

高強度鉄筋を用いた道路橋RC橋脚の性能評価手法の一考察

正木 守・玉越隆史・白戸真大・星隈順一

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下「RC」という。）橋脚の耐震性の向上と断面縮小によるコスト縮減、過密配筋の解消による施工性の向上等を目的として、新しい材料や構造の提案がなされている。道路橋示方書¹⁾（以下「道示」という。）では、実験で検証された範囲を超える新しい断面構成や断面形状、材料を適用する場合には、実験等によって計算方法等を別途検討することとしている。しかし、様々な条件に対する結果をその都度確認することには限界がある。実験の一部を数値解析で置き換えられればよいが、次節で課題を整理するとおり条件に応じて精度が変化するという特徴から、数値解析で置き換えることは、現状では困難も認められる。

本検討は、RC橋脚に高強度鉄筋等の新しい材料を用いるような場合に数値解析を活用するにあたって、限界状態に達するときの強度や変位を安全側に評価できるようなモデルについて検討したものである。

2. 数値解析の課題

伝統的に、構造物の破壊状態を単純化し、極限つり合い状態を想定し、構造物の強度を算出するモデル化が設計では多く用いられている。換言すれば、荷重曲線上の特定の点の状態のみに着目するものである。軸力と曲げを受けるRC部材では、圧縮側のコンクリートの有効断面やコンクリートと鉄筋の力の分担を仮定した上で、それぞれの材料の終局状態における力の釣り合いを計算することで曲げ終局強度を求める等価応力ブロックモデルがこれに該当する。このモデル化の利点は、ある限界状態点に対応する強度等を安全側に算出できるようにモデル化しやすいことである。一方、一般論としての欠点は、限界状態点のみに着目し、単純化してモデル化することで、ある限界状態における実験値に対して、計算値が極端に安全側になってしまうこと、限界状態

点以外の荷重変位関係や状態の評価に答えを求めないことである。

他方、構造部材等を構成する材料の非線形挙動を精緻にモデル化し、それを組み合わせて部材のモデルとすることで、構造部材の状態変化の逐次過程を再現しようとする研究も多数行われている。たとえば、非線形のはりの挙動を求めるためのファイバーモデルがこの例として挙げられる²⁾。これは鉄筋やコンクリートの挙動を表す応力ひずみ関係を仮定し、変形に釣り合うように断面各部の応力変化を追跡することで、破壊過程の進行を再現しようとする方法である。この方法の利点は、荷重変位曲線全体並びに破壊過程を逐次追跡できることである。しかし、材料試験供試体から得られる応力ひずみ関係と、実構造中の材料の挙動が必ずしも一致しないため、部材の材料強度や配筋状態等の各種条件が評価式等で定められた適用範囲を超えるような場合には、実験等によって数値解析結果が実験の結果を与えるかどうか確認することが必要である。

本検討では、高強度鉄筋を用いた様々な構造条件のRC橋脚に対して、ここで述べた伝統的なモデルとファイバーモデルについて数値解析を行い、ある限界状態を仮定した時の実験結果と計算結果を比較する。そして、それぞれのモデルの特徴を把握することで、様々な構造に対して安全側に限界状態を評価するモデル化を行うという考え方の適用性を調べる。

3. 限界状態モデル

繰り返し水平力を受けるRC部材の実験において、限界状態の設定の仕方は様々である。最大強度発揮後、降伏強度相当まで強度低下した状態を部材の限界状態とみなす場合³⁾、荷重-変位関係の最大強度を発揮している状態を限界状態とみなす場合³⁾がある。道示¹⁾では、耐震性能³⁾に対する橋の限界状態を、塑性化を考慮する部材にのみ塑性変形が生じその塑性変形が当該部材の保有する塑性変形能を超えない状態としており、かぶりコンクリートが剥がれ軸方向鉄筋がはらみ出す前の状態としている。ここ

で、塑性変形能とは塑性域において地震力を繰返し受けた時に部材が安定して水平力を保持して変形できる能力のことである。

本検討では、前節でいうところの伝統的なモデルの一つに分類できる、限界状態をできるだけ直接的に反映したモデルを限界状態モデルと呼ぶことにし、以下のようなモデルを新たに考えた。

