした。RAP-1.0，RAP-1.0Z，RAP-2.0（以降，RAPシリーズ）は，開孔位置及び開孔補強筋の有無を実験因子とした試験体で，RAP-1.0Z は平行四辺形型の閉鎖型の開孔補強筋（以降，Z筋[5]）を4 枚用いて開孔部を補強し，RAP-1.0，RAP-2.0ではいずれも開孔補強筋を設けなかった。



図－１　試験体配筋

2.2 載荷方法

試験体は片持ち梁形式で，載荷は梁端部に取り付けたジャッキを用いて，変形角R=0.125%～R=10.0%までの正負交番繰返し載荷を行った。

3. 実験結果の検討

3.1 実験値と計算値との比較

表－３に実験値と計算値との比較を示す。曲げ耐力の算定には，平面保持が仮定されるため，部分アンボンド RC 部材は適用外と考えられるが，参考として示した。また，せん断耐力の算定も，アンボンド区間にトラス機構が成立するとして，一般のRC部材と同様に算出した。

表－２　鉄筋材料強度一覧

径	材質	降伏強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	備考
D19	SD490	519	694	主筋
D10	SD345	379	534	Z筋
D6	SD295	388	547	横補強筋

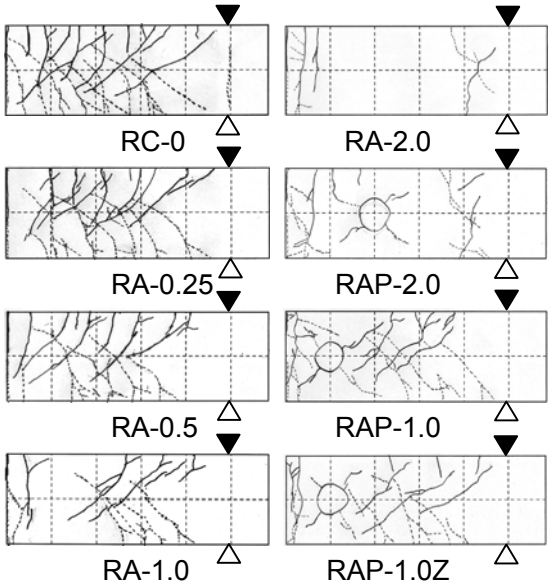
表－３　実験値－計算値比較

試験体名	実験値 kN	曲げ耐力*1 kN	せん断耐力*2 kN
RC-0	210	191［1.10］	174［1.21］
RA-0.25	214	191［1.12］	174［1.23］
RA-0.5	208	191［1.09］	174［1.20］
RA-1.0	193	191［1.01］	174［1.11］
RA-2.0	181	191［0.95］	174［1.04］
RAP-2.0	181	191［0.95］	174［1.04］
RAP-1.0	186	191［0.97］	174［1.07］
RAP-1.0Z	201	191［1.06］	174［1.16］

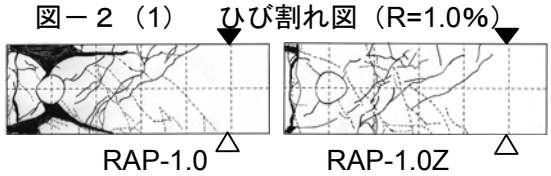
*1：RC 規準[3]による曲げ強度略算式による計算値，*2：AIJ-終局指針[4]のせん断耐力計算式（A法）による計算値（Rp=0.02）
［　］：実験値／計算値

3.2 損傷状況

図－２に全試験体の変形角 R=1.0%時のひび



図－２（1）　ひび割れ図（R=1.0%）



図－２（２）　ひび割れ図（R=3.0%）

割れ図と，変形角 R=3.0%時の RAP-1.0, RAP-1.0Z 試験体のひび割れ図を示す。危険断面位置は図の左端である。

アンボンド区間を設けた試験体では，アンボンド区間にひび割れが発生しにくく，危険断面近傍に入る一本の曲げひび割れが大きく開いた。材端に開孔を設けた試験体では，開孔補強筋の有無によって破壊状況が大きく異なった。開孔補強筋の無い RAP-1.0 では，R=2.0%以降に開孔部せん断ひび割れが進行したが，開孔補強筋を設けた RAP-1.0Z では開孔部せん断ひび割れの進行を Z 筋で抑制でき，その有効性が確認された。

