

丸鋼鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の破壊特性に関する載荷試験

Failure Characteristics of Reinforced Concrete Beam using Round bar

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○正会員 澤松俊寿 (Toshikazu Sawamatsu)
(独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 岡田慎哉 (Shin-ya Okada)
(独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
(独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

近年の日本国内では大きな地震の発生が相次いでおり、世界的にも地震が活動期に入ったとされている。今後も比較的大きな地震は高い頻度で発生することが予想され、これに対して必要な対策を実施して被害を最小限に留められるようにすることが肝要である。平成 24 年に改定された道路橋示方書・同解説¹⁾においても耐震設計に用いられる入力地震動のレベルが引き上げられ、新橋建設においてより高い耐震性能を求めている。

既設橋梁の耐震補強も鋭意進められているが、特に建設年次の古い橋梁においては、既存の耐震性能が低いことにより、現状の設計基準まで性能を引き上げる場合には補強量が肥大化し、補強にかかるコストが増大する傾向にある。しかしながら、昨今の国策として公共事業に関わる予算の縮減が進められており、道路橋に関わる予算についても大規模なコスト縮減が強く求められている。このような社会情勢においては橋梁の耐震補強に関わる予算も例外ではなく、そのコストを縮減するためには保有性能を適切に評価し、より合理的かつ最適な耐震設計を行う必要がある。

ここで、1970 年代までに建設された橋梁においては、鉄筋に丸鋼が用いられており、異形鉄筋を用いた場合と比較して、異なる性能を保有しているものと考えられる。著者らの既往検討^{2),3)}においては、床版や橋脚模型において丸鋼を用いたものと、異形鉄筋を用いたものとは、耐荷性状や破壊性状が異なることが明らかとなっている。

本研究では、丸鋼を用いた道路橋RC橋脚の保有性能を適切に評価する手法を確立していくために、丸鋼鉄筋が用いられた鉄筋コンクリート柱部材について、柱断面の

曲げによる破壊形態や耐力等の終局時性状の把握することを目的に、鉄筋コンクリート梁供試体の曲げ載荷試験を実施した。実験は、破壊形態を確認するためにせん断余裕度をパラメータとして実施した。

2. 曲げ載荷実験の方法

2.1 供試体および実験ケース

表-1は実験ケース、図-1は供試体の形状および配筋図である。4ケースの供試体について実験を実施した。断面幅は0.3m、断面高さは0.6m、有効高さは0.56mで全ケースにおいて共通とした。表-1に示した供試体の耐力は道路橋示方書¹⁾に基づいて算出した。なお、同基準では異形鉄筋を用いたRC構造を対象として断面計算には平面保持が仮定されている。

本実験は供試体の破壊形態を確認するためにせん断余裕度をパラメータとし、せん断余裕度は引張鉄筋比により調整した。BR-2では、丸鋼鉄筋が用いられていた1970年代頃までの道路橋RC橋脚の配筋を想定した試設計に基づき、引張鉄筋比を0.16%とした。このときのせん断余裕度 P_{s0}/P_u は1.92である。BR-4、BR-5、BR-6はせん断余裕度 P_{s0} / P_u をそれぞれ1.00、0.85、0.65とした全てのケースでせん断補強鉄筋は配置していない。せん断スパン比は3.5とした。

既往の研究⁴⁾より、丸鋼鉄筋が用いられていた当時の定着部仕様により鉄筋の降伏強度程度の定着性能が確保されることが確認されている。このことから、本節では鉄筋端部の境界条件を明瞭とするために、鉄筋の両端部は鋼板に溶接して定着した。

表-1 実験ケース一覧

	B(m)	H(m)	d(m)	主鉄筋の 鉄筋種別	p_t (%)	p_w (%)	a/d	P_{s0} (kN)	P_u (kN)	P_{s0}/P_u
BR-2	0.3	0.6	0.56	4-φ13,SR235	0.16	0	3.5	45.3	23.6	1.92
BR-4				4-φ22,SR235	0.45			63.9	63.9	1.00
BR-5				4-φ25,SR235	0.58			69.3	81.3	0.85
BR-6				6-φ25,SR235	0.88			79.1	121.9	0.65

