

RC橋脚補強の耐震設計計算方法の検討

袴田文雄¹、前川順道²

¹ 正会員 工修 阪神高速道路公団保全施設部、(〒542 大阪市中央区九太郎町4-1-3)

² 正会員 阪神高速道路公団保全施設部保全技術課長、(〒542 大阪市中央区九太郎町4-1-3)

本論文は炭素繊維シートを含むさまざまなRC単柱橋脚の耐震補強を行ったものを対象として、破壊モードの考え方を述べた後、耐震設計上の計算方法について定式化を行い、曲げ耐力、せん断耐力、じん性変位の計算の方法について検討を加えたものである。実験結果と比較することで簡易的な計算方法でも結果の概要を説明でき、設計計算への見通しを与えることがわかった。

Key Words: Retrofit design, RC column, CFRP, experiment

1. はじめに

RC橋脚の耐震補強に関しては、復旧仕様や示方書が示された後、規模の大きい地震についても、弾塑性域における構造物挙動について設計に取り入れる必要が生じてきた。また、せん断破壊した多くの事例をみることで、破壊モードについてもより正確な理解を求められることとなった。以下では最初に定式化の前提である破壊モードの仮定を述べ、定式化のあと、各種のRC補強橋脚の実験結果と比較することで、設計への見通しを検討する。

2. 破壊のモードの仮定

図-1(a)には、荷重変位曲線における破壊モードの関係を概念的に示した。

せん断耐力が復元力に対して低位にある時には、そのときの変形に応じてせん断破壊、あるいは曲げせん断破壊を呈する。静的な一方方向荷重の場合と異なり、コンクリートのクラックの成長や主鉄筋の降伏後の繰り返し荷重の過程で、RC橋脚はせん断耐力を大きく低減させる。せん断破壊あるいは、曲げせん断破壊を未然に防ぐ補強をせん断耐力補強とする。

構造物が十分なせん断耐力を有するときには、当該構造物の終局状態は曲げ破壊を呈するのであるが、そのときに必要なじん性率を確保できていないときには、十分な荷重低減を發揮することができない。このため、所定の範囲内でじん性を向上させるのをじん性補強とする。

現行の示方書では、規模の大きな地震に対しても設計震度を定めている。既設の橋脚にてこれを満足させるときには、曲げ耐力そのものの向上が必要になることがあ

る。図-1(a)で P_u を向上させることがこれに該当し、これに対応する補強を曲げ耐力補強とする。曲げ耐力補強を行うときには必要とするせん断耐力を大きく向上させるので、多くはせん断耐力補強を伴うことになる。図-1(b)には曲げ補強の生じる場合の概念を荷重低減係数とともに示した。

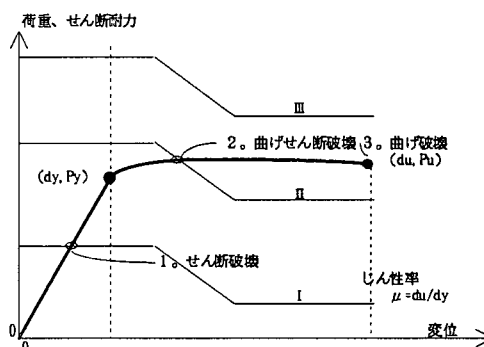


図-1(a) 繰り返し荷重載荷時の場合の荷重変位曲線の包絡線と破壊モード概念図

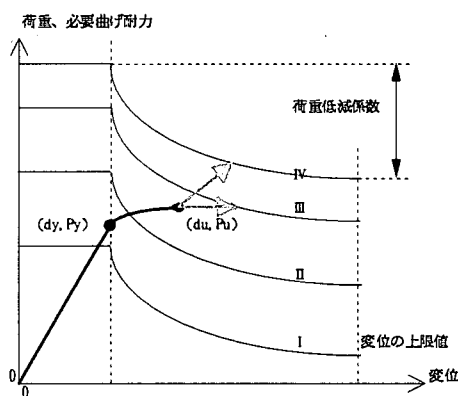


図-1(b) じん性補強と曲げ耐力補強説明補足図

一方、破壊モードにはせん断に起因するものと、圧縮域コンクリート圧壊、主筋の座屈あるいは帯鉄筋の破断など圧縮に起因するものがあると考え。柱部材の形状、断面構成、強度、材料、軸力などによって変わりうるが、図-2に見るように、圧壊面(①)にて破壊を生じるもの

