

セグメントの限界ひずみによる耐震照査法における部材の細長比と軸力比の影響

瀧上工業(株) 正会員 ○奥村 徹 名工大 フェロー会員 後藤 芳顕

1. はじめに: 土木学会の鋼・合成構造標準示方書における鋼部材の耐震安全性照査は、ファイバーモデルによる複合非線形の地震応答解析で得られる部材の有効破壊長領域の応答平均圧縮ひずみをあらかじめ部材セグメントに対して設定されている「限界ひずみ」以内であることをチェックすることでなされる。限界ひずみは有効破壊長さの部材セグメントに一定圧縮軸力下 P でセグメント両端に単調増加する一軸回転 θ を与えた場合の反力曲げモーメント M がピークから低下した 95%耐力点における圧縮パネルの平均ひずみで表している。鋼製橋脚の応答ひずみが「限界ひずみ」に到達した場合、橋脚の応答水平変位は一方向繰り返し載荷実験で得られる橋脚頂部の水平荷重 H —水平変位 δ 関係の包絡線においてピーク点から荷重が 5%低下した 95%耐力点に到達していると考えられている。また、この変位の 1/1.2 がピーク点での水平変位としている。

上記のセグメントの限界ひずみによる鋼部材の限界状態の照査の問題点として、応答ひずみの算定に幾何学的非線形性による影響を考慮しているが、限界ひずみには部材全体の幾何学的非線形性に起因した不安定挙動が考慮されていないことが挙げられる。すなわち、細長比や軸力比の大きな部材ではセグメントが限界ひずみに到達する以前に不安定現象で終局状態に到達するため、危険側の照査になる恐れがある。ここでは、以上の問題点を理論的に説明するとともに数値解析で定量的に明らかにする。

2. セグメントと橋脚の終局限界に差異が生じる理由: 終局限界状態を水平荷重のピーク点とした場合についてセグメントの限界ひずみで橋脚の終局状態を照査することの問題点を理論的に説明する。橋脚の基部セグメントを非線形回転パネ、基部セグメントから上を剛棒とモデル化する(図-1)。非線形回転パネの構成則は一定軸力作用下でのセグメントの曲げモーメント相対回転角関係として図-2のように与えられる。図-1のモデルをもとに変形を考慮して力のつり合いを考えると以下の式が得られる。

$$H = M/h - P\theta \quad (1)$$

水平荷重のピーク点到達時の条件 $dH/d\delta = (1/h)dH/d\theta = 0$ より、式(1)から以下の関係が得られる。

$$dM/d\theta = Ph \quad (2)$$

これより、水平荷重のピーク点到達時には基部セグメントの曲げモーメントはピーク前の正の勾配を有する領域(図-2)にあり、基部セグメントの曲げモーメントがピーク点 $dM/d\theta = 0$ に到達する以前であることがわかる。また橋脚

の高さ h と軸力 P が大きいほど、基部の M - θ 関係における勾配が大きな位置で橋脚が終局限界に到達するため、基部セグメントの終局限界到達と橋脚の終局限界到達の差は増大することがわかる。

3. セグメントと橋脚の終局限界の差異の定量的評価: ここでは鋼製橋脚を対象にシェル要素による pushover 解析をもとにセグメントの終局限界と橋脚の構造としての終局限界の差異を定量的に評価する。検討に用いる鋼製橋脚は図-3に示すようにシェル要素で離散化し、鋼材の構成則は三曲面モデルを用いた。断面パラメータを一定値 ($R_f = 0.4$, $\gamma/\gamma^* = 1$, $R_s = 0.7$, $n = 5$, $\alpha (= a/B) = 1.0$) とし、軸力比 P/P_y を 0.1~0.5、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を 0.2~0.8 の範囲で変化させた 15 ケースの pushover 解析を行った。計算結果として図-4(a)~(c)に P/P_y ごとの橋脚頂部の水平荷重 H —水平変位 δ 関係において、 H のピーク点を○、基部セグメントの平均曲げモーメント M のピーク点到達時を●で示す。また、図-5(a)~(c)には同様の H — δ 関係において、 H の 95%耐力点を△、基部セグメントの平均曲げモーメント M の 95%耐力点到達時を▲で示す。これらより、橋脚の水平荷重 H が、ピークに到達するつり合い点 (H_m, δ_m) や 95%耐力に低下するつり合い点 (H_{95}, δ_{95}) は、それぞれ、基部セグメントの曲げモーメント M が

