

曲率あるいは歪を用いた耐震照査法による鋼製橋脚の限界変位の 予測精度に与える荷重履歴の影響

名古屋工業大学 正会員 海老澤健正

同 フェロー会員 後藤 芳顕

同 正会員 野中 哲也

1. まえがき：現在の道路橋示方書(以下、道示)¹⁾と土木学会の鋼・合成構造標準示方書(以下、学会示方書)²⁾によるエネルギー吸収部材である鋼製橋脚の耐震照査では、いずれも変形成分である、曲率や歪の限界値に対して応答値を照査する手法を提案している。しかし、限界値の設定法や応答値の算定法は両者で異なっており、道示の方法は曲率照査法、学会示方書の方法はひずみ照査法である。ここでは、これらの照査法で算定される橋脚の限界変位が限界状態として想定されている点の変位をどの程度正確に表しているかをいくつかの異なった荷重履歴を与えることで検討する。なお、検討の基準に用いる変位の精解は三曲面モデルを導入したシェル要素で算定する。

2. 照査法

(a) **限界状態の定義**：いずれの照査法も橋脚の1方向繰り返し載荷実験より求めた水平荷重－水平変位関係の包絡線をもとにして終局限界を定義している。道示では包絡線のピーク点、一方、学会示方書ではピークから5%荷重低下点である95%耐力点をそれぞれの終局限界としている。ここでは地震荷重時の終局限界も同様の定義に基づくことを前提とする。

(b) **限界値とその設定法**：

<道示>¹⁾限界値は曲率で表されている。M-φモデルを用いた橋脚のPushover解析を実施し、繰り返し実験の包絡線のピーク点変位に相当する水平変位が生じるときの曲率を限界曲率(許容曲率)として設定している。道示の限界曲率と限界変位である包絡線でのピーク点変位は一対一に対応している。

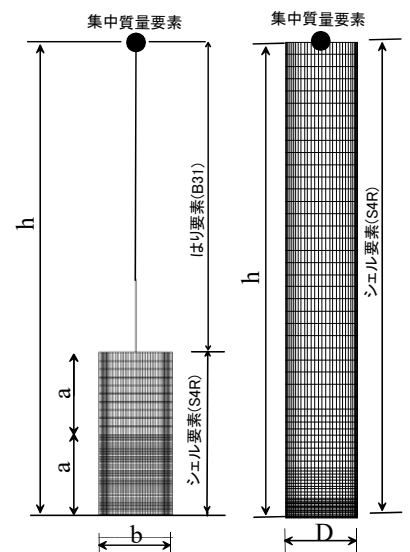
<学会示方書>²⁾限界値は有効破壊長さの部材セグメント圧縮パネルの平均歪で表されている。限界ひずみは一定圧縮荷重を載荷した部材セグメント両端に単調増加する一軸回転を与えることで曲げモーメントがピークから低下した95%耐力点における圧縮パネルの平均歪で表している。ここでは橋脚基部セグメントの圧縮パネルの平均歪が限界歪に到達した場合に橋脚の水平復元力も95%耐力点に到達していると考えている。また、この点の水平変位の1/1.2が包絡線のピーク点変位としている²⁾。

3. 限界変位の精度の検討方法：文献3)、4)でのパラメトリックスタディに用いられている鋼製橋脚のうち道示の限界

値の適用範囲内の橋脚である円形断面橋脚14種類(径厚比パラメータ $R_t=0.04\sim0.08$ 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.285\sim0.4$ 、軸力比 $P/P_y=0.10\sim0.20$)、正方形断面橋脚9種類(幅厚比パラメータ $R_R=0.3\sim0.5$ 、補剛材剛比 γ/γ^*

$=1.00\sim2.47$ 、 $\bar{\lambda}=0.2\sim0.42$ 、 $P/P_y=0.075\sim0.30$)を対象とした。これらに加えて、学会示方書では P/P_y について限界歪の適用範囲がないことから、表1に示す P/P_y が大きいケースも検討対象とした。追加ケースでのパラメータの値は一般的な鋼製橋脚では見られないが、アーチ橋等の部材セグメントではあり得ると考えられる。