3.3 せん断力－変形角関係

図－３にせん断力－変形角関係を示す。図中には**表－３**中の曲げ耐力計算値を併せて示す。アンボンド区間を設けた試験体では，曲げひび割れが早期に発生し，アンボンド区間が長い試験体ほど，曲げひび割れ発生時のせん断力が小さくなる傾向が見られた。アンボンド区間が 0.5D 以下の RA-0.25，RA-0.5 では，RC-0 とほぼ同様のせん断力－変形角関係を示した。アンボンド区間が 1.0D 以上の試験体では，アンボンド区間が長い試験体ほど RC 部材より曲げ耐力が低下し，降伏時の変形が大きくなった。

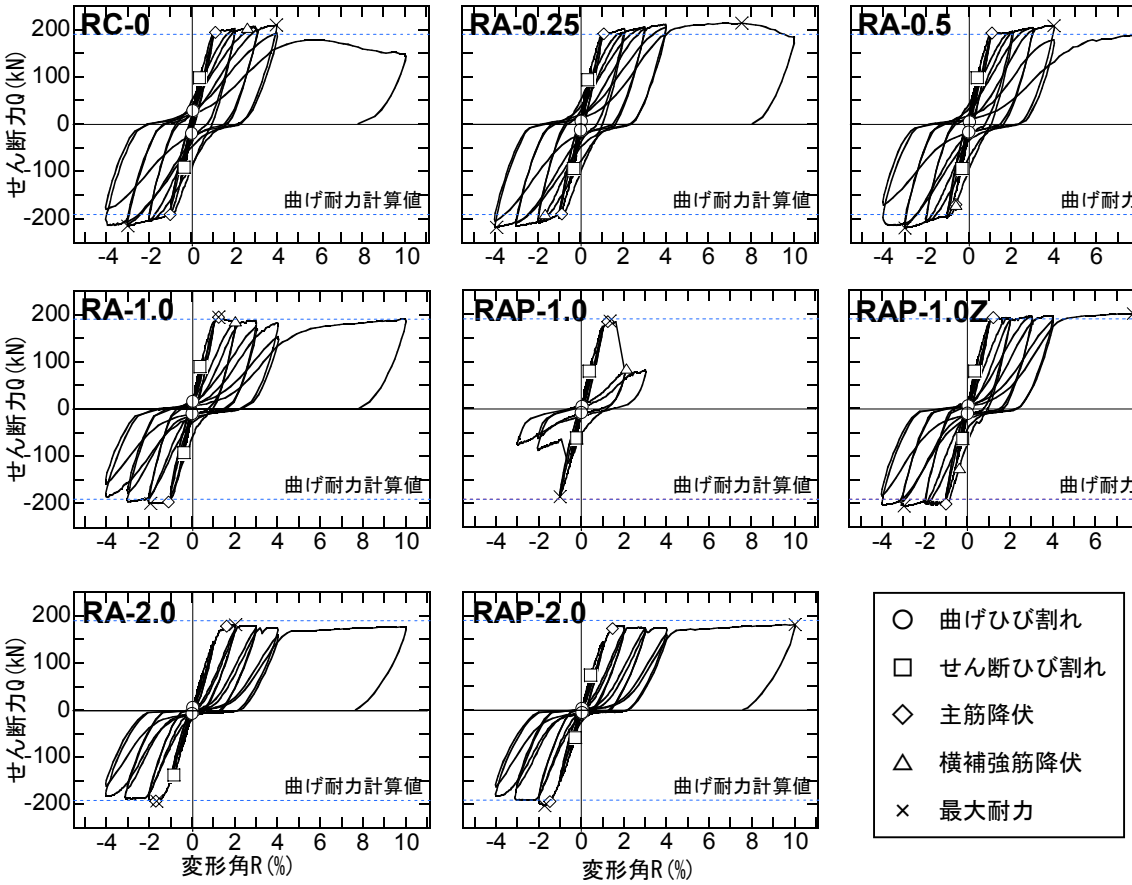
RC-0 の主筋降伏時のせん断力，変形角を RA-1.0, RA-2.0 の値と比較すると，RA-1.0 では，せん断力は RC-0 試験体と同じ値で変形角は 9.9%増加，RA-2.0 ではせん断力は 7.8%減少，変形角は 45.9%増加した。また，アンボンド区間が長い試験体では，除荷時にスリップ性状が顕著になり，履歴面積が減少する傾向が見られた。

