

性能照査型耐震設計法

島 弘*

1. はじめに

コンクリート構造物の耐震設計においても、設計基準が性能照査型に移行しつつある。土木学会は、兵庫県南部地震の約一年後にコンクリート標準示方書〔耐震設計編〕¹⁾を発刊した。この耐震設計編は、他に先んじて耐震性能の照査方法を規定したものとなっている。

現在、土木学会では、コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕の改訂作業が進んでいる。筆者は、〔耐震設計編〕の制定作業ならびに改訂作業に関係してきた。ここでは、これらの作業等で得た性能照査型耐震設計法に関する知見を述べさせていただく。

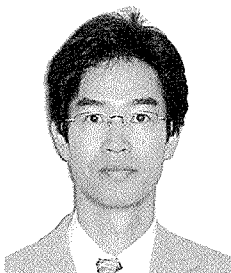
2. 照査の方法

「設計」と「照査」、とくに「設計」の定義は必ずしも明確ではない。構造性能照査は、土木学会コンクリート標準示方書では、設計作業の一部とされている²⁾。設定した構造が所定の性能を有するかどうかを計算するのが照査である。

性能照査型設計法は、構造物に与えられる要求性能を設定し、設定した構造がその要求性能を満足することを確認するのが理念である。しかし、多くの場合、要求性能は概念的なものであり、要求性能を直接に照査することの技術はまだ無いのが現状である。たとえば、土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕では、以下のようにされている。

一般の場合、構造物の耐震性能は以下の3つとしてよい。

- (i) 耐震性能 1：地震時にも機能は健全で、補修をしないで使用が可能
- (ii) 耐震性能 2：地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない
- (iii) 耐震性能 3：地震によって構造物全体が崩壊しない



* Hiroshi SHIMA

高知工科大学 工学部
社会システム工学科 教授

しかし、これらを直接に数値的に照査することは現状では不可能である。照査するためには、図 - 1 に示すように、これらの性能を保証できる限界状態を規定し、限界状態の検討を行うことで性能照査に代えるのである。限界状態の検討では、さらに限界状態に対して状態を表す指標を選定し、要求性能に応じた限界値を与える。すなわち、次のように、地震作用により生じる応答値を算定し、これが限界値を超えないことで照査の判定を行う。

$$S/R \leq 1.0$$

ここで、 S は応答値、 R は限界値である。

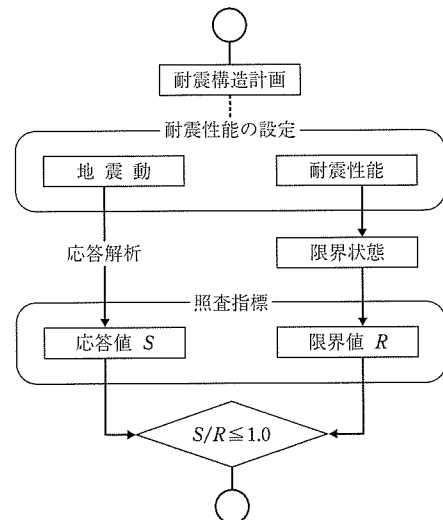


図 - 1 耐震性能照査の流れ

3. 耐震構造計画

構造物の耐震設計においては、構造設計を行う前に、構造物が全体系として所要の耐震性能を保有しやすいように、適切な構造計画を行う必要がある。たとえば、

- 1) 隣接する構造物との連成作用の影響を考慮する
- 2) 免震や制震技術についても検討する
- 3) 構造物自体の耐震性で対処し難い場合には、システムとしての代替性などソフト面からの対策も合わせて考慮する

などがある。

4. 耐震性能の設定

構造物の耐用期間中に構造物に作用すると想定される地震力は、小さいものから大きいものまで多様である。したがって、構造物の耐震設計は、想定した地震動に対して所要の耐震性能を有することを目的として行う。たとえば、

「作用する確率が高い中規模地震に対しては健全であり、作用する確率が低い大規模地震に対しては崩壊しない」というようなものである。大規模地震に対して崩壊しないようにさへ設計すれば、中規模地震に対して健全であるという性能を満たす可能性はある。しかし、これは普遍的ではなく、一般には、いくつかの大きさの地震動に対して性能を設定しなければならないのである。

設計で想定する地震動については、地震の発生頻度や構造物に想定される損傷程度と対応させて多段階に設定することも考えられるが、地震動の予測精度や構造物の損傷の算定精度が必ずしも十分といえないのが現状である。土木学会では、兵庫県南部地震後の「土木構造物の耐震基準等に関する提言」³⁾で、耐震性能の照査で考慮する地震動として、構造物の供用期間中に1~2度発生する確率を有する地震動（レベル1地震動）および陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）の二段階を考えることを提案している。

地震動の大きさとその再現期間に対応して、構造物の保有すべき耐震性能を設定する必要がある。想定地震動と耐震性能の関係として、土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕では、以下のようにされている。