B：断面幅，H：断面高さ，d：有効高さ， p_t ：引張鉄筋比， p_w ：せん断補強鉄筋比，a/d：せん断スパン比， P_{s0} ：せん断耐力， P_u ：曲げ終局耐力， P_{s0}/P_u ：せん断余裕度

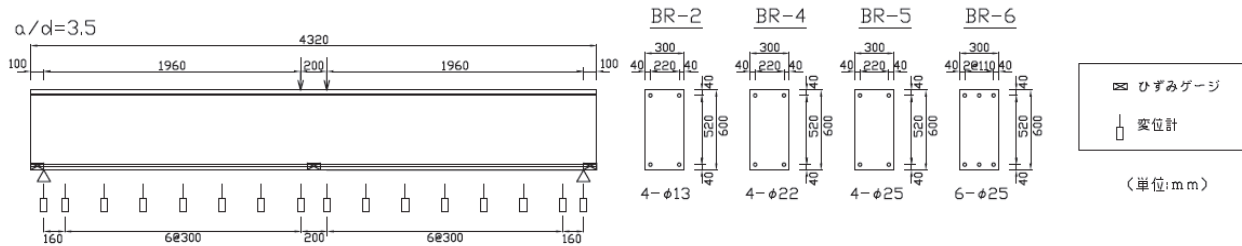


図-1 供試体形状・配筋および計測機設置位置

表-2 鉄筋の特性

鉄筋 直径	材種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
φ13	SR235	334	467
φ22		317	461
φ25		312	451

表-3 コンクリートの特性

圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比
25.1	2.15	0.19



写真-1 実験のセットアップ

表-2、表-3には鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。

2.2 実験装置および荷重方法

実験には写真-1の荷重フレームを用いた。等曲げ区間を200mmとした4点曲げとして、油圧ジャッキにより鉛直荷重を荷重した。鉛直荷重荷重点部および支点部には丸鋼を設置した。荷重プログラムは単調荷重として、供試体の破壊または荷重変位がジャッキストロークの上限に至るいずれかの状態になるまで荷重した。

2.3 計測方法

ロードセルにより荷重荷重を、変位計により荷重点変位をそれぞれ測定した。鉄筋のひずみをひずみゲージにより測定した。本実験では、丸鋼鉄筋とコンクリートとの間のすべりが卓越することが想定される。このため、鉄筋に設置したひずみゲージが鉄筋のすべりを阻害しないように配慮して、ひずみゲージの数量および設置位置を計画した。具体的には、曲げモーメントが最大となる等曲げ区間の中央、また鉄筋の全長にわたる鉄筋とコンクリートのすべりの発生を検知するために、曲げモーメントが作用しない支点部の外側に設置した。300mm間隔で変位計を設置して梁の鉛直変位を測定した。

3. 曲げ荷重実験の結果

3.1 荷重点の荷重－変位関係と損傷状況

図-2 に荷重点の荷重－変位関係を、図-3 に実験終了後の損傷状況の模式図を示す。図-2 には、鉄筋とコンクリートの材料試験結果を用いて、道路橋示方書に基づいて算出した設計曲げ終局耐力 P_u およびせん断耐力 P_{s0} を併記している。ここで曲げ終局耐力 P_u の算出においては、平面保持が仮定されている。

BR-2 では等曲げ区間とせん断スパンの片側にそれぞれ1本ずつのひび割れが発生した。等曲げ区間のひび割れのみが荷重変位の進展とともに大きく開口していった。この間、安定して荷重が保持されつつ、極めて変形性能に富む挙動を示した。このとき、当該ひびわれ位置の圧縮縁付近があたかもヒンジであるような挙動を示した。荷重装置の最大ストロークの制約から終局状態に至る前に荷重を終了したものの、最終的な破壊形態は曲げ引張破壊と推測される。BR-4 においても同様に、荷重変位の増加とともに等曲げ区間の曲げひび割れが大きく開口していき、変形性能に富む破壊形態を示した。せん断余裕度 P_{s0} / P_u が0.9のBR-5では、せん断スパンに生じたひび割れが大きく開口していったが、変形性能に富む破壊形態であった。せん断余裕度 P_{s0} / P_u が0.69のBR-6では、斜め引張破壊により脆性的に破壊した。

