

RC ラーメン橋脚の非線形静的解析における 軸力変動考慮の方法と終局耐力判定上の問題点

劉 春山¹ ・ 久保田 翼¹ ・ 青柳 守¹ ・ 瀬川 信弘¹

¹正会員 (株) 白石 技術本部 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町2-11-2)

はじめに

RC ラーメン橋脚の面内方向地震時保有水平耐力を非線形静的解析で行う場合、地震力による部材軸力の変動を考慮して行われる。軸力変動は、RC ラーメン橋脚の上部水平梁部と柱部で生じる。

梁部は支承を介し上部工荷重を受け、常時はその軸力はほとんどゼロに近い。しかし、地震時には上部工の地震水平力が支承を介し梁軸方向に作用するために、梁上の上部工地震時水平力の約半分が、梁の両端で圧縮または引張り軸力として作用する。

柱部は、常時には上部工と橋脚の自重相当の軸力を受け、地震時にはさらに上部工水平力による全体モーメントにともなう軸力変動が発生する。

したがって、軸力変動は正負の範囲に及ぶことになる。特に梁部の片端は確実に引張り軸力状態が発生する。

引張り軸力の大きさによっては、圧縮側コンクリートの最大ひずみで終局を判定する現行の設計法では問題が生じる場合がある。このことは、すでに、運上¹⁾、松田²⁾らによっても指摘されている。

静的非線形解析では、地震力を漸増荷重として作用させ、終局に至る過程を解析する。この場合、① 梁部を含めすべての部材の軸力変動を評価でき、② 引張り状態も含めた変動軸力に応じた終局判定を行える解析方法、であることが必要である。

既往の解析事例には、地震力を漸増荷重として作用させる方法に代えて、梁部に強制変位を与える方法³⁾も報告されている。この方法では、上記①に関し問題がある。

以上の観点から、軸力変動考慮の静的非線形解析法の一提案を以下で行うものである。

1. 軸力変動を考慮した非線形静的解析

非線形静的解析で、地震力を漸増させて作用させる代わりに、ラーメン橋脚の梁部を強制変位を与える解析事例が発表されている。

上記は梁の節点（柱部との交点）に一樣の強制変位を与えているため、節点間の相対距離が一定となり、梁部の軸力変動が生じないことになる（柱部については軸力変動が考慮されている。）

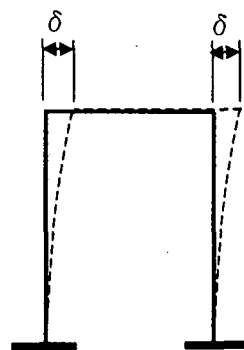


図-1 同じ値の変位を与える方法

また、想定ヒンジ部の塑性化（降伏・終局）の判定は、発生軸力に応じた曲げモーメントを、軸力 N に応じた終局曲げモーメント M と照合し行っている事例が多い。

本論文では、以下の手法で解析することにした。橋梁の非線形静的解析と同じように、上部工と橋脚の両方に漸増する地震力（正確には地震震度）を作用させる。この場合、上部工（横方向）と支承の構造も必要に応じてモデル化に反映する。

これにより、梁部も柱部も正しく軸力変動を考慮することが可能になる。

想定ヒ

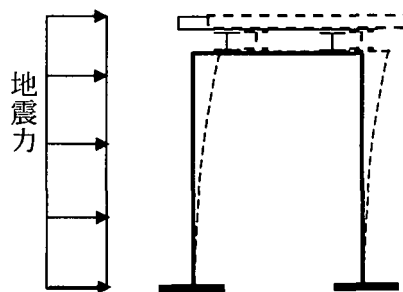


図-2 地震力（震度）を与える方法

ンジ部の塑性化の判定は、発生軸力 N に応じた降伏回転角 $\theta_{py}(N)$ または終局回転角 $\theta_{pu}(N)$ によって行う。

降伏回転角 $\theta_{py}(N)$ および終局回転角 $\theta_{pu}(N)$ は、想定塑性ヒンジの断面特性、塑性ヒンジ長などから求めた初降伏時・終局時の各曲げモーメント $M_c(N)$ 、 $M_u(N)$ と曲率 $\phi_c(N)$ 、 $\phi_u(N)$ から求める。

