

耐震 One Point Advice #8

耐震性能評価における P- δ 関係と許容塑性率
-新旧道路橋示方書の比較-

1. はじめに

道路橋下部構造の性能照査型耐震設計に際しては、水平力~水平変位関係、部材塑性率、許容塑性率の算定が重要であり、耐震性能の照査手法を工学的にきちんと理解する必要がある。

道路橋示方書（道路協会）は、平成 24 年にて旧示方書[1]から新示方書[2]に改定された。全 5 編の中でも V 耐震設計編は多くの改定が行われている。特に「10 章 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有耐力及び許容塑性率」について、重要な改訂部分があり、本報の検討対象としたい。

そこで、本報では、鉄筋コンクリート単柱式橋脚の水平力~水平変位関係および許容塑性率について、新旧示方書を比較しながら、改訂のポイントを示したい（文中では、耐震設計の慣例に従って、水平力~水平変位関係を P- δ 関係、曲げモーメント~曲率関係を M- ϕ 関係と略記する）。

なお、性能設計の議論に際しては、耐震性能の等級（耐震性能 1，耐震性能 2，耐震性能 3）と地震動レベル（レベル I、レベル II）を説明する必要があるが、これは他書を参照されたい。

2. P- δ 関係と許容変位/許容塑性率

今回の道路橋示方書の改定では、許容変位/許容塑性率の変更が特に重要である。旧示方書では、対象橋脚の終局限界状態の変位を求め、各要求性能及び地震動のタイプ別に定めた安全係数を用いて許容変位を求めるように定められていた。これが改定後は、要求性能ごとに限界状態の変位を求め、安全係数を用いて算出される。

まずは、以下に旧道路橋示方書[1]の終局限界状態および新道路橋示方書[2]の限界状態の定義を整理する。

① 旧示方書

・終局限界状態：

最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートの圧縮ひずみがそれぞれの地震動のタイプに対する終局ひずみ ϵ_{cu} に達するとき

・限界状態：

最外縁の軸方向鉄筋位置において軸方向鉄筋の引張ひずみが許容引張ひずみ ϵ_{st} に達するとき、もしくは、最外縁の軸方向鉄筋位置においてコンクリートの圧縮ひずみが限界圧

縮ひずみ ϵ_{ccl} に達するときのいずれか先に達する状態

・許容塑性率：下式にて与えられる。

$$\mu_a = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y} \quad (1)$$

ここで、上式の許容塑性率 μ_a は、降伏後から終局変位までの塑性変位を安全係数 α にて除し、これに降伏変位を足し合せた数値； $\frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha} + \delta_y$ とも解釈でき、下式のような展開にて、説明できる。

$$\mu_a = \frac{\delta_a}{\delta_y} = \frac{\delta_y + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha}}{\delta_y} = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y} \quad (2)$$

表—1 曲げ破壊型と判定された場合の安全係数

	タイプ1	タイプII
耐震性能2	$\alpha=3.0$	$\alpha=1.5$
耐震性能3	$\alpha=2.4$	$\alpha=1.2$

② 新示方書

・限界状態変位：

δ_{ls2} ：耐震性能2の限界状態変位， δ_{ls3} ：耐震性能3の限界状態変位

・許容塑性率：

下式のように、形式上、耐震性能2と耐震性能3に対して定義されている。

$$\text{(耐震性能2)} : \mu_a = \frac{\delta_{ls2}}{\alpha_2 \delta_y} \quad (3)$$

$$\text{(耐震性能3)} : \mu_a = \frac{\delta_{ls3}}{\alpha_3 \delta_y} \quad (4)$$

ここで、安全率： $\alpha_2=1.2$ 、 $\alpha_3=1.2$

③ P- δ 関係での比較

これらの定義を基に、P- δ 関係等を作成し、部材の評価を行うが、P- δ 関係の骨格曲線と各限界状態は図—1、図—2 ように表される（ここでは、曲げ破壊型と判定された場合について示していることを付記する）。

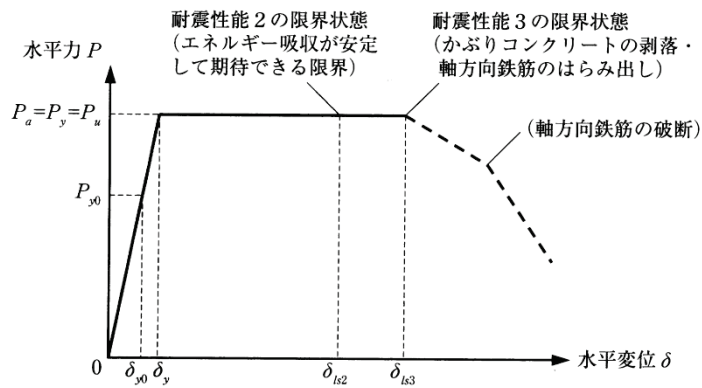


図-1 鉄筋コンクリート橋脚の P- δ 関係と限界状態：
 新示方書 図-解 10.2.1 [1]