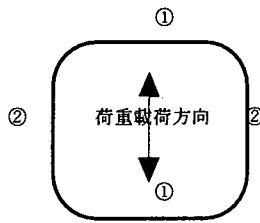


図2 断面の記号

が圧縮に起因する破壊の類とし、カバーコンクリートの剥落はもちろん、帯鉄筋など横拘束筋の降伏・破断、主筋の座屈などを伴う。これに比してせん断面(②)、にて破壊を生じるのがせん断に起因する破壊であるとする。いずれの場合でも双方は作用するが、一般の橋脚では圧縮域破壊が多く見られ、せん断スパン比の比較的小さい橋脚ではせん断型破壊が見られると考えられる。一般の橋脚であってもせん断補強が十分でないときには、せん断に起因する破壊を呈すると考えてみることにする。

3. 計算の方法

(1) 曲げモーメント

応力とひずみの構成方程式および軸力の釣合方程式を満足するように、平面保持を仮定した上でひずみ分布を考え、断面を中立軸に平行に分割して断面の耐力を求める。このとき、応力とひずみの構成方程式には帯鉄筋などによる拘束効果が勘案される。

拘束効果は帯鉄筋比の関数である。帯鉄筋比は示方書などでは(体積)帯鉄筋比として式(1)にて与えられている。

つぎに帯鉄筋に類するものには、既存の帯鉄筋のほか、鋼板、炭素繊維シート、PC鋼棒などがある。RC巻き立ての場合には追加の帯鉄筋がある。これらを以下のように既存の帯鉄筋と等価な部材と考えることとする。ここでは、体積帯鉄筋比 ρ 及び帯鉄筋降伏応力 f_{yh} の積 ρf_{yh} が等価となるようにそれぞれの補強材について等価な帯鉄筋換算断面を算出し、強度比だけでなく、設置位置も考慮した等価帯鉄筋面積を算出のうえ重ね合わせる。鋼板の場合の等価な拘束筋面積寄与分は(2)、炭素繊維シートの場合は(3)、さらに、炭素繊維シートでケーシング補強を行う場合は(4)とする。

通し筋としてのPC鋼棒については、1)によれば、鋼板補強のときの解析・実験と比較して大きくはじん性が向上しなかったこと、断面①方向には寄与していないことから、とりあえず拘束効果としては期待しないものと

した。等価断面積を得た後の拘束効果を考えたコンクリートの構成式に関する算式は、復旧仕様や示方書の考え方に準拠した。ただし、コンクリート最大ひずみは0.005を下回らないようにした。

$$\rho = \frac{4 \times A_h}{s \times D} \quad (1)$$

$$A_h = s \times t \times \frac{b_f}{B} \times \frac{f_{pl}}{f_{yh}} \quad (2)$$

$$A_h = n \times s \times t \times \frac{b_f}{B} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}} \quad (3)$$

$$A_h = n \times s \times t \times \frac{b_f}{D_{tube}} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}} \quad (4)$$

ここで、 A_h : 拘束効果算出に関する等価帯鉄筋断面積、 s : 帯鉄筋間隔、 t : 厚さ、 b_f : 柱主鉄筋の幅員方向中心間隔、 B : 橋脚の幅、 D : 橋脚の奥行き、 f : 鋼板、鉄筋、炭素繊維シートの降伏応力である。