梁端に開孔を設けた，RAP-1.0 と RAP-1.0Z の比較では，開孔補強筋を設けることによって変形能が格段に改善した。梁中央に開孔を設けた RAP-2.0 は開孔の影響が全く見られず，RA-2.0 とほぼ同様のせん断力-変形角関係を示した。

3.4 ひび割れに関する検討

（1）アンボンド区間長（RA シリーズ）

RA シリーズの RC-0, RA-0.25, RA-0.5, RA-1.0,



図－３　せん断力－変形角関係

RA-2.0 のひび割れ総数，危険断面近傍で発生した最も大きな曲げひび割れのピーク時のひび割れ幅（以降，最大ひび割れ幅）と除荷時のひび割れ幅（以降，除荷ひび割れ幅）を検討した。

図－４に R=1.0%時に正側載荷で観察されたひび割れ総数とアンボンド区間長との関係を，**図－５**に最大ひび割れ幅とアンボンド区間長との関係を，**図－６**に各載荷ピーク時の最大ひび割れ幅－変形角関係を，**図－７**に除荷ひび割れ幅－変形角関係を示す。ひび割れ総数は正側載荷で発生した，曲げ，せん断，付着など全てのひび割れを足し合わせて算出した。

アンボンド区間が長い試験体ほど部材に発生するひび割れ本数が少なく，危険断面近傍の曲げひび割れが大きく開いた。通常の設計範囲となる R=1.0%以下では，最大ひび割れ幅が大きくても，除荷ひび割れ幅は 0.3mm 以下に収まった。

（2）有孔梁（RAP シリーズ）

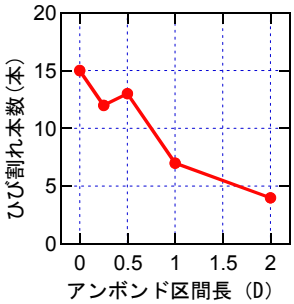
RC 有孔梁を部分アンボンド RC 有孔梁とすることで，開孔周りの補強筋量や，開孔部せん断ひび割れが低減できるか検証するため，既往の RC 有孔梁の実験結果[5]との比較を行った。比較を**図－８**に示す。NK2-33 は主筋量（引張鉄筋断面積 A t ×降伏強度 σ y），曲げ耐力，開孔位置，開孔径，開孔補強筋量，破壊形式（曲げ降伏型）ともに RAP-1.0Z とほぼ同じ試験体である。開孔は開孔補強筋（Z 筋）と座屈補強筋で補強した。

図－９に NK2-33 と RAP-1.0，RAP-1.0Z，RAP-2.0 の各載荷ピーク時の開孔部せん断ひび割れ幅－変形角関係を示す。破壊形式が開孔部せん断破壊となった RAP-1.0 を除いて，部分アンボンド RC 有孔梁の開孔部せん断ひび割れ幅は RC 有孔梁の約半分に抑えられた。また，従来の RC 有孔梁と比較すると，梁端に開孔を設けた部分アンボンド RC 部材では座屈補強筋を，梁中央に開孔を持つ部分アンボンド RC 部材では開孔補強筋を無くしても，部材の構造性能に影響を与えないことが確認された。

