

都市設計製図：平成 25 年度

鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計

地震時保有水平耐力法による耐震設計に関する解説

1. 耐震設計計算の流れ

図-1に、震度法による鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計の流れを示す。示方書では、震度法に用いる2つの計算方法を、「弾性域の振動特性を考慮した震度法」、ならびに、「地震時保有水平耐力法」と呼んでいるが、両者を明確に区別するため、ここでは、前者を許容応力度法と呼んでいる。

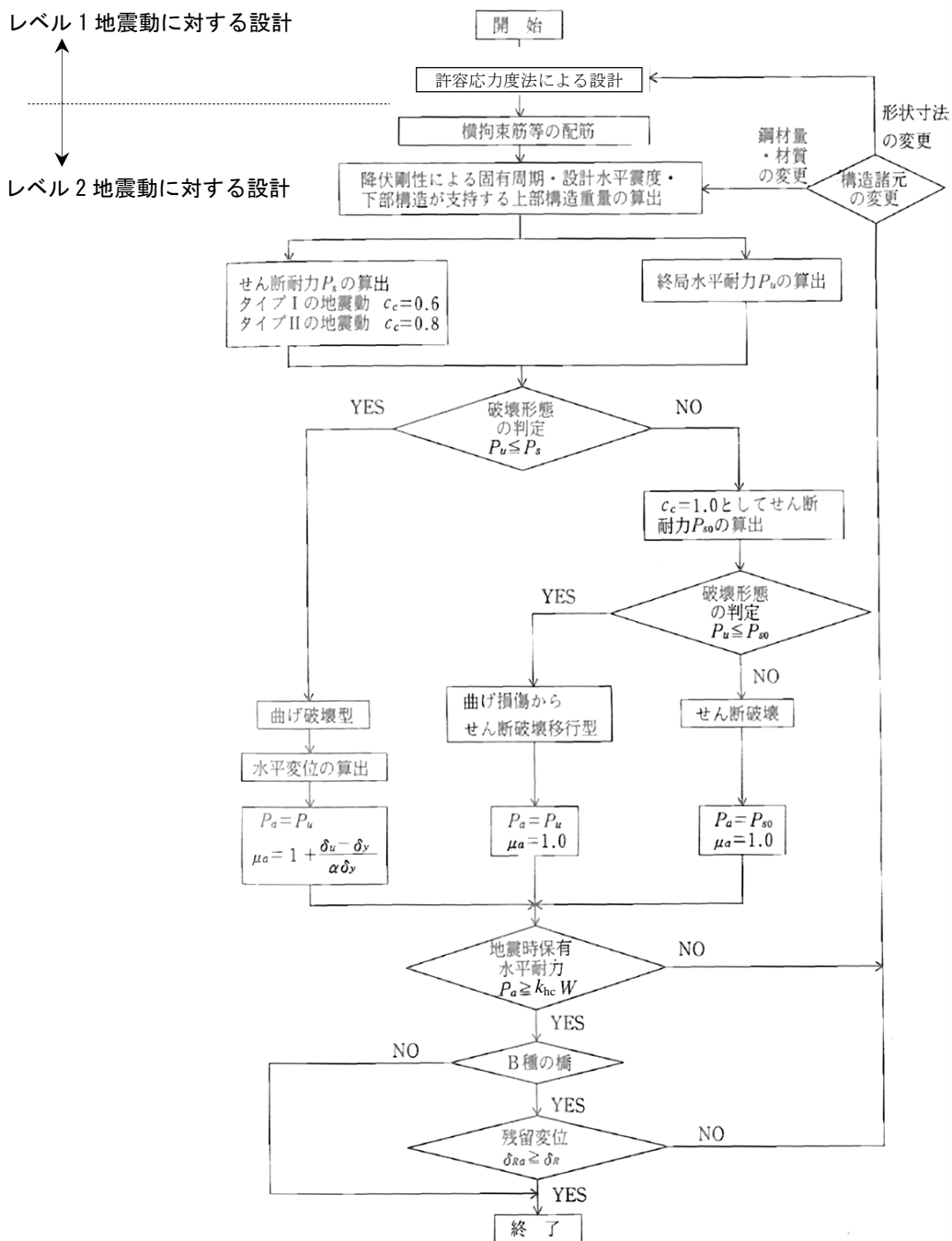


図-1 鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計計算フロー（文献 3)に加筆修正）

①レベル1地震動に対する設計

まず、許容応力度法による躯体の設計を行う。ここでは、レベル1地震動による慣性力が作用した場合に、躯体の各材料（コンクリート、主鉄筋）に生じる応力度が、それぞれの許容応力度以内となるように、断面の大きさ、鉄筋量（主に主鉄筋）を決定することになる。