(2) せん断耐力

せん断耐力については多くの実験が行なわれているが、メカニズム、スケール効果、繰返し効果などがあり、まだ定まったものはない。ここでは2)に従い、せん断耐力をコンクリートによるもの、帯鉄筋等補強部材によるもの、軸力によるものの和として評価することとした。ここでコンクリートのせん断への寄与分は曲率じん性率の関数として与えられる。帯鉄筋などにおけるせん断耐力における効果はそれぞれの材料について以下の通り考え、せん断面(図-2の②面)での抵抗で考えた。

$$A_v = 2 \times A_h \quad (5)$$

$$A_v = 2 \times s \times t \times \frac{D}{d_w} \times \frac{f_{pl}}{f_{yh}} \quad (6)$$

$$A_v = 2 \times A_{vc} \times \frac{D}{d_w} \times \frac{b_f}{b_{pc}} \times \frac{s}{s_{pc}} \times \frac{f_{pc}}{f_{yh}} \quad (7)$$

$$A_v = 2 \times n \times s \times t \times \frac{D}{d_w} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}} \quad (8)$$

$$A_v = 2 \times n \times s \times t \times \frac{D_{tube}}{d_w} \times \frac{f_{cf}}{f_{yh}} \quad (9)$$

鋼材等に関しては、強度等価として、既設の帯鉄筋の総和 A_v に鋼板、PC鋼材、炭素繊維シートそれぞれについて以下の等価の断面積を重ね合わせる。一重の帯鉄

筋で A_v は(5)により評価されるとすれば、鋼板では(6)、PC鋼材では(7)、炭素繊維シートでは(8)、ケーシング補強の時(9)とする。このとき、せん断面ではPC鋼棒を切断する面を考えるのでPC鋼棒も考慮した。

ここで、 d_w : 柱主鉄筋の荷重方向中心間隔、 D : 橋脚の奥行き、 A_{vc} : PC鋼棒の断面積、 b_{pc} : PC鋼棒の水平方向間隔、 s_{pc} : PC鋼材の鉛直方向間隔、 n : 炭素繊維シートの層数である。

(3) じん性率あるいは終局変位

じん性率は荷重低減係数を与える重要なパラメータである。じん性率の評価のためには終局変位が正しく評価される必要がある。塑性ヒンジ長、降伏変位、終局ひずみなどそれぞれを微視的にみれば改良の余地はあるが、結果としての終局変位の評価を十分に行なうことが必要である。

変形算出に際してはやはり平面保持を仮定して軸力の釣り合い条件に合致するまで繰り返し計算を行なうのであるが、このとき図-3のような相関曲線、図-4の各コントロールポイントにおけるひずみ分布を考えることとした。

最初に軸力と曲げの相関曲線を考える。軸力上の相関曲線において断面の曲げ耐力が定められる。特徴的なポイントは以下の通り。

3は主筋に降伏がはじめて生じる荷重状態である。このときの軸力以上の荷重状態では主筋は降伏しない間にコンクリートが圧壊する、あるいは圧縮側主筋が座屈する。このため、この荷重状態を釣り合い破壊1(軸力 Nb1)の状態と呼ぶことにする。多段配筋や側鉄筋などがある一般のRC橋脚では釣り合い破壊時には最大の断面力を与えるとは限らない。

5は主筋が最大ひずみを、コンクリートが最大圧縮ひずみを同時に示している。この軸力以下(多くは引張である)ではコンクリートが圧壊することがない。このためこの荷重状態を、釣り合い破壊2(軸力 Nb2)の状態と呼ぶことにする。

断面計算にあたっては、最初に2つの釣り合い破壊の状態を試算した上で、当該断面での破壊のモードを想定する。破壊のモードは次のように区分される。ここで N は作用軸力である。

- ① $N > Nb1$ 鋼材降伏を伴わないコンクリート圧壊
- ② $Nb1 > N > Nb2$ 鋼材降伏を伴うコンクリート圧壊
- ③ $Nb2 > N$ コンクリート圧壊を生じない鋼材破断

