

耐震 One Point Advice #7

保有靱性率と応答塑性率

1. 保有靱性率と応答塑性率

耐震設計および応答解析に際しては、‘靱性率’および‘塑性率’が用いられるが、定義と用法など、頻繁に使う割には、分かりにくい概念である。そこで、本書では、これを‘保有靱性率’および‘応答塑性率’のように呼称し、以下にその解釈と用法について記した（主として、文献[1]に基づき記述している）。

まずは、両者の考え方を整理して、定義を以下のように記す。

- ・保有靱性率：その部材が崩壊するときの終局変位。部材の保有する最大変形能力。
- ・応答塑性率：ある地震荷重/設計地震動による応答変位。通例、最大変位を考える。

これらは、また欧米にて多用される **capacity** と **demand** と対応させると、保有靱性率⇒**capacity**、応答塑性率 ⇒ **demand** のように関係付けられることを付記したい。

また、このような概念は、いわゆる変位法による耐震設計(**displacement-based seismic design**)の枠内にて議論されるもので、従来の荷重ベースの弾性設計変位法による耐震設計(**force-based seismic design**)に対比されるものである[2]。

2. 終局変位と最大変位

次に、終局変位 δ_u と最大応答変位 δ_r を算定/決定するための事例[1]を示したい。

終局変位は、その部材の構造実験または部材解析によって定めることが一般的である。例えば、実験による場合として、図1に例示した。

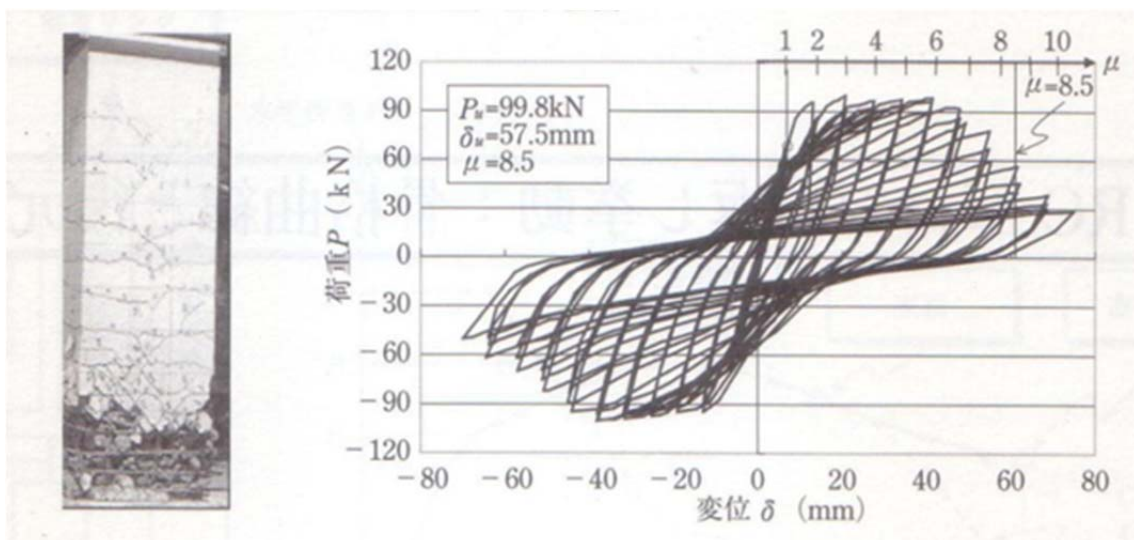
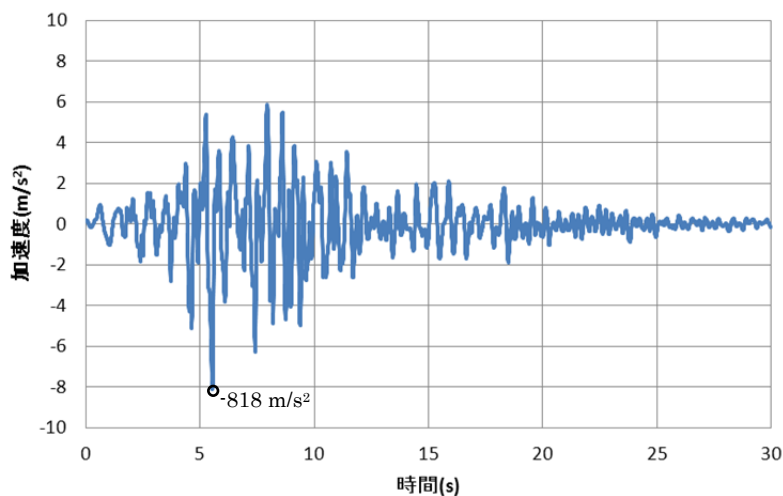
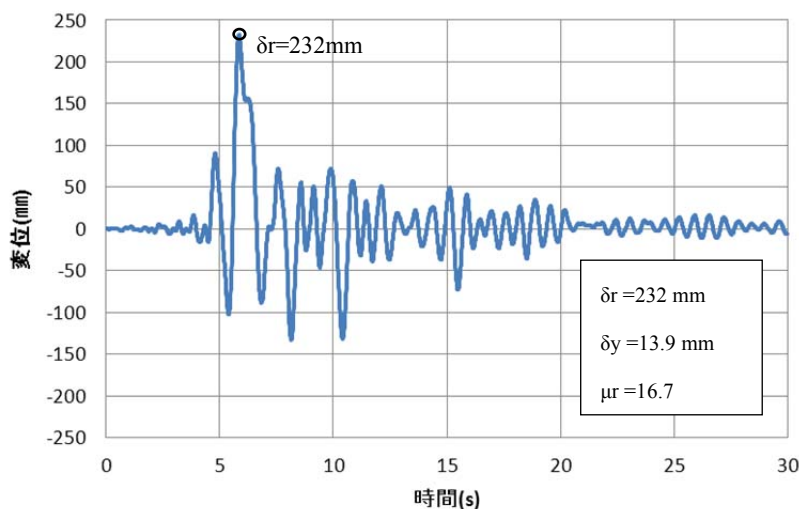