②レベル2地震動に対する設計

次に、地震時保有水平耐力法による躯体の設計を行う。ここでは、レベル2地震による慣性力が作用した際に、橋脚に過大な変形が生じて倒壊せず、復旧可能な損傷に収まるよう、主に帯鉄筋および中間帯鉄筋の配筋を決める。この計算過程のポイントを、フローに従い整理してみる。

(1) 破壊形態の判定

次式によって、破壊形態を判定する。

$$\begin{aligned} P_u \leq P_s & : \text{曲げ破壊型} \\ P_s < P_u \leq P_{s0} & : \text{曲げ損傷からせん断破壊移行型} \\ P_{s0} < P_u & : \text{せん断破壊型} \end{aligned}$$

・曲げ破壊荷重 P_u の算定

P_u は、示方書では終局水平耐力と定義しているが、実際には、柱基部のコアコンクリートが終局ひずみ ϵ_{cu} に達する時の耐力を求めており、曲げ破壊荷重と考えるとわかりやすい。従って、かぶりコンクリートが圧縮破壊し、その抵抗力が期待できない状態に達するときの水平荷重を、 P_u とするのがポイントである。

・せん断耐力 P_s , P_{s0} の算定

示方書では、 P_s は荷重の正負交番繰り返し作用の影響に関する補正係数 c_c (< 1) を考慮した時のせん断耐力、 P_{s0} はその補正係数 c_c を 1 とした時の耐力と定義している。この正負交番繰り返し作用とは、塑性域での繰り返し変形を想定している。従って、 P_{s0} は主鉄筋降伏前のせん断耐力、 P_s は曲げ降伏後のせん断耐力と考えればわかりやすい。鉄筋コンクリートの橋脚の塑性変形が大きくなり、終局限界付近での荷重の繰り返し回数が多くなった場合に、コンクリートのせん断耐力が低下することを、荷重の正負交番繰り返し作用の影響に関する補正係数 c_c で取り入れていること、また、これを繰り返し回数がタイプII地震動に比べより多いとするタイプI地震動に対し、タイプII地震動より小さな c_c を取り入れているのがポイントである。

(2) 地震時保有水平耐力の照査

次式によって、照査を行う。

$$k_{hc} \cdot W \leq P_a$$

・地震時保有水平耐力 P_a の算定

破壊形態に応じて、照査に用いる耐力＝地震時保有水平耐力 P_a を次式にて決定する。

$$\begin{aligned} P_a & = P_u & : \text{曲げ破壊型} \\ & P_u & : \text{曲げ損傷からせん断破壊移行型} \\ & P_{s0} & : \text{せん断破壊型} \end{aligned}$$

・設計水平震度 k_{hc} の算定

設計水平震度の標準値 k_{hc0} 、地域別補正係数 c_z 、許容塑性率 μ_a から、次式で決まる。

$$k_{hc} = \frac{c_z \cdot k_{hc0}}{\sqrt{2\mu_a - 1}}$$

$c_z \cdot k_{hc0}$ に等価重量 W を乗じた値，すなわち， $\mu_a = 1$ の時の水平震度 k_{hc0} は，地震荷重を受けても，構造物を塑性化させないために必要な耐力であり，言い換えれば，弾性設計する場合の必要耐力といえる．すなわち，塑性化を許容する ($\mu_a > 1$) ことで，断面や使用鉄筋慮を削減し，合理的な構造物の構築が可能となる．なお， μ_a は，次式によって定める．

$$\mu_a = \begin{cases} 1 & (\text{せん断破壊型，曲げ損傷からせん断破壊移行型}) \\ 1 + (\delta_u - \delta_y) / (\alpha \cdot \delta_y) & (\text{曲げ破壊型}) \end{cases}$$