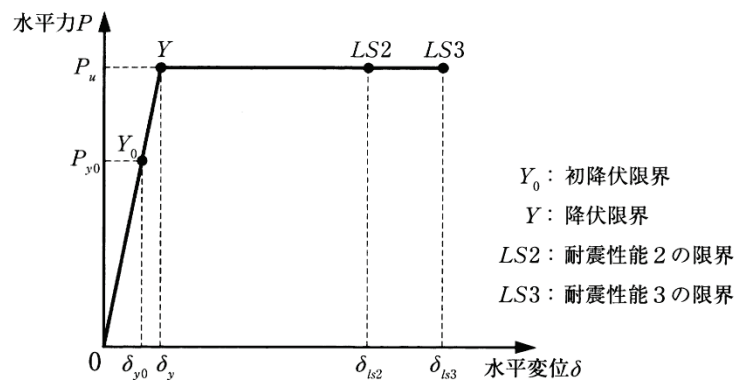


図-2 鉄筋コンクリート橋脚の骨格曲線と限界変位：
 新示方書 図-解 10.2.1 [1]に修正加筆

3. 解析事例

ここで、RC 単柱式橋脚を対象とした解析事例を呈示したい。対象橋脚の概要を図-3 に、基部断面の鉄筋レイアウトを図-4 に示している。

本報では、橋脚本体をファイバーモデルによりモデル化し、橋軸方向のプッシュオーバー解析を実施した[5]。さらに、新旧示方書に基いて算定された諸数値を表-2 に一覧化し、P- δ 関係を図-5、図-6 に示した（本報では、橋軸方向のみを取扱う）。



図-3 対象橋脚：単柱式 RC 橋脚



図-4 橋脚基部断面の配筋

表-2 解析結果

	旧道示	新道示	新道示／旧道示
塑性ヒンジ長 L_p (mm)	1100.0	765.6	—
コンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu}	0.00444	—	—
コンクリートの限界圧縮ひずみ ϵ_{ccl}	—	0.00660	—
耐震性能2の引張許容ひずみ ϵ_{st2}	—	0.02567	—
耐震性能3の引張許容ひずみ ϵ_{st2}	—	0.03593	—
降伏変位 δ_v (mm)	51.5	48.0	0.931
終局変位 δ_u (mm)	414.5	—	—
限界状態変位 δ_{ls2} (mm)	—	210.0	—
限界状態変位 δ_{ls3} (mm)	—	290.5	—
タイプ I 耐震性能2の許容塑性率 μ_a	3.35	3.65	1.089
タイプ I 耐震性能3の許容塑性率 μ_a	3.94	5.05	1.281
タイプ II 耐震性能2の許容塑性率 μ_a	5.70	3.65	0.640
タイプ II 耐震性能3の許容塑性率 μ_a	6.88	5.05	0.734
タイプ I 耐震性能2の許容変位 δ_a (mm)	172.5	175.0	1.014
タイプ I 耐震性能3の許容変位 δ_a (mm)	202.7	242.1	1.194
タイプ II 耐震性能2の許容変位 δ_a (mm)	293.5	175.0	0.596
タイプ II 耐震性能3の許容変位 δ_a (mm)	354.0	242.1	0.684
μ_r/μ_a (変位)	0.529	0.827	1.563
塑性率の照査	OK	OK	—

図-5 は、P- δ 曲線上に、旧示方書の終局変位及び許容変位を、各要求性能及び地震動タイプごとに示した。ここでは、表-1 に示した 4 つの安全係数について、許容変位（横軸は、許容塑性率 \times 降伏変位により算定した変位にて示している）を図中に併記しているが、当然ことながら α が大きくなれば、許容変位は小さくなる（左に移動する）。

一方、図-6 は新示方書の各限界状態変位及び各許容変位を示した。図-5 と図-6 の比較により、（一例ではあるが）新旧示方書での数値的な差異を理解することができる。