図1：RC橋脚を対象とした静的繰返載荷実験：P- δ 曲線

これは、鉄筋コンクリート橋脚（左写真）を対象とした静的耐震実験（厳密に言うと、片持ち梁形式の降伏変位整数倍漸増による変位制御型正負交番繰返し実験）から得られた荷重—変位関係である。得られた荷重～変形関係（P- δ 曲線）から終局点を読みとり、その点での変位が終局変位となる。この実験の場合、正側にて終局変位 $\delta_u = 57.5\text{mm}$ が得られた（終局点の考え方と定義も単純ではないが、ここでは触れないこととする）。さらに、降伏変位 $\delta_y = 6.8\text{mm}$ であるので、両者の比をとり、保有靱性率は $\mu_d = 8.5$ と算定される（図中に記している）。



(a) 入力地震動の時刻歴波形



(b) 応答変位の時刻歴波形

図 2：入力地震動と応答変位履歴

一方、応答塑性率（最大応答変位）の事例として、図2のような応答解析結果を示した。これは、ある入力地震動（図(a)：入力加速度の時刻履歴）が作用した時の応答履歴（図(b)：応答変位の時刻履歴）である。この解析の場合、最大応答変位 $\delta_r = 232\text{mm}$ が得られ、この構造部材の降伏変位が $\delta_y = 13.9\text{mm}$ であるので、両者の比をとり、応答塑性率は $\mu_r = 16.7$ と算定される（図1と図2は、異なる構造部材であることをお断りしたい）。

ここで、下添え字として、u = ultimate(終局), r = response(応答), y = yield(降伏) としてことを付記する。

3. 耐震性照査

耐震設計の骨格となる性能照査に際しては、上記のように定められた終局変位 δ_u と最大応答変位[3]を対比してなされるが、実際の設計作業に際しては、両者を降伏変位 δ_y にて除し、無次元化することが多い。すなわち、保有靱性率と応答塑性率の算定式は、次式のようである。

$$\text{保有靱性率 } \mu_d = \frac{\text{終局変位 } \delta_u}{\text{降伏変位 } \delta_y} \quad (1)$$

$$\text{応答塑性率 } \mu_r = \frac{\text{最大応答変位 } \delta_r}{\text{降伏変位 } \delta_y} \quad (2)$$

最終的に耐震性能照査では、次式によって判定される。

$$\text{応答塑性率 } \mu_r < \text{保有靱性率 } \mu_d \quad : \text{OK (安全) 崩壊しない} \quad (3)$$

$$\text{応答塑性率 } \mu_r > \text{保有靱性率 } \mu_d \quad : \text{NG (危険) 崩壊する} \quad (4)$$

このような照査式に関連して、現行の道路橋示方書（v耐震設計編）[3]での事例を示すと、次のような書式をとっている（示方書での記述を簡略化している）。

① 動的解析による照査法（変位ベース照査）：

$$\mu_r \leq \mu_a \quad (\text{応答塑性率 } \mu_r \text{ が、許容塑性率 } \mu_a \text{ 以下となること}) \quad (5a)$$

② 残留変形に対する照査（変位ベース照査）：

$$\delta_R \leq \delta_{Ra} \quad (\text{残留変位 } \delta_R \text{ が、許容残留変位 } \delta_{Ra} \text{ 以下であること}) \quad (5b)$$

③ 静的解析による照査法（荷重ベース照査）：

$$k_{hc}W \leq P_a \quad : (\text{慣性力 } k_{hc}W \text{ が、地震時保有水平耐力 } P_a \text{ 以下となること}) \quad (5c)$$

ここでは、保有靱性率 μ_d に替わって許容塑性率 μ_a が用いられていることが分かる（式(5a)）。許容塑性率 μ_a とは、保有靱性率 μ_d に対して安全係数により減じた設計用値と考えると分かり易い。また、式(5c)では、荷重ベースの照査式となっているが、左辺の設計震度 k_{hc} の算定に際しては、部材の塑性化を前提としたエネルギー一定則が採用されているので、式(3)と式(5a)と同じ意味合いを持つ。

4. あとがき

本報は、いわゆる変位法による耐震設計(displacement-based seismic design)の基本的な流れに基づくものである。変位法耐震設計では、保有靱性率と応答塑性が最も重要な特性である（従って、破壊モードが曲げ破壊型（せん断破壊が回避される）ことを前提としていることを付記したい）。我国では、この2つの呼称が頻繁に用いられるが、耐震設計先進国、欧米では、替わって capacity と demand[2]が多く使われることを再記したい。

参考文献

- [1] 吉川弘道：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析，丸善株式会社，(2008.2)
- [2] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J. : Displacement-Based Seismic Design, IUSS Press (2007)
- [3] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）平成 24 年 3 月