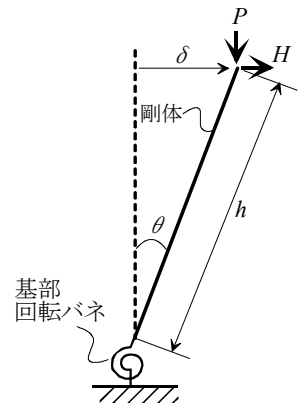


図-1 橋脚の簡易モデル

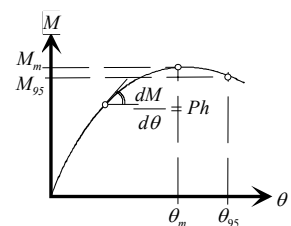
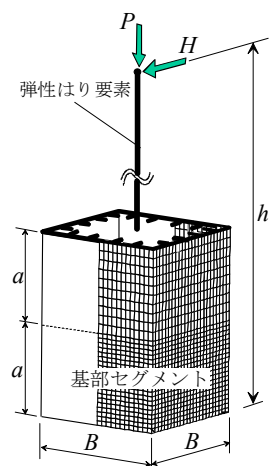
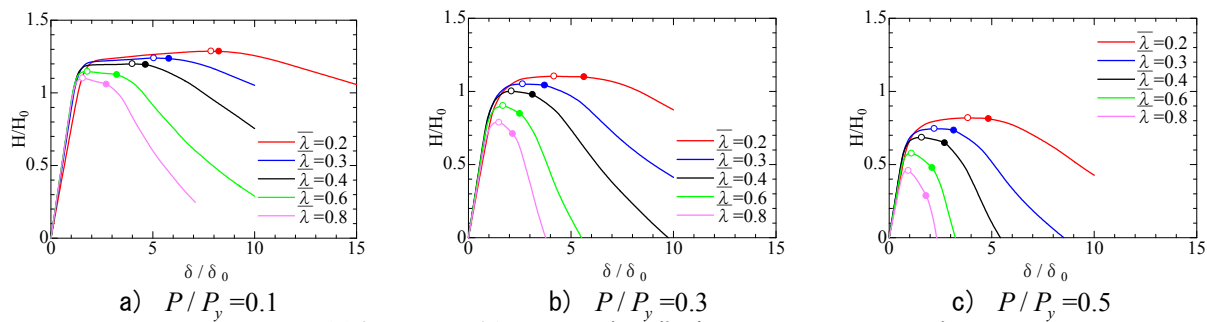
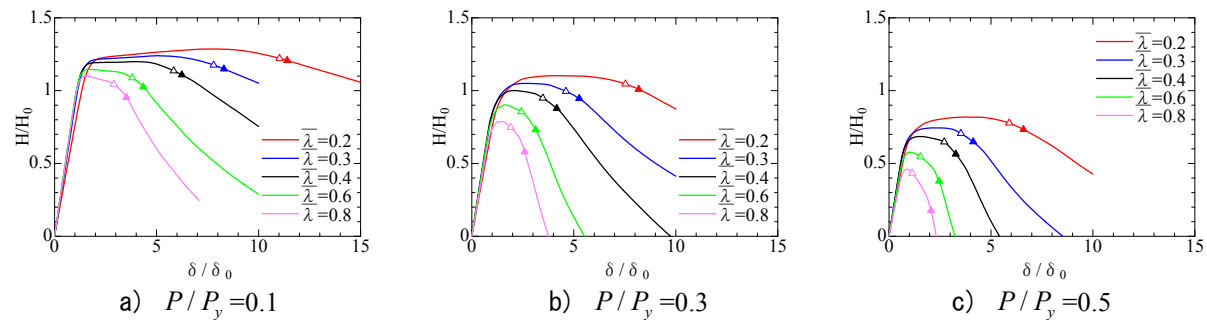
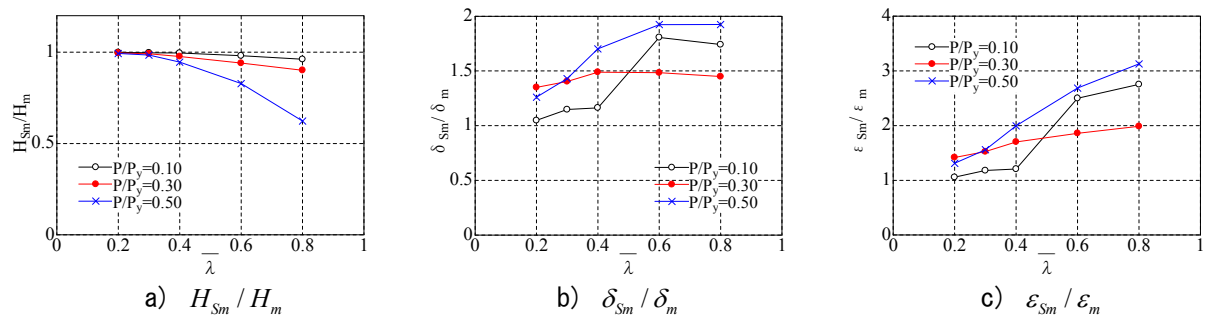
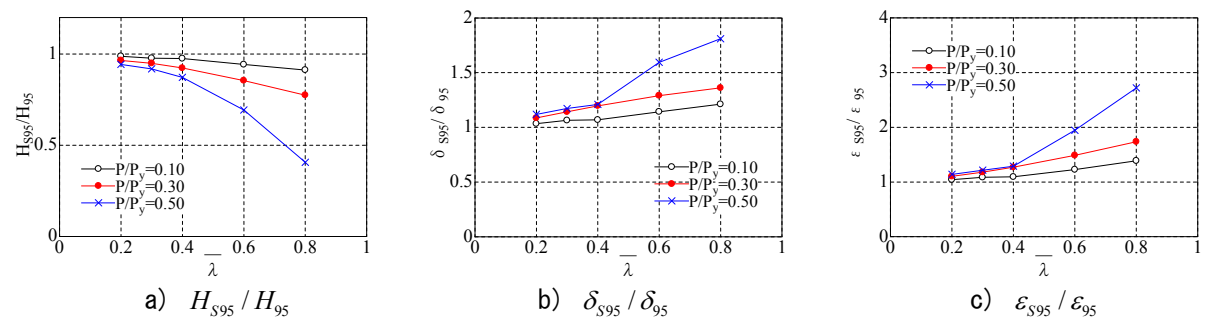
図-2 基部回転パネの M - θ 関係

