

4.2.4 鉄筋コンクリート梁部材（有孔梁を含む）の復元力特性評価

1) 曲げ性状が卓越する RC 梁の復元力特性の評価について

曲げ性状が卓越する鉄筋コンクリート（RC）梁部材の復元力特性の定量的な評価手法は、例えば本会の「鉄筋コンクリート建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」（2004年）の「実用的評価手法 5. 梁部材の性能評価法」において詳述されている。特に降伏変形の評価については、曲げ変形、せん断変形、梁主筋の柱梁接合部パネルからの抜け出しによる付加変形、および梁部材のひび割れや引張主筋に沿った付着劣化による付加変形の四つの成分の和より求める方法を提案した。十字形等の柱梁部分骨組実験の結果を用いた検証によってその精度は、菅野の剛性低下率を用いた方法による降伏変形の推定精度と同等以上の精度を有することが確認された。

これに対して梁部材が終局状態に到達したときの変形を定量的に評価する方法については検討が不足している。同指針（案）には、かぶりコンクリート圧壊時の変形を上述の降伏変形の算定にならって四つの変形成分の和として求める手法が説明されているが、実験結果を用いたその精度の検証はほとんどなされていない。わずかに十字形柱梁部分骨組試験体三体の実験結果を用いてその算定精度を検証した研究^{4.2.4.1)}では、かぶりコンクリート圧壊時の梁の変形を同指針（案）によって算定した場合、実験値を2.0倍から4.6倍も過大に評価する場合があります、その場合には柱梁接合部からの主筋の抜け出しによる付加変形と梁のひび割れや引張主筋に沿った付着劣化による付加変形とを過大評価したことが原因であると指摘した。

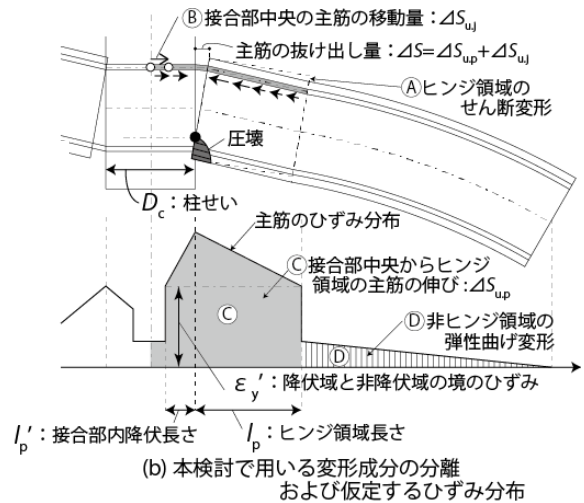


図 4.2.4.1 かぶりコンクリート圧壊時の梁主筋のひずみ分布^{4.2.4.2)}

このような課題を解決するために、十字形柱梁部分骨組内を通し配筋される梁主筋のひずみ分布を実験結果に基づいて図 4.2.4.1 のように修正して、上述の四つの変形成分を定量的に算定する手法を提示した研究^{4.2.4.2)}では、同指針（案）による評価結果を改善できたことが報告されている。

いずれにせよ、梁部材の曲げ降伏後の変形性能を精度よく定量的に評価する手法については、さらに検討の余地が残っていることを強調したい。

2) せん断破壊する RC 梁のせん断終局強度時の変形の評価について

梁部材の各種限界状態に対応する変形を評価するためには、上記のように曲げ性状を考慮するのみならず、部材の諸元等によってはせん断性状をも考慮することが求められる。せん断破壊が先行する RC 梁部材のせん断終局強度到達時の変形（ここでは、せん断終局変形と呼ぶ）を、多数の実験結果を用いて統計的に検討した研究はこれまでほとんどなされていない。そのため、梁部材のせん断終局変形を精度よく定量評価するには至っていないが、せん断補強量 $p_w\sigma_{wy}$ (p_w : せん断補強筋比、 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度) の関数としてせん断終局強度時の部材角を統計的に定めた研究^{4.2.4.3)}がある。同研究では文献調査によって選択した試験体 178 体を対象として、せん断補強量 $p_w\sigma_{wy}$ とせん断終局強度時部材角の実験値 R_u との関係が図 4.2.4.2 のように得られた。その結果は大きくばらついたが、せん断補強量 $p_w\sigma_{wy}$ の増加とともにせん断終局変形も増大する傾向が見られた。そこで最小二乗法によってせん断終局強度時部材角の下限 $R_{su,min}$ を求めると下式となった（図 4.2.4.2 の実線）。

$$R_{su,min} = 0.76p_w\sigma_{wy} + 4.02 \quad (\times 10^{-3})$$

ただし、 $14.3(\text{N/mm}^2) \geq p_w\sigma_{wy} \geq 0.6(\text{N/mm}^2)$ および $p_w \geq 0.002$ の範囲に限る。また検討に使用した試験体のせん断スパン比の範囲は 0.29 から 3.33 であった。