せん断余裕度 P_{s0} / P_u が小さいほどひび割れの数が多くなる傾向にある。

池田ら⁵⁾によると、引張鉄筋に付着がないRC単純梁においては、せん断スパン比 a/d が2.5程度以上であれば、ウェブに斜めひび割れが発生せず、せん断によって破壊することはないとしている。この場合、破壊形態が曲げ引張型となって変形性能に富む挙動を示す。鉄筋とコンクリートの付着特性に関しては、丸鋼鉄筋は池田らの付着の無い鉄筋と異形鉄筋の間に位置するものと考えられる。ここで、丸鋼鉄筋の変位と付着応力の関係は荷重作用から最大荷重までは弾性的な応答を示すが、最大荷重以降は急激な荷重の低下とともに変位が増大し、概ね一定の荷重に漸近する傾向を示す⁴⁾。そのため、鉄筋がすべりの発生の前後で断面としての挙動が異なるもの

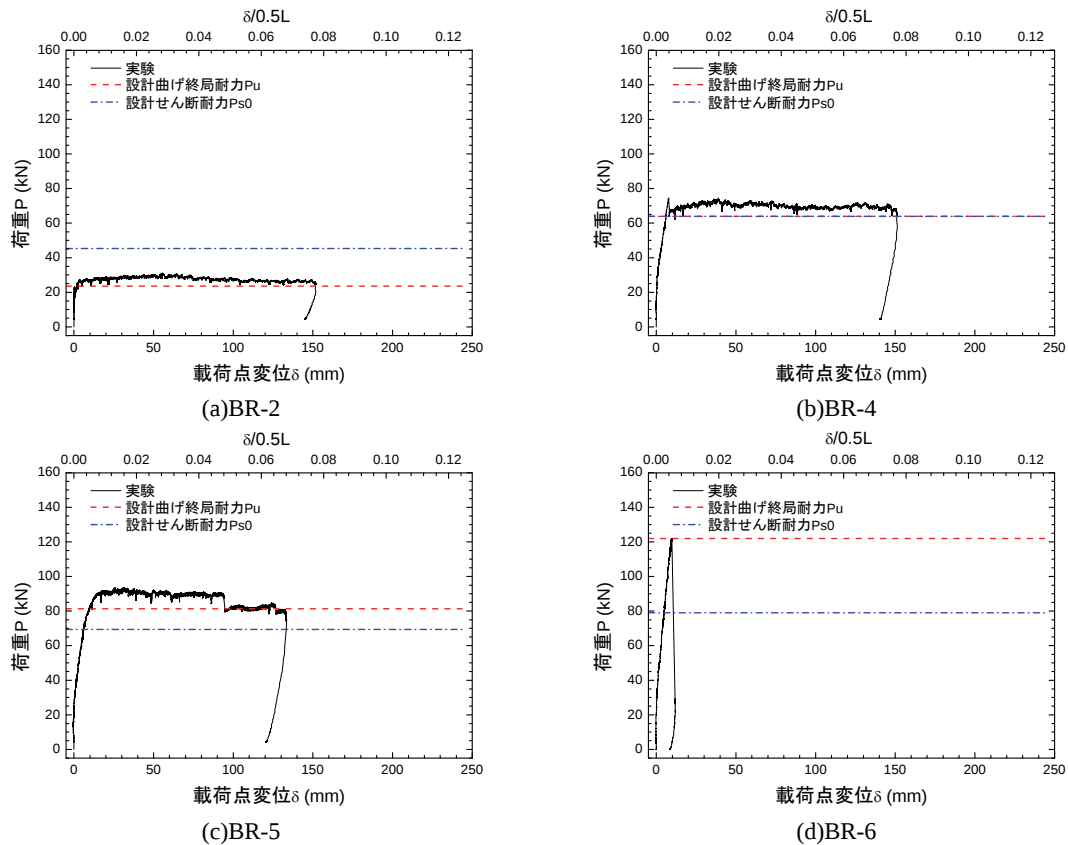


図-2 荷重－変位関係

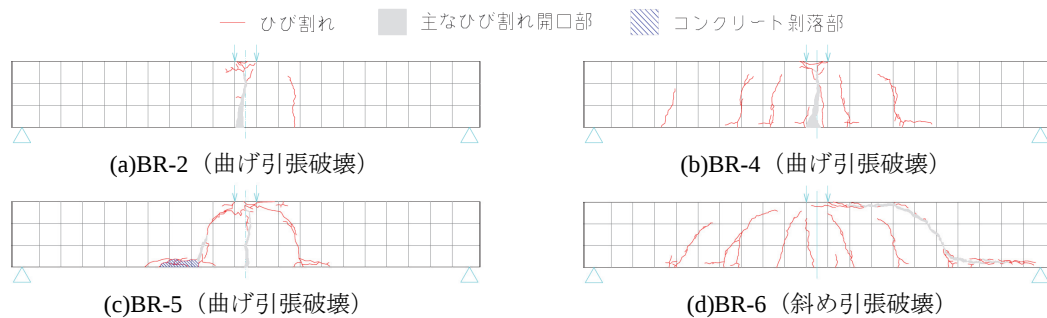


図-3 実験終了時の損傷状況

と考えられる。すなわち、a)鉄筋がすべる前は断面内において平面保持が確保され、鉄筋とコンクリート間で力の伝達が行われる。これに対し、b)鉄筋がすべった後では平面保持は確保されず、池田ら⁵⁾の付着のない RC 構造に近い特性を示すものと推測される。ここで、曲げを受ける鉄筋コンクリート梁では曲げモーメントが最大となる位置から鉄筋とコンクリートの間のすべりが発生し、載荷荷重または載荷変位の増大に伴ってその範囲は近傍へと進行的に拡大していくものと考えられる。これは、鉄筋に生じる引張力の大きさによって梁軸方向において上述の a)と b)の区間が同時に生じていることを示す。これを踏まえると、載荷変位の小さい段階では鉄筋のすべりは発生していないか、またはわずかな範囲でのみ発生しており、梁軸方向の大部分で平面保持が確保されていることから、異形鉄筋を用いた場合と同様の挙動を示