すなわち，塑性化しないせん断破壊型，ならびに，塑性化後の変形性能が明らかでない曲げ損傷からせん断破壊移行型では，弾性設計を行うことが大きなポイントである．

さらに， δ_u の算定においては，帯鉄筋及び中間帯鉄筋の拘束効果による増大，および，繰返し荷重の増大による変形性能の低下が反映されることが，大きなポイントである．

(3) 残留変位の照査

・許容残留変位 δ_{Ra} の算定

兵庫県南部地震の復旧事例から，橋脚の回転角（＝傾斜角）が $1/60\text{rad}$ 程度以上生じた場合には，残留変形の修復など復旧が困難であったことから，速やかに復旧できる許容値として，橋脚の回転角で $1/100\text{rad}$ としている．したがって，橋脚天端の水平変位に置き換えると，橋脚基部から橋脚天端までの高さを h とすれば， $\delta_{Ra} = h/100$ と表すことができる．

・残留変位 δ_R の算定

エネルギー一定則から求められる最大応答変位をもとに算定するもので，次式による．

$$\delta_R = C_R (\mu_r - 1) (1 - r) \delta_y$$

$$\mu_r = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c_z k_{hc0} W}{P_a} \right)^2 + 1 \right\}$$

次に，設計水平震度 k_{hc} の算定，残留変位 δ_r の算定に利用されている「エネルギー一定則」の原理を，説明する．

2. 非線形構造物に対する設計方法－荷重低減係数法－

地震時保有水平耐力法が許容応力度法と決定的に異なるのは，非線形構造物（あるいは部材）を対象にしていることである．特に，鉄筋コンクリート橋脚のような構造物の場合，大きな地震荷重を受けると，柱の主鉄筋が降伏し，構造物に作用する力は頭打ちとなるが，それと同時に大きな変形が生じることになる．このような構造物の「静的」設計方法に用いる考え方に，「荷重低減係数法」がある．道路橋示方書では，この「荷重低減係数」を「エネルギー一定則」により算出している．すなわち，「エネルギー一定則」は，構造物に作用する地震荷重の大きさと，それによって構造物に生じる変形量との関係を表す，経験則である．

図-2 (a) は，鉄筋コンクリートと橋脚を 1 質点系の力学モデルに置き換えたもので，荷重低減係数法はこのような力学モデルに置き換えられる構造物を，原則として対象とする．エネルギー一定則とは，同図 (b) におい