$M_c(N)$ 、 $M_u(N)$ 、 $\phi_c(N)$ 、 $\phi_u(N)$ は、軸力 N に関する多項式関数として、係数をあらかじめ求めておく。(文献参照⁴⁾)

なお、地震荷重漸増の非線形静的解析モデルで、部材の初期剛性は降伏剛性を用いるが、この降伏剛性の算定にも軸力が必要となる。この場合、降伏判定のための非線形静的解析モデルでは自重作用時の軸力を用い、終局判定の場合には、終局時の軸力を用いる。後者の場合は、繰り返し解析となるが、2回程度で十分であることを確認している。⁴⁾

2. 軸力と終局時の曲率・曲げモーメント

現行の方法では、最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートのひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} に達した時の曲率と曲げモーメントを終局曲率 ϕ_u 、終局曲げモーメント M_u としている。

いま、終局曲率と終局曲げモーメントを、軸力を変えて計算した結果を図-3、図-4に示す。

図-3から、終局曲率の増加に対対応する軸力には下限(引張)があることが分かる。終局曲率が増加していくと、最外縁鉄筋の歪 ϵ_s (図-5参照)も大きな値になる。最外縁鉄筋の歪が仮に10%とすれば、平均的に5cm間隔に幅5mmのクラックが発生することになる。

断面の「終局時の定義」として、最外縁引張り鉄筋の歪に関しても限界を押さえる必要があると考える所以である。

上記現行の「終局時の定義」に加えて、「軸方向引張り鉄筋が終局歪 ϵ_{su} に達した場合」も終局時とすべきではないだろうか。

終局歪 ϵ_{su} をいくらにすべきか、については今後の研究に委ねたい。

ここでは、終局時の定義を「最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートのひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} に達した時、または軸方向引張り鉄筋が終局歪 ϵ_{su} に達した時の曲率と曲げモーメントを終

局曲率 ϕ_u 、終局曲げモーメント M_u 」とし、仮に鉄筋の終局歪 ϵ_{su} を5%とした場合について、終局曲率 ϕ_u 、終局曲げモーメント M_u が軸力とどのような関係にあるかを次項で検討してみた。

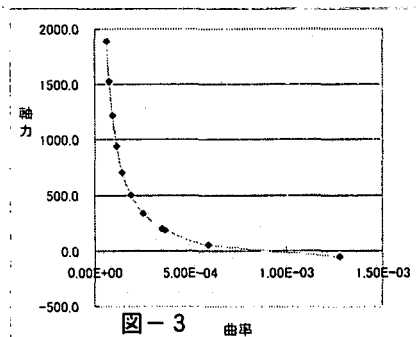


図-3 曲率

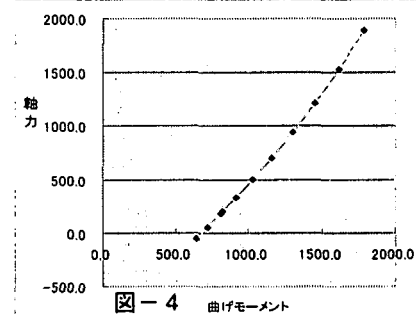


図-4 曲げモーメント

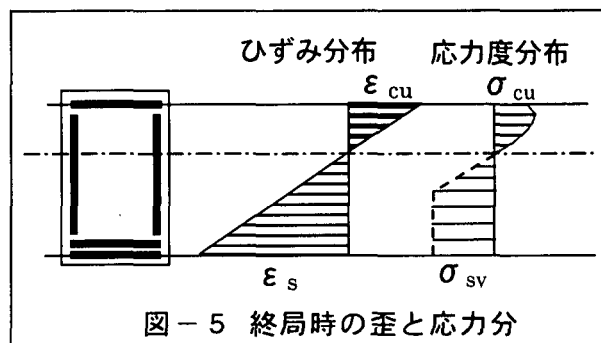


図-5 終局時の歪と応力分

3. 鉄筋の引張終局歪をも考慮した時の軸力と終局曲率・終局曲げモーメント

3.1 「終局釣合い軸力」の定義

図-6は、最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートのひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} になり、同時に軸方向引張り鉄筋が終局歪 ϵ_{su} になった状態を表す。以下、この状態を「終局釣合い歪状態」と定義し、終局釣合い歪状態における断面軸力を「終局釣合い軸力 N_e 」と定義する。