図-3 橋脚の FE モデル

キーワード: 耐震照査法, 限界ひずみ, 細長比パラメータ, 軸力比

連絡先: 〒475-0826 愛知県半田市神明町 1-1 瀧上工業株式会社 TEL0569-21-4208

図-4 橋脚の H - δ 関係のピーク点と曲げモーメントのピーク点図-5 橋脚の H - δ 関係の 95%耐力点と曲げモーメントの 95%耐力点図-6 橋脚の H - δ 関係のピーク点と基部セグメントの平均曲げモーメントのピーク点における各力学量の比図-7 橋脚の H - δ 関係の 95%耐力点と基部セグメントの平均曲げモーメントの 95%耐力点における各力学量の比

ピークに到達する点(H_{Sm}, δ_{Sm})や95%耐力に低下する点(H_{95}, δ_{95})より前に位置している。さらに、軸力比 P/P_y と細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が H_{Sm}/H_m , δ_{Sm}/δ_m , ϵ_{Sm}/ϵ_m と H_{95}/H_{95} , δ_{95}/δ_{95} , $\epsilon_{95}/\epsilon_{95}$ に与える影響を図-6, 7に示す。これより、 H_{Sm}/H_m , H_{95}/H_{95} は P/P_y と $\bar{\lambda}$ の増加に伴い低下する。とくに $\bar{\lambda} \geq 0.6$, $P/P_y \geq 0.5$ の範囲では H_{Sm}/H_m は 83%, H_{95}/H_{95} が 66%以上も復元力 H が低下した軟化経路上に限界点を設定したことになり、かなり危険側の照査となる。またこれらの点は図-4, 5の H - δ 関係からも負勾配の大きな軟化域上に位置していることがわかる。変位とひずみについては若干傾向にばらつきがみられるものの、 P/P_y と $\bar{\lambda}$ の増加に伴い δ_{Sm}/δ_m , ϵ_{Sm}/ϵ_m と δ_{95}/δ_{95} , $\epsilon_{95}/\epsilon_{95}$ は増大する。セグメントの95%耐力点に相当する「限界ひずみ」 ϵ_{95} は図-7 c)に示す $\bar{\lambda} \geq 0.6$, $P/P_y \geq 0.5$ の範囲では橋脚の95%耐力点のひずみ ϵ_{95} に対して約2倍以上も過大評価している。以上から、独立したセグメントの限界状態で橋脚の限界状態を評価すると目標とする限界状態をかなり危険側に評価する場合もあるので、限界ひずみの評価式に橋脚としての P/P_y と $\bar{\lambda}$ の影響を適切に含む必要がある。

4. まとめ: 限界ひずみを用い部材の限界状態を照査する土木学会の示方書¹⁾の問題点を指摘した。部材の細長比パラメータと軸力比が大きくなると橋脚全体の不安定現象でセグメントの終局限界と橋脚の終局限界との差が大きくなるので、限界ひずみの評価式に橋脚としての P/P_y と $\bar{\lambda}$ の影響を適切に含む必要がある。

参考文献: 1) 鋼構造委員会, 鋼・合成構造標準示方書小委員会: 2008年制定 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編, 土木学会, 2008.