て、地震荷重から決まる△OAB と、構造物の耐力あるいは変形性能から決まる□OCDE の面積が等しくなるように導かれたもので、式 (1a) によって表される。

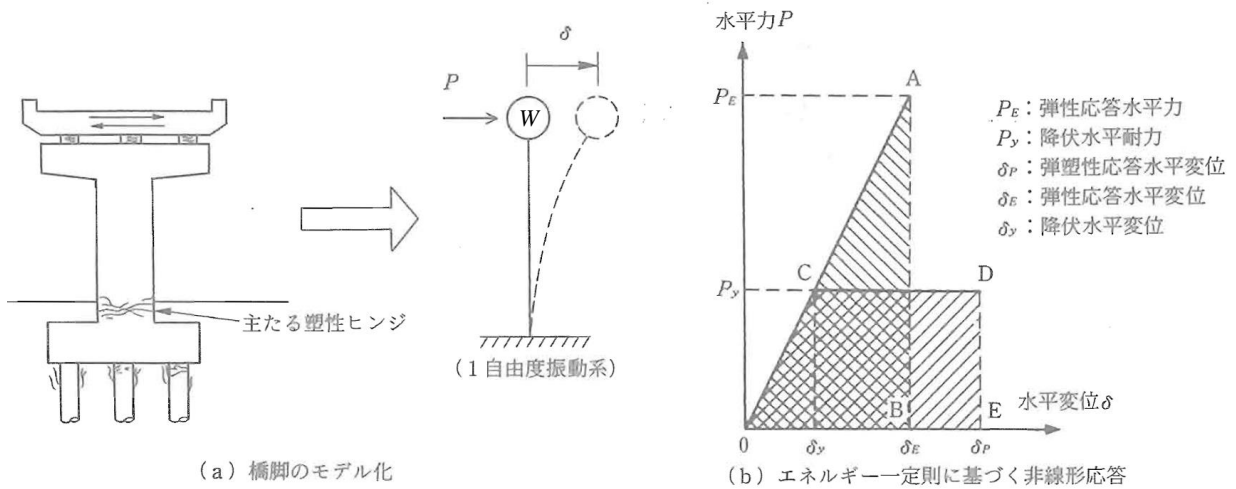


図-2 橋の1自由度系へのモデル化とエネルギー一定則に基づく非線形応答の推定法⁹⁾

$$\frac{P_E}{P_y} = \sqrt{2\mu - 1} \quad (1a)$$

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (1b)$$

$$\mu = \delta_p / \delta_y \quad (1c)$$

P_E を求めておけば、 P_y に応じた δ_p 、あるいは、 δ_p に応じた P_y の組み合わせを、決めることができる。また、 P_E / P_y を一般に荷重低減係数と呼び、示方書ではこの逆数を構造物特性補正係数 c_s として用いている (式 (1b))。 P_E は、前章にて説明したとおり、構造物を塑性化させないために必要な耐力 (= 弾性設計する場合に必要な耐力) であり、 $c_z \cdot k_{hc0} \cdot W$ として求めることができる。

さらに、図-2 および式 (1) から、エネルギー一定則の2通りの使い方を理解することができる。

① 塑性変形量 δ_p を確定量としたとき (たとえば許容変形量)

構造物に必要な耐力 P_y を求める使い方、この P_y よりも大きな耐力が確保されていればよい訳である。また、構造物の変形量 δ_p を小さく抑えたい場合、構造物には高い耐力が要求されることになる。 示方書ではこちらの使い方を利用して利用されている。

② 構造物の耐力 P_y を確定量としたとき

構造物に必要な変形性能 (= 構造物に生じる変形量) δ_p を求める使い方、この δ_p よりも大きな変形性能を確保すればよい訳である。また、構造物の耐力が低いほど、高い変形性能が要求されることになる。

3. 道路橋示方書で求められる耐震性能

道路橋示方書では、表-2 に示すとおり、2段階の地震強さに対し、橋の重要度に応じた耐震性能を要求している。これらの耐震性能は、表-3 に示す観点によって決められており、所要の耐震性能を満足するには、橋を構成する各部材を、表-4 に示される状態に収める必要がある。表-4 は、損傷が生じてもよい部材を「主たる塑性化を考慮する部材」と呼び、その部材と、許容し得る損傷の組合せの例を示したものである。

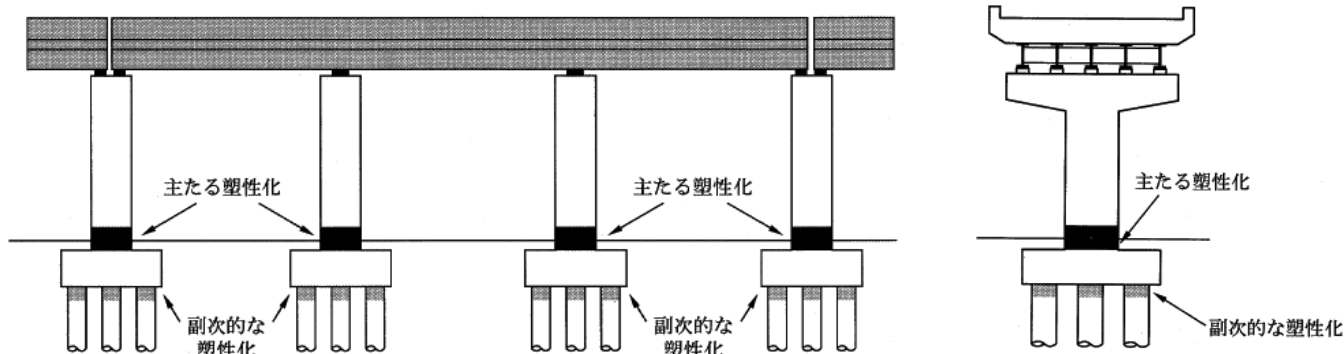
一般的な橋梁についてこれらを適用した場合、「主たる塑性化を考慮する部材」ならびのその部位は、図-3に示す箇所となる。このような橋梁形式の場合、橋脚基部で塑性化させることが、橋脚の変形性能を最も高めることができる。橋脚基部は、最も塑性化が生じやすい箇所であるとともに、地震後に迅速に損傷の確認が可能な箇所であり、さらに、復旧工事が容易な箇所であるといえる。言い換えれば、橋脚のみに損傷が集中するように、設計上の配慮が必要となる。そのためには、橋脚が破壊する前に、橋脚のその他の部位や基礎が破壊しないように各部位の耐力を決定すること、また、橋脚基部に変形を集中させる構造とするのであるから、橋脚基部には横拘束筋を適切に配置し、十分な変形性能を確保することが、重要なポイントとなってくる。