対象とする限界変位はピーク点変位 u_p を用いる。道示はバイリニア(正方形断面)あるいはトリリニア(円形断面)のM-φモデル、学会示方書では鋼材の構成則をバイリニアとして幾何学非線形性を考慮したファイバーモデルを用い、限界曲率あるいは限界歪に到達した時点の限界変位をもとにピーク点変位と算定する。道示はピーク点変位を直接算定できるが、学会示方書では95%耐力点の変位が限界変位となるので、この変位の1/1.2²⁾をピーク点変位



(a) 正方形断面橋脚 (b) 円形断面橋脚
図1 解析モデル

表1 道示範囲外の解析対象橋脚

断面形状	鋼種	P/P_y	$\bar{\lambda}$	その他のパラメータ
正方形	SM490	0.1, 0.15, 0.2-0.7 (0.1刻み)	0.42	$R_R=0.5$, $\gamma/\gamma^*=1.24$
円形	SM490		0.39	$R_t=0.06$

表2 三曲面モデルのパラメータ

断面形状	鋼種	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\sigma_u(\text{MPa})$	ε_{yp}	f_b/σ_y	β	ρ	κ
正方形	SM490	206	0.3	315.5	584.1	0.0091	0.65	100	2	3
円形	SM490	206	0.3	315.5	584.1	0.0091	0.65	150	2	2
円形	SS400	206	0.3	235.3	494.8	0.0102	0.58	150	2	2

キーワード 耐震設計, 限界変位, 設計法, FE解析, 鋼製橋脚

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市長和区御器所町 名古屋工業大学 TEL052-735-5021 FAX052-735-5563

とした。なお、道示 M- ϕ モデルでは限界変位に対する荷重履歴の影響がないため Pushover 解析のみによりピーク点変位を求めた。以上の照査法で算定されるピーク点変位とシェル要素で離散化したモデルによるピーク点変位の精解と比較する。精解を求める FE 解析でのモデルの概要を図 1 に、鋼材の三曲面モデルのパラメータを表 2 に示す。荷重履歴の異なる解析としては、Pushover 解析、初期降伏変位 u_0 を基準変位とする水平 1 方向漸増繰り返し解析に加えて、JRT 観測波 NS 成分を与えた動的応答解析を行った。動解での限界変位は橋脚が不安定状態に到達時⁵⁾までに発生する最大応答変位とした。なお、このように定義した限界変位は Pushover 解析ではピーク点変位と一致する。

4. 解析結果

(a) 載荷履歴の限界変位への影響 (図 2) : 横軸を FE 解析による限界変位(ピーク点変位)とし、縦軸に静的繰り返し載荷および動的解析で得られた限界変位を示す。これによると、Pushover 解析での限界変位と比べ 1 方向繰り返し載荷での限界変位は小さな値となっており、特に変形能の大きい橋脚でその傾向が顕著となっている。このことから、限界変位は載荷履歴の影響を受けやすく、Pushover 解析により評価される限界変位は危険側になる可能性がある。また、動的解析での限界変位は、円形断面橋脚ではおよそ Pushover 解析と漸増繰り返し載荷の間の値をとっていることから、漸増繰り返し載荷は限界変位を安全側に評価すると考えられる。一方、正方形断面橋脚では概して円形断面橋脚と同様の傾向であるが、動的解析の限界変位が 1 方向繰り返し載荷解析での値を若干下回る場合があり、必ずしも漸増繰り返し載荷が安全側となっていない場合も見られる。

(b) 道示による限界変位 (図 3) : 道示による限界変位を横軸に FE 解析による限界変位を縦軸にとって比較を行う。これによると道示で評価される円形断面橋脚の限界変位は 1 方向繰り返し載荷での限界変位での下限が適切に抑えられている。正方形断面橋脚でもほぼ同様であるが、動解ではやや危険側のケースも見られる。