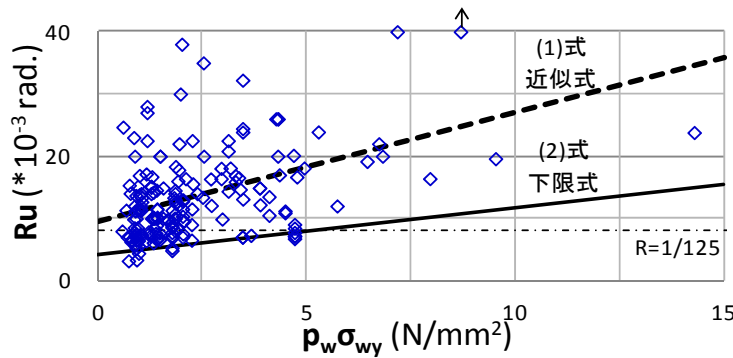


図 4.2.4.2 せん断補強量 $\rho_w \sigma_{wy}$ とせん断終局変形（実験値）との関係 ^{4.2.4.3)}

せん断破壊が先行する RC 梁部材のせん断終局変形を精度よく定量的に評価するための研究がさらに必要なことを指摘する。

3) 有孔梁の変形性能の評価について

梁部材に貫通孔が設けられるとその耐震性能は低下する。有孔梁のせん断終局強度の低下を防止するために様々な補強方法が実験に基づいて提案されており、その耐震設計法は例えば本会の「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」（2010年改訂）に規定されている。これらは梁中央部付近に貫通孔を設けることを前提としており、梁端部の塑性ヒンジ領域に近い位置に貫通孔を設けた場合、曲げ終局強度や変形性能に対する影響は無視できない。このような研究は十分でなく、塑性ヒンジ領域に対して設計で保証すべき変形性能を確保するための補強量や補強方法については十分に解明されていない。今後の研究が必要な分野であることを指摘したい。

本会 WG において永山憲二氏が既往の実験結果を用いて行った検討のうち、有孔梁の限界変形および孔径 D と梁せい H との比 (H/D) の関係の例を図 4.2.4.3 に示す。塑性ヒンジ領域に貫通孔を設けた場合、孔径が大きくなるに従い、また孔径比が $0.3D$ 程度以下の場合、孔の位置が梁危険断面に近づくにともない、変形性能が低下する傾向がみられた。

また、材端部に貫通孔を設けた梁部材では、孔接線方向のせん断ひび割れの進展により耐力低下を生じ、貫通孔上下のコンクリートの圧壊や主筋の座屈により急激な耐力低下を生じる傾向がみられた。そのため、十分なせん断余裕度を確保した上で、孔周囲に補強金物を配置したり、主筋の座屈を防止するための補強筋を貫通孔上下に設けることにより、これらの破壊を抑制して結果として変形性能が大きく改善した実験結果が得られている。