評価する限界状態は最大水平力時とかぶりコンクリートはく落時とした。かぶりコンクリートはく落時は道示¹⁾の耐震性能3に相当する限界状態を想定している。限界状態モデルは着目する限界状態だけを捉えるモデルであるため、限界状態点以外に着目することに意味はない。コンクリートと鉄筋の応力ひずみ関係を図-1、コンクリートの有効断面と圧縮応力度の関係を図-2に示す。ここに、 σ_{cc} :コンクリートの最大圧縮応力度、 σ_{sy} :軸方向鉄筋の降伏点、 ε_{cc} :コンクリートが最大圧縮応力度に達するときのひずみ、 ε_{sy} :軸方向鉄筋の降伏ひずみである。図-2(a)の最大水平力時では、断面の圧縮縁でコンクリートが最大応力を発揮していると仮定した。この時、かぶりコンクリートの応力ひずみ関係は横拘束鉄筋の拘束効果を見捨てることで、RC柱の最大強度を安全側に評価できると考えた。図-2(b)のかぶりコンクリートはく落時では、かぶりコンクリートを無視した有効断面において圧縮鉄筋位置のコアコンクリート圧縮応力度が最大に達するひずみを仮定した。このように仮定する理由は、後述のファイバーモデルとは異なり、材料のポストピーク強度を期待しないことで、応力を過小評価することが安全側となると考えたためである。あとは、各限界状態で仮定した有効断面と応力ひずみ関係を用いて圧縮力と引張力が釣り合うように計算を行う。

それぞれの限界状態に対応する載荷点水平変位の計算にあたっては、塑性ヒンジ長の設定が必要となるが、このような提案モデルの与える計算結果の特徴を調べるのが目的なので、塑性ヒンジについてはそれぞれの実験で観察された長さを用いることにした。

4. ファイバーモデル

ファイバーモデルとは、断面内の要素を微小なファイバーに分割し、ファイバー毎に応力ひずみ関係を与えるモデルである。材料の非線形挙動を精緻にモデル化することで、RC柱の挙動を逐次捉える

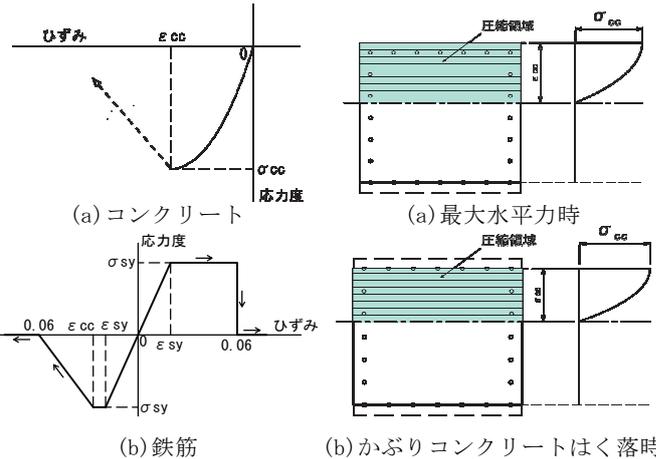


図-1 応力ひずみ関係

図-2 コンクリートの有効断面と圧縮応力度

ことができるため、限界状態点以外に荷重変位曲線並びに荷重変位曲線上の任意点の損傷状態も追跡できる。

軸方向の要素分割長は、限界状態モデルと同様に実験で確認された塑性ヒンジ長とした。各ファイバーの応力ひずみ関係は、現在提案されているファイバーモデルの特徴を把握するために、既存モデルをそのまま用いることとし、以下のとおりとした。コンクリートの応力ひずみ関係はコアコンクリート、かぶりコンクリートに対して各々別々に与えることとし、コアコンクリートと鉄筋の応力ひずみ関係には前川らの実験結果に基づいたモデル⁵⁾、かぶりコンクリートの骨格曲線には道示¹⁾のモデル、履歴則には堺らのモデル⁶⁾を適用した。鉄筋の応力ひずみ関係はひずみ硬化、バウシinger効果を考慮した前川らのモデルであり⁵⁾、座屈を考慮した。

ファイバーモデルでは、最大強度点は数値解析の過程で必然的に得られるが、終局点をどこにするかは任意である。そこで、試しに本検討では、ファイバーモデルを用いた終局限界状態の評価に土木学会のコンクリート標準示方書³⁾に解説されている方法であり、適用性も検証されつつある⁷⁾断面内の平均弾性剛性残存率を指標にした評価方法を用いることとした。

$$\bar{K} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} K dA \quad \text{式(1)}$$

$$K = \exp \left[-0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left\{ 1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\} \right] \quad \text{式(2)}$$

ここに、 \bar{K} : 平均弾性剛性残存率、 K : 微小面積ごとの局所面積弾性残存率、 A_c : コンクリート断面積 (微小面積)、 ε'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値、 ε'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみである。平均弾性剛性残存率とは、土屋・前川が提案したも