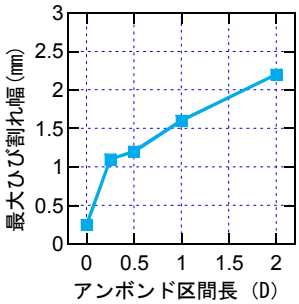
4. 非線形 FEM 解析

4.1 解析概要

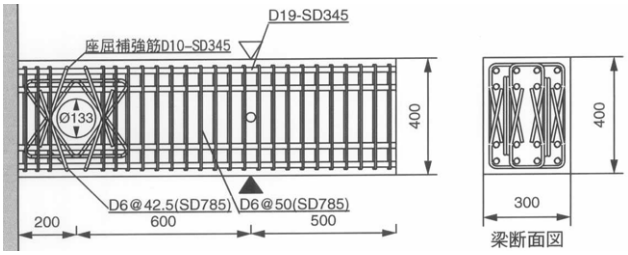
部分アンボンド RC 部材では主筋とコンクリート間の付着を部分的に切るため，アンボンド区間の平面保持仮定やトラス機構が成立せず，既往の RC 部材の曲げ耐力，せん断耐力評価式では耐力評価が難しい。そこで，汎用非線形 FEM



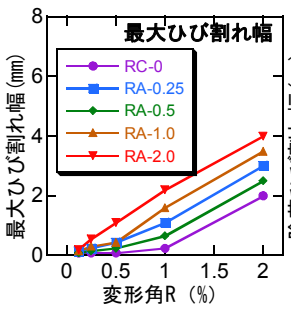
図－４　ひび割れ総数

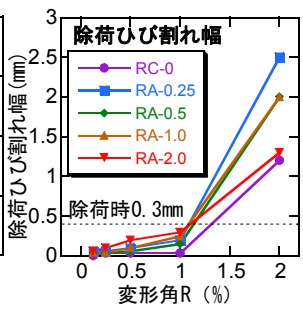


図－５　ひび割れ幅

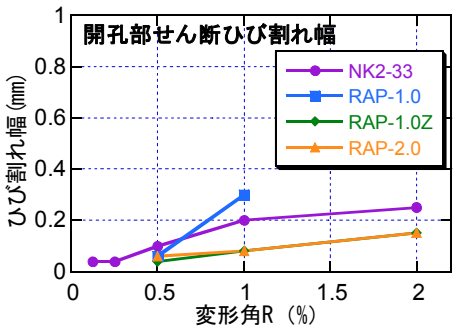


図－８　RC 有孔梁配筋図（NK2-33）[5]





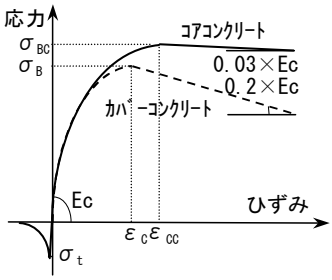
図－６　最大ひび割れ幅　図－７除荷ひび割れ幅

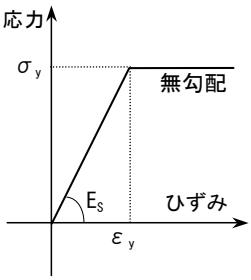


図－９　開孔部せん断ひび割れ幅比較

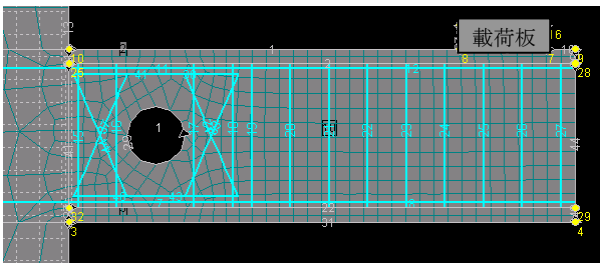
解析プログラム ATENA2D[6] を用いた一方向漸増載荷解析を実施し，部材の耐力及び破壊形式を解析により追跡できるか検討を行った。

図－１０に，解析に用いたコンクリートの応力－ひずみ関係，**図－１１**に鉄筋の応力－ひずみ関係，**図－１２**に代表的な試験体の要素分割を示す。試験区間のコンクリートはカバーコンクリートと，コアコンクリートの二種類とし，カバーコンクリートの圧縮強度 σ_B，圧縮ひずみ ε_C には材料強度試験結果を，コアコンクリートの圧縮強度 σ_{BC}，圧縮ひずみ ε_{CC} には NewRC[7] 式による拘束効果を考慮した計算値を用いて算定を行った。コンクリートの圧縮強度到達後の軟化勾配は，RC-0 の実験結果と解析結果が同程度となるように，軟化勾配を因子としたパラメトリック解析を行い決定した。主筋及び横補強筋は線材にモデル化し，横補強筋は試験体と同位置に配置した。