すものと考えられる。一方で、載荷変位が大きくなり梁軸方向の大部分にわたって鉄筋がコンクリート中をすべった場合には、池田らの付着がない RC 部材に近い挙動を示すものと考えられる。

BR-6 はせん断スパン比 a/d が 3.5、せん断余裕度 $Ps0 / Pu$ が 0.69 であり、斜め引張破壊による脆性的な破壊を示した。これは、破壊時の載荷変位が小さく鉄筋がコンクリート中を滑った範囲が小さかったために、異形鉄筋を用いた場合と同様に振る舞いせん断破壊したのと考えられる。このことから、丸鋼鉄筋が用いられた RC 梁部材で設計上の破壊形態がせん断破壊型の場合には、部材長が極端に短い場合を除いては、異形鉄筋と同様にせん断破壊するものと考えられる。

3.2 耐力および破壊形態

ここでは、耐力および破壊形態の評価手法について、

表-4 丸鋼鉄筋を用いた RC 単純梁の既往の曲げ載荷実験に関する供試体条件

	B (m)	H (m)	d (m)	p_t (%)	p_w (%)	a/d	f_y (N/mm ²)	f_c' (N/mm ²)
Mohd ら ¹²⁾	0.4	0.3	0.25	0.27	0	2.5	319	17.8
						5.0		
松岡ら ¹³⁾	0.1	0.2	0.17	0.76	0	3.5	319	22.6

B : 断面幅, H : 断面高さ, d : 有効高さ, p_t : 引張鉄筋比, p_w : セン断補強鉄筋比, a/d : セン断スパン比, f_y : 丸鋼鉄筋の降伏強度, f_c' : コンクリート圧縮強度