なお、表-2 の最下段には、最大応答塑性率 μ_r を設定し、照査結果 $\mu_r/\mu_r = 0.529$ （旧示方書）、 $\mu_r/\mu_r = 0.827$ （新示方書）を示しているが、照査結果の大小比較は一例のみの解析結果であり、新旧示方書の評価には、さらなる事例解析が必要である。

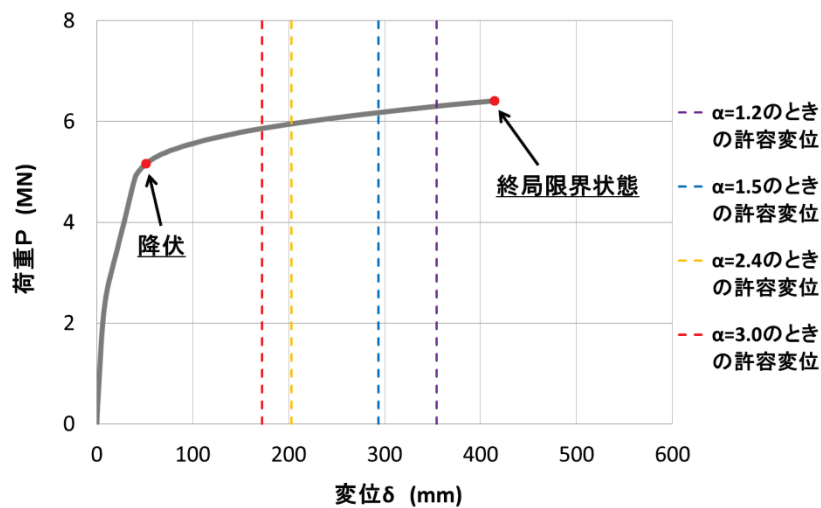


図-5 P- δ 関係と旧示方書の許容変位

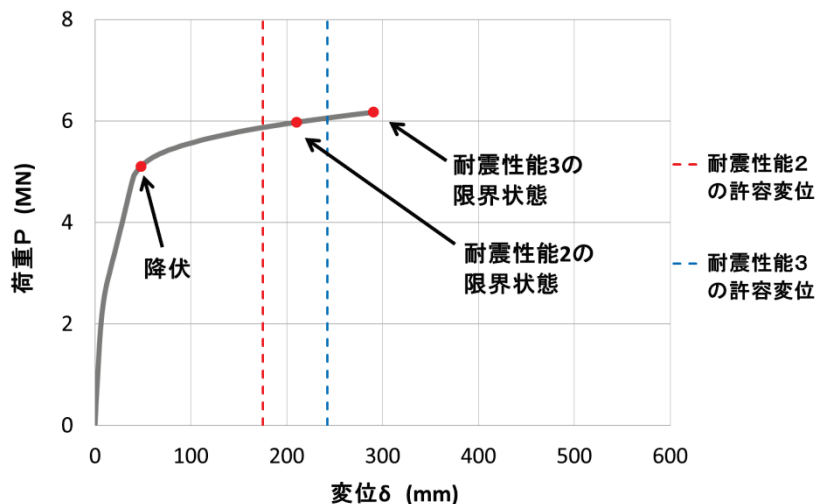


図-6 P- δ 関係と新示方書の許容変位

4. あとがき

本報では、耐震性能評価に用いる許容靱性率を旧示方書と新示方書を比較しながら示した（事例解析等は、本学の卒業論文[4]を用いている）。

今回は、非線形応力-ひずみ関係を構成則とするファイバーモデルを用い、プッシュオーバー解析によりP- δ 関係を算出した[5]。一方、「V耐震設計編 10章 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有耐力及び許容塑性率」では、M- ϕ 関係を構成則としてP- δ 関係を求める手法が明示されている。

いずれの場合も、P- δ 関係を基に地震時保有水平耐力や許容塑性率もしくは許容変位を導き、地震時の応答値に相当する値と比較することで耐震性能評価が行われるが、これは変位ベースによる耐震設計(displacement-based seismic design)であり、詳しくは、本講座「耐震 One Point Advice #7 保有靱性率と応答塑性率」を参照されたい。

5. 参考文献

- [1] (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012
- [2] (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2002
- [3] (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997
- [4] 松村直樹：RC ラーメン橋脚を対象とした動的増分解析による耐震性能評価に関する研究，東京都市大学工学部都市工学科 卒業論文 (2013.3)
- [5] 吉川・青戸・甲斐：数値シミュレーションで考える構造解析 -ソフトで学ぶ非線形解析と応答解析-、全 201 ページ、建通新聞社 (2009.11)