表-1 実験ケース

供試体種類	シリーズA	シリーズB	シリーズC	シリーズD	
供試体数(体)	1	3	2	3	
断面寸法(mm)	600×600	600×600	600×600	600×600	
柱基部から水平力作用位置までの距離(mm)	3010	3010	3010	D-1,D-2:3010 D-3:3500	
コンクリート設計基準強度(N/mm ²)	40	40	40	40	
軸方向鉄筋 (D13)	材質	SD345	SD490	USD685	
	配置間隔(mm)	40	65	C-1:87 C-2:65	D-1,D-2:65 D-3:47
	配置本数(本)	52	B-1:32 B-2,B-3:56	C:1:24 C-2:32	D-1:32 D-2:56 D-3:44
	配置段数(段)	1	B-1:1 B-2,B-3:2	1	D-1,D-3:1 D-2:2
	軸方向鉄筋比(%)	1.83	B-1:1.13 B-2,B-3:1.97	C-1:0.84 C-2:1.13	D-1:1.13 D-2:1.97 D-3:1.55
帯鉄筋 (D6)	材質	SD345	SD345	SD345	
	配置間隔(mm)	40	40	40	
	有効長(mm)	260	B-1,B-2:260 B-3:195	260	D-1,D-2:260 D-3:284
横拘束鉄筋の体積比(%)	1.22	B-1,B-2:1.22 B-3:1.62	1.22	D-1,D-2:1.22 D-3:1.12	
柱基部軸圧縮応力度(N/mm ²)	1	1	1	D-1,D-2:2.5 D-3:3.5	
せん断スパン比	5.02	5.02	5.02	D-1,D-2:5.02 D-3:5.83	

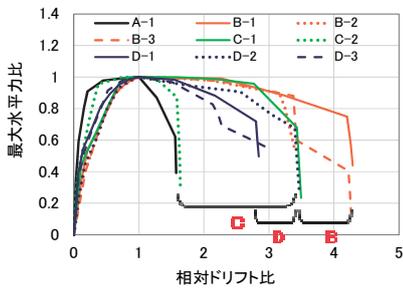


図-3 最大水平力比-相対ドリフト比関係

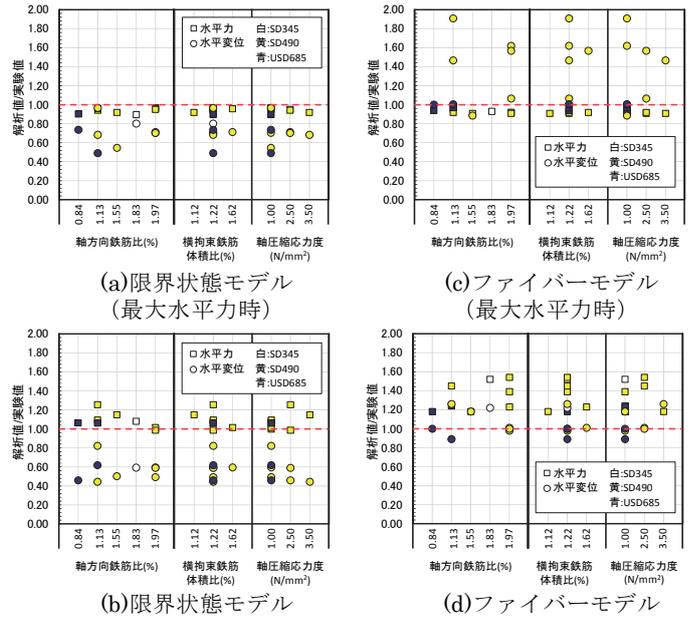
のであり、コンクリート断面の平均的な損傷レベルを指標としたものである⁴⁾。これ

は、無損傷の初期状態で1、完全に材料がせん断破壊した時に0となる状態量である。コンクリート標準示方書³⁾では部材断面の平均弾性剛性残存率が、部材の終局変位に相当する値とならないことを、応答変位が終局変位に達しないことの照査にかえてよいとしており、これが初期値の50%となるときの変位が部材の終局変位に相当するとされている。

5. 検討対象実験

実験には高強度の軸方向鉄筋を用いた道路橋の単柱式RC橋脚の1/5縮小モデルを用いた。実験ケースを表-1に示す。シリーズAには軸方向鉄筋にSD345、シリーズB・DにはSD490、シリーズCにはUSD685を使用し、各供試体について軸方向鉄筋比、横拘束鉄筋の体積比、柱基部軸圧縮応力度を変化させた。載荷方法は、軸方向鉄筋の降伏時の水平変位を基準変位 (δy) として、載荷変位を $\pm n \delta y$ ($n=1, 2, 3, \dots$) とした変位振幅を各3サイクルずつ与える正負交番載荷とした。

図-3に最大水平力比 (水平力/最大水平力) と相対ドリフト比 (ドリフト比/最大水平力時のドリフト比) の関係を示す。SD490を軸方向鉄筋に使用



(a)限界状態モデル (最大水平力時) (b)限界状態モデル (かぶりコンクリートはく落時) (c)ファイバーモデル (最大水平力時) (d)ファイバーモデル (降伏耐力相当に水平力低下時)