丸鋼鉄筋を用いた実験結果と道路橋示方書に基づく設計計算結果を比較する。図-4 にはセン断余裕度 P_{s0}/P_u と P_{max}/P_a の関係を示す。ここで、セン断余裕度 P_{s0}/P_u は設計上のセン断耐力 P_{s0} と曲げ終局耐力 P_u の比で、 $P_{s0}/P_u > 1$ で曲げ破壊型、 $P_{s0}/P_u < 1$ でセン断破壊型を意味する。また、 P_{max}/P_a は実験における最大荷重 P_{max} と設計耐力 $P_a = \min(P_{s0}, P_u)$ の比で、 $P_{max}/P_a > 1$ で実験における最大荷重が設計耐力を上回っていることを意味している。なお図-4 には、表-4 に示す Mohd ら¹²⁾および松岡ら¹³⁾による丸鋼鉄筋を用いた RC 単純梁に関する既往の曲げ載荷実験についてもプロットを示している。

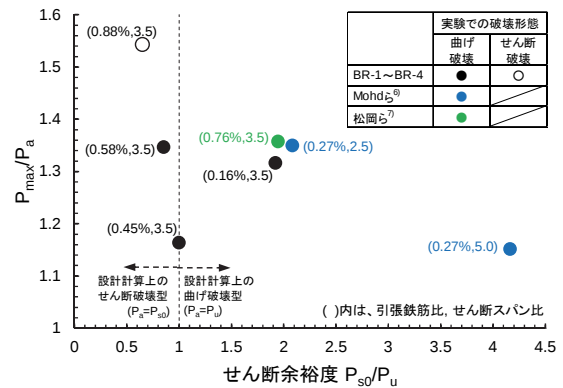
まず、図-4 において破壊形態、すなわち横軸に着目すると、実験において曲げ破壊したもののうち、最もセン断余裕度 P_{s0}/P_u が小さいものは BR-5 の $P_{s0}/P_u = 0.85$ である。設計において脆性的な破壊形態であるセン断破壊を避ける観点からは、丸鋼鉄筋を用いた RC 梁部材においても道路橋示方書の方法、すなわち異形鉄筋と同様の破壊判定手法を用いることで破壊形態を安全側に評価できると考えられる。

次に、図-4 において耐力、すなわち縦軸に着目すると、丸鋼鉄筋を用いた供試体において実験で曲げ破壊したケースでは P_{max}/P_a は 1.16～1.36、セン断破壊した BR-6 では P_{max}/P_a は 1.54 である。これより、丸鋼鉄筋を用いた RC 梁部材においても道路橋示方書の方法、すなわち異形鉄筋と同様の耐力の算定手法を用いることで耐力 P_a を安全側に評価できると考えられる。

4. まとめ

丸鋼鉄筋が用いられた鉄筋コンクリート柱部材について、柱断面の曲げによる破壊形態や耐力等の終局時性状の把握することを目的に、鉄筋コンクリート梁供試体の曲げ載荷試験を実施した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) セン断余裕度が 0.85 以上の場合には、じん性に富む曲げ破壊を示した。
- (2) セン断余裕度が 0.65 の場合にはセン断破壊により脆性的に破壊した。荷重変位の小さい段階では鉄筋のすべりはわずかな範囲でのみ発生し、梁軸方向の大部分で断面の平面保持が確保されていることから、異形鉄筋を用いた場合と同様の挙動を示したものと推測される。
- (3) 丸鋼鉄筋を用いた RC 梁部材における終局耐力および破壊形態は、断面の平面保持が仮定されてい

図-4 P_{s0}/P_u と P_{max}/P_a の関係

る道路橋示方書の手法を適用した場合に安全側の評価を得た。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3
- 2) 赤代恵司，三田村 浩，渡辺忠朋，岸 徳光：丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.57A，2011.3
- 3) 澤松俊寿，三田村 浩，西 弘明，松本高志，加保勇介：柱部の鉄筋に丸鋼を用いた鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性，構造工学論文集 Vol.58A，2012.3
- 4) 西弘明，岡田慎哉，澤松俊寿，角間恒：RC 構造物における丸鋼の定着強度に関する実験的検討，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 69，A-56，2013
- 5) 池田尚治，宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのセン断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.293，pp.101-109，1980
- 6) Mohd Wildan，中村光，国枝稔，Phamavanh Kongkeo，河村精一：丸鋼を用いた低鉄筋比 RC 梁の挙動の評価，土木学会中部支部研究発表会，pp.453-454，2009
- 7) 松岡由高，中村光，国枝稔，河村精一：有限要素解析による主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.595-600，2011