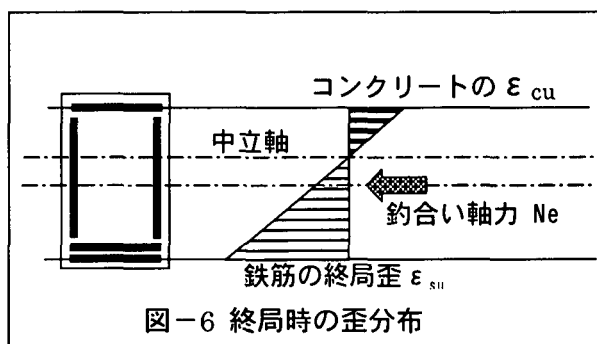


図-6 終局時の歪分布

3.2 コンクリートの圧縮から決まる終局状態

図-7はコンクリートの歪が終局ひずみ ϵ_{cu} に達して決まる終局状態を表す。最外縁の軸方向鉄筋の引張り歪 ϵ は、 $\epsilon_{su} \leq \epsilon \leq 0$ である。

図に表示していないが、全断面の歪が ϵ_{cu} になった状態が想定される。この状態は軸力のみで圧壊し（軸力最大）、曲げモーメントはゼロの状態である。

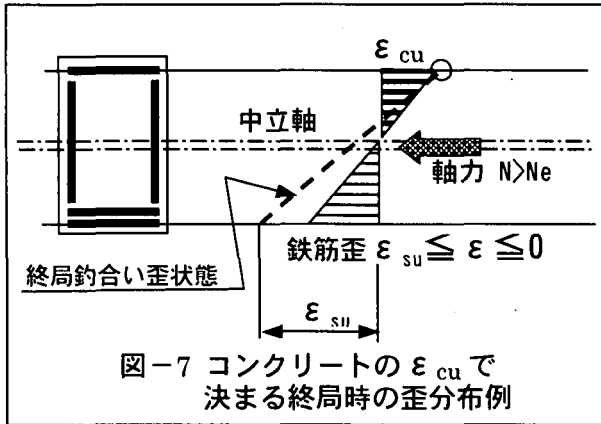


図-7 コンクリートの ϵ_{cu} で決まる終局時の歪分布例

3.3 鉄筋の引張りから決まる終局状態

図-8は最外縁の軸方向鉄筋が終局歪 ϵ_{su} に達して決まる終局状態を表す。圧縮側（図中上側）の歪 ϵ は、 $\epsilon_{su} \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu}$ である。

図中、[B]は上端の歪がゼロで下端引張り側は鉄筋の終局歪に達している。「[A]」はすべての鉄筋が鉄筋の終局歪 ϵ_{su} になった歪分布状態で、断面の曲げモーメントはゼロである。（軸力最小）

3.4 終局時の曲率・曲げモーメントと軸力の関係

コンクリートの歪が終局ひずみ ϵ_{cu} に達して決まる終局状態と最外縁の軸方向鉄筋が終局歪 ϵ_{su} に達して決まる終局状態を併せ考えたときの、終局曲率と終局モーメントを軸力との関係で図に表したのが図-9である。