図－１０ コンクリート特性 図－１１鉄筋特性



図－１２　試験体要素分割

コンクリートの材料特性には圧縮側の非線形性，破壊力学に基づく引張側の破壊特性，ひび割れ後の圧縮強度の低減，ひび割れ後のせん断剛性の低減を考慮できる ATENA 独自の材料特性 SBATA-Material[8] を用いた。鉄筋は材料試験結果から得られた降伏ひずみと降伏強度を用い，バイリニア型とした。コンクリートと鉄筋間の付着は，ボンド部主筋と補強筋は完全付着，アンボンド区間は付着無しとした。解析は変位制御で，**図－１２**右上の載荷板中央（回転は自由）に変位を与えて行った。

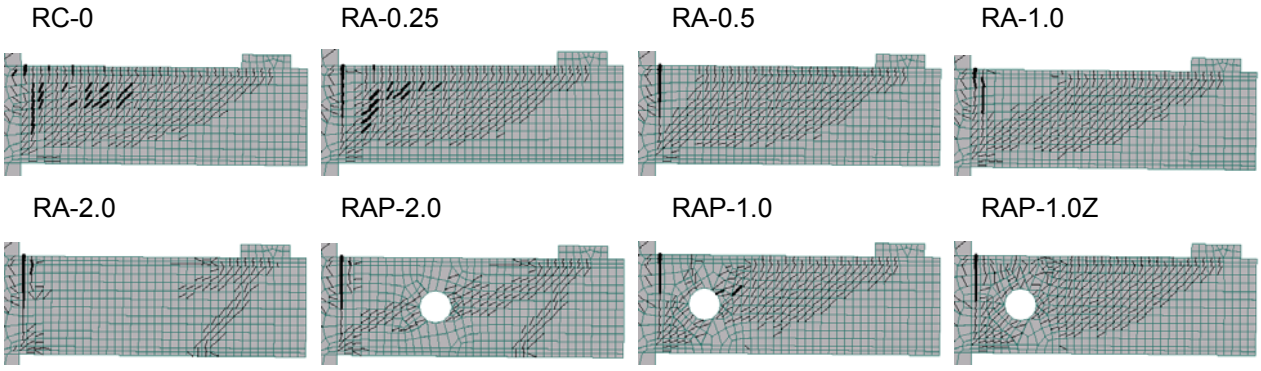
4.2 解析結果

（1）損傷状況

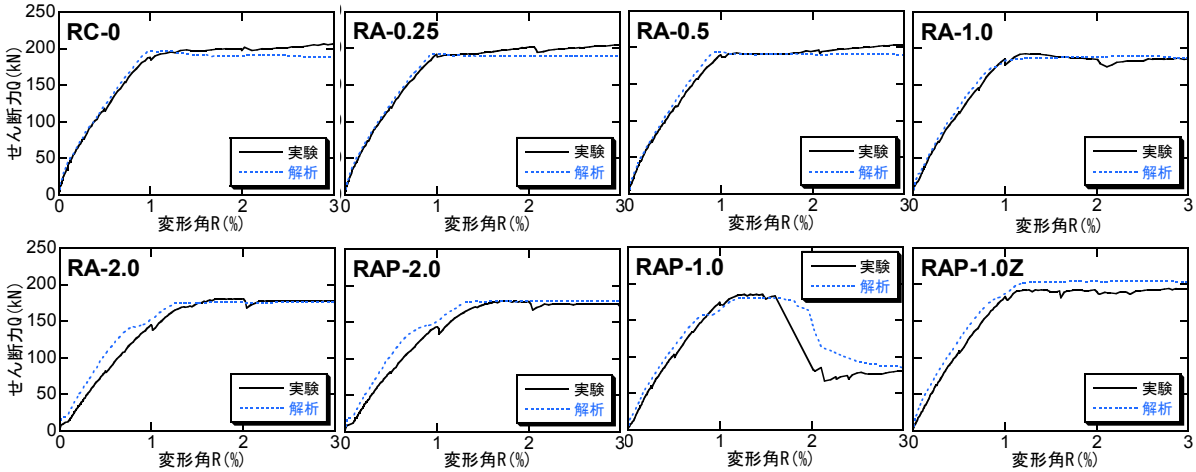
図－１３に R=1.0%時の各試験体のひび割れ分布を示す。ひび割れ幅が大きなものほど，図中のひび割れ幅も大きく表示されている。アンボンド区間を設けた試験体では，アンボンド区間のひび割れ本数が減少し，危険断面近傍の曲げひび割れ幅が大きくなる現象が解析的にも表現できた。また，梁端に開孔を設けた試験体では，開孔補強筋を設けることで開孔周りに集中していた開孔部せん断ひび割れが，アンボンド区間全体に分散した。