ただし、鋼材破断とは繰り返し荷重を受けるときの鋼

材の終局ひずみに達したと想定されたときをいう。

終局変位は2)や示方書に示されるように、柱基部での仮定の塑性ヒンジ長を仮定し算出する。ここでは $0.5 \times D$ とした。

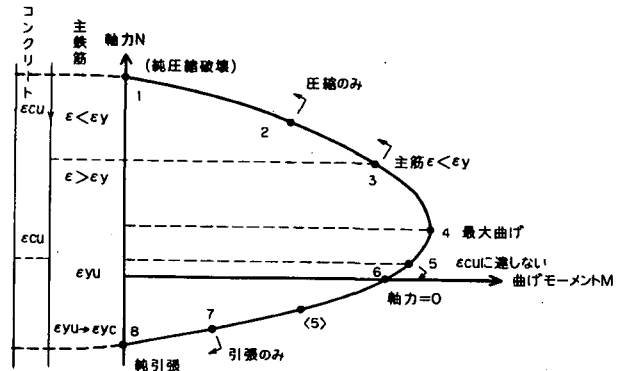


図-3 相関曲線

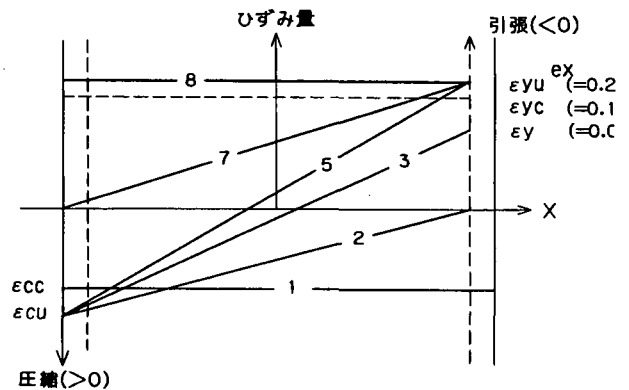
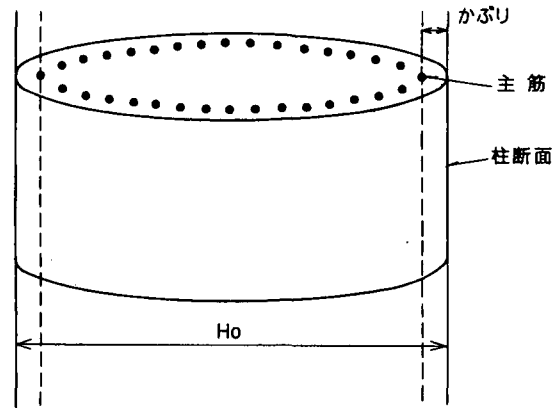


図-4 ひずみ分布

(4) 解析の例

RC単柱橋脚、補強橋脚に関してはさまざまな視点から繰り返し荷重実験が報告されている。3)では主に炭素繊維シートにて補強した供試体について、実験と解析の面から破壊モードを比較した。破壊モードはせん断、曲げせん断、曲げに分類できるが、モデルに基づく解析は実験を説明していることを確認している。解析では、コンクリート、鉄筋、鋼板については試験値、炭素繊維シートについては規定値の $2/3$ ($35,000 \times 2/3 = 23,000$) を用いた。