表-2 設計地震動と目標とする橋の耐震性能³⁾

設計地震動		A種の橋	B種の橋
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能 (耐震性能1)	
レベル2地震動	タイプIの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	地震による損傷が橋として致命的とならない性能 (耐震性能3)	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能 (耐震性能2)
	タイプIIの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)		

表-3 耐震性能の観点³⁾

橋の耐震性能	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1: 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	ひびわれ補修程度の軽微な修復でよい
耐震性能2: 地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久修復を行なうことができる
耐震性能3: 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—



(a) 単柱橋脚に塑性化を考慮する場合 (橋軸方向)

(c) 単柱橋脚に塑性化を考慮する場合 (橋軸直角方向)

図-3 塑性化あるいは非線形性を考慮する部材の組み合わせ例³⁾

表-4 一般的な橋に対する塑性化（非線形性）を考慮する部材の
組み合わせの例と各部材の限界状態³⁾

(a) 耐震性能 2

塑性化(非線形性) を考慮する 各 部材 の限界状態	橋脚	橋脚 と 上部構造	基礎	免震支承 と 橋脚
橋脚	損傷の修復を容易に行い得る限界の状態	損傷の修復を容易に行い得る限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態
橋台	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
支承部	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	免震支承によるエネルギー吸収が確保できる限界の状態
上部構造	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
基礎	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態
フーチング	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
適用する橋の例	免震橋以外の一般的な橋等	ラーメン橋	橋脚躯体が十分大きな終局水平耐力を有している場合や液状化の影響のあるようなやむを得ない場合	免震橋

(b) 耐震性能 3

塑性化(非線形性) を考慮する 各 部材 の限界状態	橋脚	橋脚 と 上部構造	基礎	免震支承 と 橋脚
橋脚	橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態	橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態
橋台	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
支承部	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	免震支承によるエネルギー吸収が確保できる限界の状態
上部構造	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
基礎	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	副次的な塑性化にとどまる限界の状態
フーチング	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態
適用する橋の例	免震橋以外の一般的な橋等	ラーメン橋	橋脚躯体が十分大きな終局水平耐力を有している場合や液状化の影響のあるようなやむを得ない場合	免震橋

近年、ゴム支承を用いた免震橋といわれる連続桁橋形式が主流となっている。一般に、橋梁用ゴム支承は、大きな塑性変形を受けてもそれが許容変形以内であれば、ほぼ初期性能に回復する装置である。そのため、これに主たる塑性化を期待することにより、橋脚に大きな損傷を生じさせずに済むだけでなく、地震後に橋梁としての

機能回復がより迅速に行える。ただし、金属支承を用いた連続桁橋形式に比べ、通常、初期コストは割高になる。

参考文献

- 1) 星隈順一：地震時保有水平耐力法による他鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計，特集 改訂・道路橋示方書Ⅴ耐震設計編，基礎工，1997.3
- 2) 田村敬一，本田利器：耐震設計で考慮する地震力と耐震設計の基本方針，特集 改訂・道路橋示方書Ⅴ耐震設計編，基礎工，1997.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計 平成14年3月，2002
- 4) 星隈順一，運上茂樹，川島一彦，長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法，構造工学論文集，Vol.44A，土木学会，1998.3
- 5) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏，池田博之：大型模型実験に基づく曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能，日本地震工学シンポジウム，Vol.10，1998
- 6) (社)土木学会 地震工学委員会地震時保有体力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会：E-ディフェンスを用いた大型橋梁耐震実験から何を学ぶ？，土木学会，2008.5
- 7) (独)防災科学技術研究所兵庫県耐震工学研究センター，ホームページ：<http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>
- 8) 井口道雄：建築振動学，序章，<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~migu/lecture.html>
- 9) 運上茂樹：地震時保有水平耐力法による耐震設計，特集 改訂・道路橋示方書Ⅴ耐震設計編，基礎工，1997.3