A-B-C-Dでつなげた曲線となる。両者は終局釣合い軸力 [C] 点で連続する。

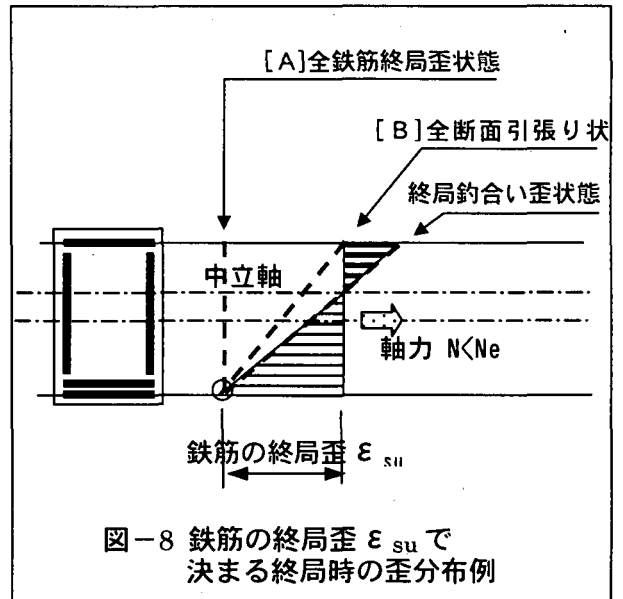


図-8 鉄筋の終局歪 ϵ_{su} で決まる終局時の歪分布例

終局曲率を示す図には図-3との関係が分かるように、鉄筋の歪が鉄筋の終局歪を越えてしまう範囲（曲率が非常に大きくなっている）も併記した。

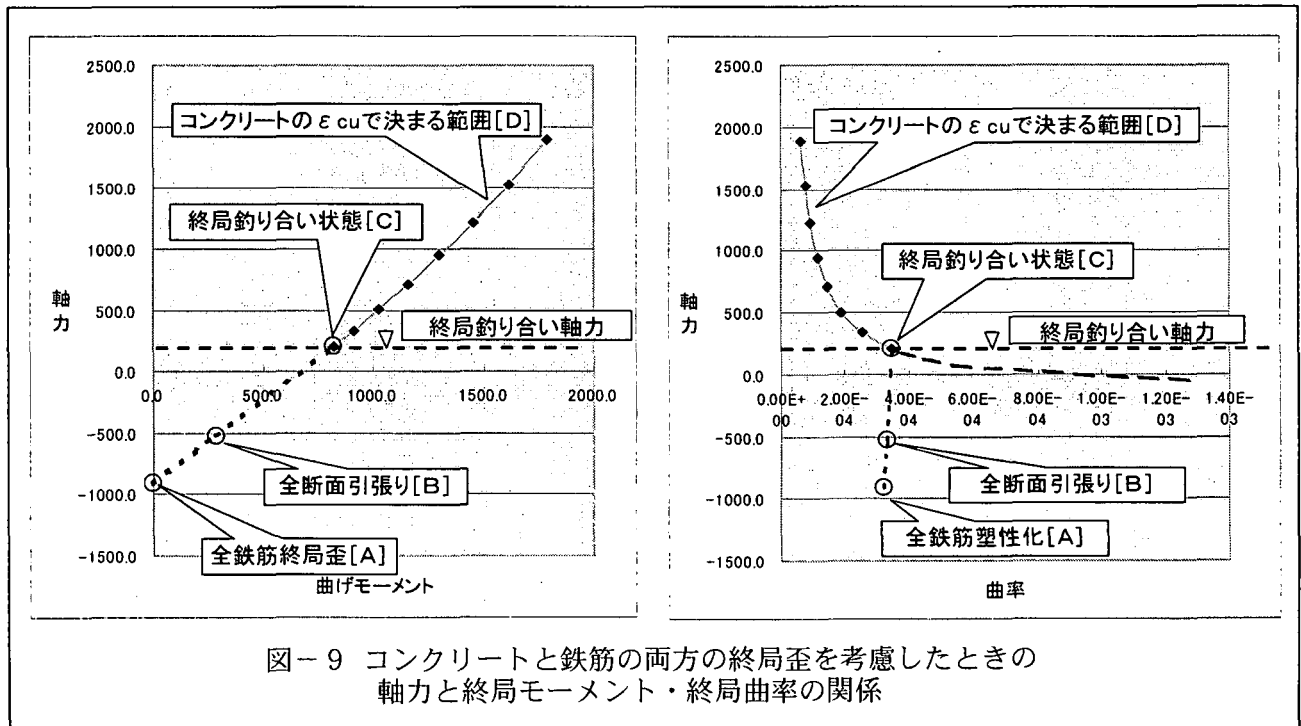


図-9 コンクリートと鉄筋の両方の終局歪を考慮したときの軸力と終局モーメント・終局曲率の関係

4. 橋脚の終局水平変位に与える影響

4.1 軸力変動の大きさ

図-1, 図-2のような1層1径間のラーメン橋脚の事例で軸力計算値を示すと表1のとおりとなった。梁部の左端で終局時は大きな引張り軸力となっている。(終局は5.3による)