(c) 学会示方書での限界変位 (図 4) : 白抜きで示す橋脚パラメータが道示の適用範囲内では円形断面、正方形断面橋脚ともほぼ道示と同様の傾向である。しかし、学会示方書の適用範囲でも P/P_y が道示の適用範囲外となると正方形断面橋脚では FE 解析と比べて危険側の予測となるケースが見られる。

5. まとめ : 道示での許容曲率に基づく限界変位、鋼・合成構造標準示方書の方法は平均歪に基づく限界変位を FE 解析による限界変位と比較することで、その予測精度について検討を行った。その結果、道示での限界変位は、最も厳しい載荷履歴の 1 つとして考えられる繰り返し漸増載荷を与えた FE 解析での限界変位に対して適切な範囲で安全側の値となっている。一方、学会示方書の円形断面橋脚の限界変位は軸力比が高い場合にはその適用範囲内であっても FE 解析での限界変位に対して危険側となる場合がある。今回は限られた橋脚種類での検討であるため、今後さらに多くの橋脚に対して検証する予定である。

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, 2014. 2) 土木学会 : 鋼・合成構造標準示方書耐震設計編, 2008. 3) 後藤芳顕ら : 土木学会論文集, No.780, pp.181-198, 2005. 4) 後藤芳顕ら : 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.122-141, 2007. 5) 後藤芳顕ら : 構造工学論文集, Vol.55A, pp.629-642, 2009.

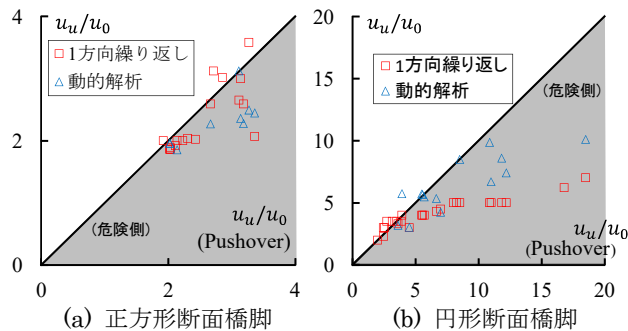


図 2 載荷方法による限界変位への影響 (FE 解析)

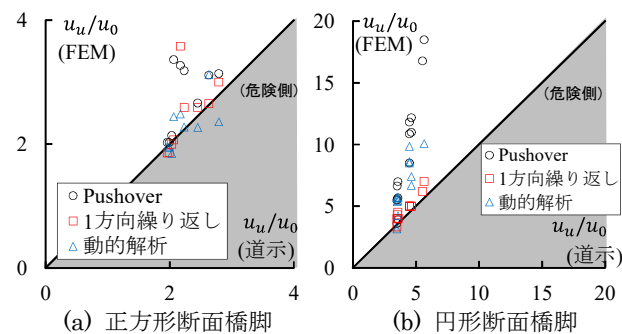


図 3 道路橋示方書の限界変位の精度

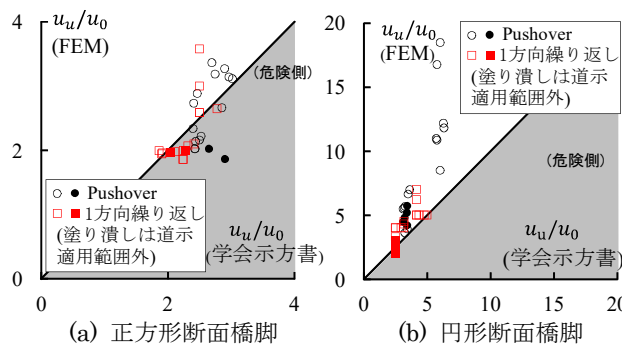


図 4 土木学会標準示方書の限界変位の精度