次に、炭素繊維シートだけでなく、鋼板補強、曲げ耐

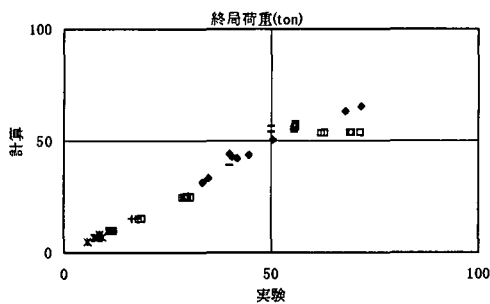


図-5 終局荷重比較

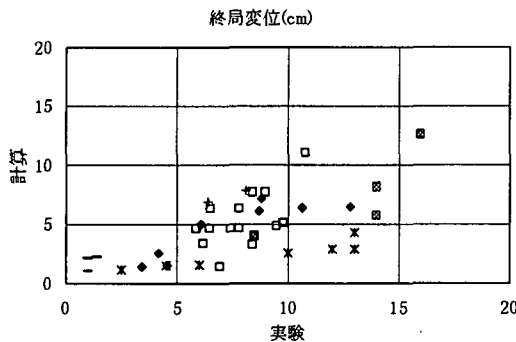


図-6 終局変位比較

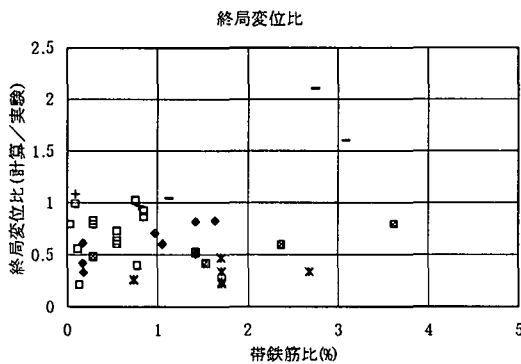


図-7 終局変位比

力補強なども含め、無補強供試体実験とともに、図-5には終局荷重、図-6には終局変位を比較した。ここで終局荷重とは履歴の最大反力、終局変位とは荷重変位の履歴曲線の包絡線において、最大反力の80%に低減したときの変位と考えた。スパン比が短くせん断実験を行っ

たものは対象としていない。図-5から終局荷重に関してはモデルは実験を良く評価することがわかる。図-6は終局変位であるが、荷重に比較してばらつきが大きい。しかし、実験において計算以上の終局変位あるいはじん性が実現できれば、設計では所要の性能が実現されたとみることが可能であり、図はこれを満足することを示している。

図-7は終局変位比(計算/実験)を帯鉄筋比(1)と比較したものである。帯鉄筋比が3%程度以下の範囲で終局変位の実験値は計算値を上回っていることがわかる。

参考資料 4)~7)には阪神高速道路公団の実験資料以外で用いた実験の一覧を示した。

4. 結論

計算値を実験値と比較することで、破壊モードの一致を見ることができた。また、終局荷重、変位について設計計算の範囲で許容できる結果を得ることができ、設計への見通しを持つことができた。今後実験資料の収集解析を積んでいくほか、降伏変位などに関する検討の必要がある。

阪神高速道路公団ではこれら実験・検討結果をもとに、CFRPによる耐震補強に関しては、「炭素繊維シートによるRC橋脚補強に関する設計施工要領(案)」を制定し、実務設計を開始した。

参考資料 1) 葛目、壁式橋脚の鋼板補強の実験的検討、第24回地震工学、1997(予定)、2) M. J. N. Priestley, F. Seible, Y. H. Chai; Design Guidelines for Assessment Retrofit and Repair of Bridges for Seismic Performance, University of California San Diego, August 1992, 3) 袴田: 壁式橋脚のRC耐震補強及びCFRPによるRC耐震補強の実験と解析、「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウムJCI, 1997、4) 鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強効果確認実験報告書、平成8年7月、5) 鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強効果確認実験報告書、平成8年11月、6) 高速道路技術センター: 橋梁の耐震設計法に関する検討報告書、平成8年3月、7) 大阪大学松井研究室、ケミカ工事(株): 炭素繊維によるRC橋脚の補強実験(その2)見学会報告書、平成9年1月23日

Calculation Method of Earthquake Resistant Design for Retrofitted RC Column

by Fumio HAKAMADA, Yorimichi MAEKAWA

Current code of earthquake resistant design for highway bridges in Japan requires an assessment of structural behavior in inelastic region for retrofitted RC columns, which cover retrofit of ductility by steel plate, Carbon Fiber Reinforced Plastic as well as original structures. In this report authors discuss failure modes, identify retrofit objectives, then formulate design method from view points of bending strength, shear strength, and ultimate displacement. Analysis was made to be compared with experiment, and authors assumed acceptable results were achieved for practical design.