表-1 軸力変動計算値

	柱下端	梁両端
常時(自重)	(左柱) 600 tf (右柱) 600 tf	(左端) 3 tf (右端) 3 tf
終局時(自重+地震荷重)	(左柱) 148 tf (右柱) 1052 tf	(左端) -104 tf (右端) +114 tf

4.2 コンクリートの ϵ_{cu} だけで判定した場合

終局曲率と終局モーメントが, 図-3, 図-4で示すようになる。

梁左端の軸力が図-3, 図-4で示す下限軸力(約10tf)より小さくなるため, 本来は終局の判定が不能になる。しかし, 終局曲率が非常に大きな値となるために, これから計算した終局時回転角 θ_u から塑性ヒンジ部を判定すると引張り軸力が生じる梁左端部は「終局に至らない」という結果となった。

4.3 軸方向鉄筋の終局歪も考慮し判定した場合

この場合には, 地震震度 $K=1.04$ で, 4つの塑性ヒンジが終局(構造不安定状態)となった。この時の水平変位は $\delta=1.6\text{m}$ となった。

この計算では, 鉄筋の終局歪 ϵ_{su} を5%として計算した。この値そのものは本論文の趣旨と異なるため別途検討が必要と考えている。

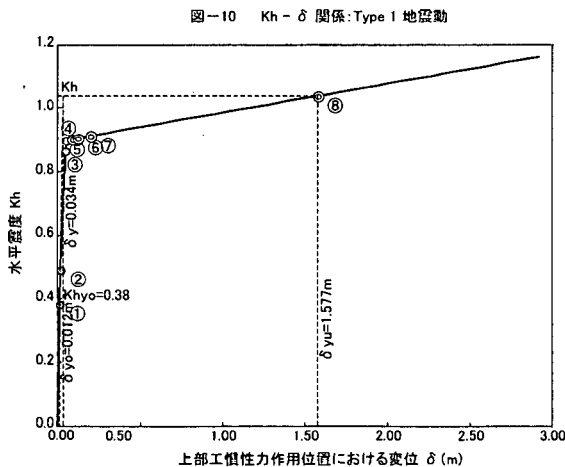


図-10 Kh - δ 関係: Type 1 地震動

5. まとめ

(1) 非線形静的解析における変動軸力評価法

ラーメン橋脚の非線形静的解析で, 梁部には上部工の地震水平力が支承を介して作用するため, 大きな引張り軸力になる場合がある。

はりの両端を強制変位させて解析している事例が見られるが, 地震力を作用させる図-2のような方法でないと判断を誤る可能性がある。

(2) 鉄筋の歪を終局判定に加える必要性

コンクリートの圧縮歪 ϵ_{cu} のみでは, 軸方向鉄筋の引張り歪が非常に大きな値を許容してしまう危惧がある。

終局の定義に, コンクリートの圧縮歪 ϵ_{cu} のみでなく「軸方向鉄筋の終局歪 ϵ_{su} 」からの規定が必要と考える。

(3) 終局釣合い軸力を境にした計算法

4.1で説明した「終局釣合い軸力」を境にして, 圧縮歪 ϵ_{cu} から, または鉄筋の終局歪 ϵ_{su} から, 終局時の曲率とモーメントを計算する方法を提案した。

ただし, 鉄筋の終局歪 ϵ_{su} をいくらにすべきかについては, 本論文では言及しなかった。今後の研究を待つところである。

参考文献

- 1) 運上 茂樹: 鉄筋コンクリート橋脚の終局状態の設定法に関する一考察, 土木学会第1回地震時保有水平耐力に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集
- 2) 松田 宏, 佐々木拓也, 松田信子, ベトルス・ラハユ・クスバルジャント: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の運用に関する一検討, 土木学会第3回地震時保有水平耐力に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集
- 3) 田崎 賢治, 運上 茂樹, 寺山 徹: 2層式鉄筋コンクリートラーメン橋脚の面内方向の耐震設計, 土木学会第1回地震時保有水平耐力に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集
- 4) 瀬川信弘, 久保田 翼, 青柳 守: 軸力変動を考慮したラーメン橋脚の非線形静的解析法に関する一考察, 第55回年次学術講演会