（2）せん断力－変形角関係

図－１４に全試験体の実験結果のせん断力－変形角関係の包絡線と解析結果を併せて示す。いずれのケースでも，解析は実験を精度良く追跡できた。アンボンド区間が短い RA-0.25，RA-0.5 の荷重－変形関係は RC-0 とほとんど変



図－１３　ひび割れ分布（変形角 R=1.0%）



図－１４　せん断力－変形角関係

わらないこと，アンボンド区間が長くなるに従い，降伏時変形が大きくなり，耐力は小さくなることなど，非線形 FEM 解析でも実験と同様の傾向を示した。

梁端に開孔を設けた RAP-1.0 と RAP-1.0Z では，開孔補強筋を設けることにより開孔部せん断ひび割れの進行が抑えられる効果があるため，破壊形式が曲げ降伏後の開孔部せん断破壊から曲げ破壊に変化することも解析的に表現できた。

5. まとめ

部分アンボンド RC 部材，部分アンボンド RC 有孔梁に対する実験的，解析的検討を行い，下記の結果を得た。

(1) 主筋の付着を部分的に切ることにより，部材に発生するひび割れの本数が減少して，危険断面近傍の曲げひび割れが大きく開いた。アンボンド区間が長い試験体ほどこの傾向が顕著であった。

(2) アンボンド区間の長さが 0.5D 以下の部分アンボンド RC 試験体の荷重－変形関係は，RC 試験体の荷重－変形関係とほぼ同様であった。アンボンド区間の長さが 1.0D を超えると，降伏時変形が増加し，曲げ耐力は低下する傾向が見られた。

(3) 開孔上下の主筋の付着を部分的に切った部分アンボンド RC 有孔梁試験体では，既往の RC 有孔梁よりも小さな開孔部補強筋量で，開孔部せん断ひび割れ幅を抑制し，開孔部せん断破壊を防止できた。

(4) 部分アンボンド RC 試験体，部分アンボンド RC 有孔梁試験体を対象とした非線形 FEM 解析を実施し，せん断力-変形角関係，損傷状況ともに解析は実験を良好に追跡できた。

(5) 部分アンボンド RC 梁部材の設計方法，設計への非線形 FEM 解析の適用方法については，今後の検討課題とする。

参考文献

1) 川島一彦ほか：塑性ヒンジ区間で主筋をアンボンドした鉄筋コンクリート柱脚の履歴特性，土木学会論文集，689/I-57, pp.45-64, 2001.10
2) 平石久廣ほか：降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発，日本建築学会構造系論文集，No.580 号, pp.99-104, 2004.6
3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999.
4) 日本建築学会：鉄筋コンクリートの終局強度型耐震設計指針･同解説，1990.
5) 鈴木紀雄ほか：部材端開口を有する鉄筋コンクリート梁の補強法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.355-360, 2005.
6) Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, Prague, 2001.6
7) 国土開発技術研究センター：NewRC 研究開発概要報告書（平成 4 年度），1993.3
8) プレストレストコンクリート技術協会：PC 構造の設計における非線形解析の応用，pp.2.16-2.17，2003.6