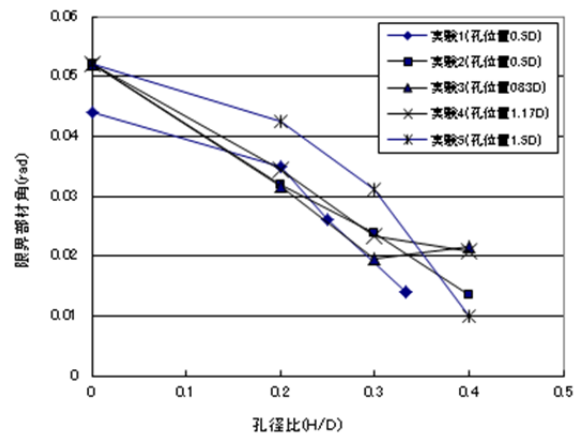


図 4.2.4.3 有孔梁の限界変形と孔径・孔位置との関係 ^{永山による)}

参考文献

[4.2.4.1] 鈴木清久、王 磊、北山和宏：梁主筋の付着性状に着目した鉄筋コンクリート梁の各種限界変形性能に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、2012年7月、pp.235-240。
 [4.2.4.2] 鈴木清久、北山和宏：鉄筋コンクリート骨組における梁部材の主筋降伏以降の変形性能評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、2013年7月、pp.199-204。
 [4.2.4.3] 落合 等、北山和宏：せん断破壊する RC 梁および有孔梁のせん断性能評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、2012年7月、pp.193-198。

(4.2.4 項担当 首都大学東京 北山和宏)

4.4.2 二方向水平力を受ける柱梁接合部の地震時挙動

鉄筋コンクリート骨組の柱部材に梁部材が貫入するパネル部分（以降、柱梁接合部）が曲げモーメントによって破壊に至る機構が塩原によって提案された^{4.4.2.1)}。既往の地震による建物被害では、柱梁接合部に入力されるせん断力が小さくても、柱梁接合部に斜めひび割れが生じてその部分に甚大な損傷を生じた事例が報告された^{例えば4.4.2.2)}。そのような事例では、従来のせん断破壊として柱梁接合部の損傷を捉えていたが、それでは首尾一貫した説明ができなかった。しかし塩原の提案するような柱梁接合部の曲げ破壊が生じたとすれば、合理的な説明が可能になる。

その後、東京大学・塩原研究室において柱梁部分骨組試験体を用いた実験が精力的に実施され、梁曲げ崩壊形に設計された骨組でも柱梁曲げ耐力比（梁曲げ終局時節点モーメントに対する柱曲げ終局時節点モーメントの比）が比較的小さい場合には、柱梁接合部の曲げ破壊が生じることを確認した^{例えば4.4.2.3)}。これらの実験研究では、柱梁接合部の曲げ破壊時の変形状態を目視し易くするために柱と梁との幅を同一とし、柱軸力を導入しない試験体が多かった。その後、柱幅と梁幅とが異なり、柱に圧縮あるいは引張り一定軸力が作用する十字形柱梁部分骨組試験体を用いた実験でも、同様の柱梁接合部の曲げ破壊が発生することを確認した^{例えば4.4.2.4)}。

このように RC 骨組内の柱梁接合部の曲げ破壊に関する実験研究は増えてきたが、その多くは平面形状の試験体を用いた検証である。実際の地震時には、スラブの取り付く立体骨組に変動軸力および二方向水平力が作用するので、そのような場合の柱梁接合部の曲げ挙動を今後は実験等によって検証することが必要である。スラブのない立体隅柱梁部分骨組試験体に一定圧縮軸力を与え、二方向水平力を載荷した実験研究^{4.4.2.5)}では、写真 4.4.2.1 のように柱梁接合部内のコンクリートが圧壊し、柱主筋が座屈するなど柱梁接合部が激しく破壊した。柱および梁主筋の降伏が発生したことや各種計算強度と実験値との比較によって、これはせん断破壊ではなく曲げ破壊であることを指摘した。



写真 4.4.2.1 立体隅柱梁接合部の曲げ破壊^{4.4.2.5)}

参考文献

- [4.4.2.1] 塩原 等：鉄筋コンクリート柱梁接合部：見逃された破壊機構、日本建築学会構造系論文集、Vol.73、No.631、2008年9月、pp.1641-1648。
- [4.4.2.2] 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計—特徴的被害の原因と設計への提案—、1998年10月。
- [4.4.2.3] 楠原文雄、塩原 等、田崎 渉、朴 星勇：柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、Vol.75、No.656、2010年10月、pp.13873-1882。
- [4.4.2.4] 石木健士郎、平林幸泰、北山和宏、近藤慶一、福山 洋、壁谷澤寿一：RC 十字形柱梁接合部パネルの破壊機構に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集、C-2、2011年8月、pp.497-498。
- [4.4.2.5] 片江 拡、佐藤宏一、北山和宏、遠藤俊貴：3 方向加力された鉄筋コンクリート立体隅柱梁接合部の破壊機構に関する実験的研究（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV、2014年9月、pp.421-424。

(4.4.2 項担当 首都大学東京 北山和宏)