図-4 解析結果による安全係数と力学パラメータの関係

したBシリーズとこれよりも高強度の鉄筋を用いたCシリーズではCシリーズの方が塑性変形性能は小さい。また、DシリーズはBシリーズと同様にSD490を用いているが、B・Cシリーズに比べて柱基部の軸圧縮応力度が大きく、実験で得られる塑性変形能が他のシリーズに比べて小さい。図-3では最大水平力比が1に到達した後、最大水平力比が一定に保たれる区間が長いほど塑性変形能は大きいと言える。

6. 検討結果

限界状態モデルによる限界状態の評価と実験結果との比較は、最大水平力時とかぶりコンクリートはく落時の荷重や変位について行う。ファイバーモデルについては、最大水平力時と降伏耐力相当に水平力が低下した時点について比較する。なお、解析における降伏耐力相当に水平力が低下した点は、平均弾性剛性残存率が50%まで低下した点とした³⁾。結果の評価は、水平力と水平変位の計算値/実験値の数値が一定値に対してのどの程度ばらつくのか、何らかの傾向を有するのかという着目点で行った。

最大水平力時に着目した結果を図-4(a), (c)に示す。水平力は限界状態モデル、ファイバーモデルともに0.9~1.0でばらつきは小さく、すべての条件において安全側の評価ができていた。水平変位は限界状態モデルではすべての条件で安全側に評価できたが、ファイバーモデルでは危険側の評価であった。ばらつきもファイバーモデルの方が大きかった。

限界状態モデルのかぶりコンクリートはく落時とファイバーモデルの降伏耐力相当に水力低下時の結果を図-4(b)、(d)に示す。なお、このタイミングはそれぞれのモデルにおいて、終局限界状態を想定したものである。水平力は、限界状態モデルでは1.0~1.3、ファイバーモデルでは1.2~1.5であり、両モデルともに危険側の評価であったが限界状態モデルの方が精度は高かった。ばらつきの範囲は両モデルとも0.3程度であった。水平変位は、限界状態モデルでは最大水平力時と同様にすべて安全側に評価できた。ファイバーモデルでは0.9~1.3であり、一部危険側の評価であった。実験条件の違いによるばらつきへの影響は明確ではなかったが、限界状態モデルにおいては、塑性変形能が小さくなる軸圧縮応力度が大きい場合でも、一定のばらつきの範囲に収まっており、応力ひずみ関係の設定などについてさらに検討を進めることで、広い条件で限界状態における水平力、水平変位ともに安全側に評価できる可能性がある。ファイバーモデルでの平均弾性剛性残存率における評価は、平均弾性剛性残存率が50%に低下した時点を終局変位と関連付けるものであり、本検討でも水平力に対する精度に比べて変位に対する精度のほうが高かった。

7. おわりに

本研究で用いた破壊事象を単純化し、限界状態を直接的に評価しようとする限界状態モデルでは限界状態を安全側に評価ができる可能性があることが分かった。ファイバーモデルも概ね精度はよかったが、今回のようにある限界状態点に着目した場合には一部危険側の評価になることも確認された。このように、より精緻な構造解析モデルを用いる場合でも、

想定する状態と指標との関連付けが重要であることが改めて確認された。また、どちらのモデルにおいても、材料強度等の各種条件の違いによるばらつきへの影響は明確ではなかった。現状では、新しい材料を用いる場合に数値解析だけで部材の限界状態を捉えることはばらつきや信頼性の観点からもまだ困難が伴うことが事実であり、実験結果との比較が必要である。構造解析モデルを設計基準として用いるためには、高度なモデルとするだけでなく、限界状態との関係づけが一体不可分であることを認識しておく必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V編、2012
- 2) 堺淳一、川島一彦：ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析、土木学会構造工学論文集、Vol.45A、pp.935~946、1999
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編、2012
- 4) 中谷昌一、白戸真大：深い基礎の許容塑性率に関する工学的意義について、土木研究所資料、第4030号、2006
- 5) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 6) 堺淳一、川島一彦、庄司学：3横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化、土木学会論文集、No.654/1-52、pp.297~316、2000
- 7) 牧剛史、土屋智史、斉藤成彦、渡邊忠朋：構成材料の損傷に基づくRC柱の耐荷・変形機構の数値解析的評価、土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）、Vol. 71、No. 1、pp.29~47、2015
- 8) 土屋智史、前川宏一：RC棒部材断面の損傷指標と耐震性能評価、土木学会論文集、No.718/V-57、pp.45~57、2002

正木 守



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造部研究部橋梁研究室 交流研究員
Mamoru MASAKI

玉越隆史



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造部研究部橋梁研究室長、現 土木研究所構造部メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Takashi TAMAKOSHI

白戸真大



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造部研究部橋梁研究室 主任研究官、工博
Dr.Masahiro SHIRATO

星隈順一



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造部研究部橋梁研究室長、工博
Dr.Junichi HOSHIKUMA