- 一般に、以下の検討を行えばよい。
- (i) レベル1地震動に対して耐震性能1を満足する
 - (ii) レベル2地震動に対して耐震性能2または耐震性能3を満足する

地震動レベルの段階数については、特殊な構造物ではこの限りでない。たとえばLNG地下タンクの場合には、レベル2地震動をさらに2段階に分け、それらの地震動に対して、それぞれ耐震性能1、耐震性能2、耐震性能3を満足させるようにする方法も考えられている⁴⁾。

5. 限界状態と限界値の設定

構造物の耐震性能を照査する場合、設定された耐震性能に対して、それを満たさなくなる限界状態を定めておく必要がある。耐震性能は、一般に構造物の性能として設定される。それに対応する限界状態も、本来は構造物に対して設定されるべきである。しかし、構造物としての損傷と構成部材や材料の損傷状態との関係が不明確である場合が多く、一方、部材の限界状態については、照査技術が進んでいる。したがって、現状では、構造物を構成する部材や要素に対して限界状態が設定されるのが一般的である。各部材に対して限界状態を設定しておけば、安全側でもある。表-1に土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕と比較した耐震性能と限界状態との関係の例を示す⁵⁾。

以下に、土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕で規定する耐震性能を例に取り、それに対応する限界状態と限界値の考え方を述べる。

耐震性能1

「地震時に機能を保持する」という性能について、たとえば、走行車両の安全性を検査する必要がある場合には、地震時の応答変位に対して限界値を設定することが考えられる。

「地震後に補修せずの使用が可能である」という性能に

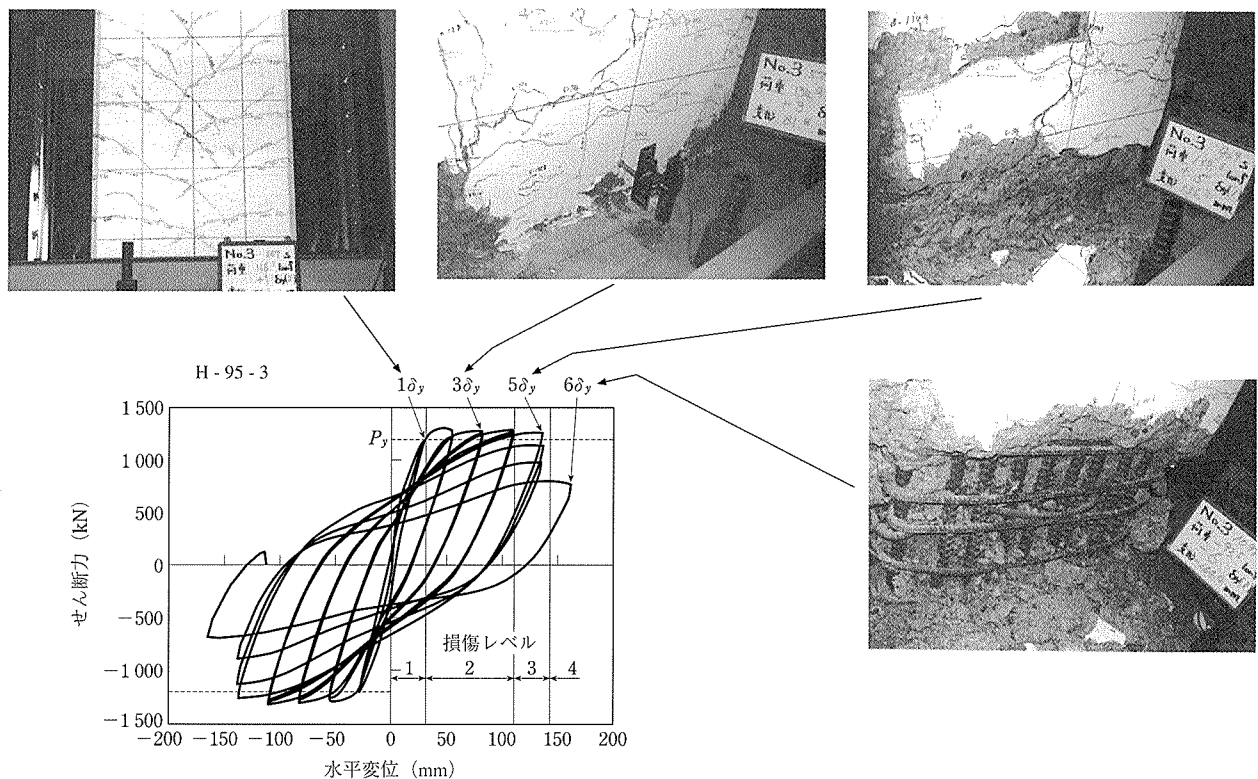


図-2 荷重変位履歴曲線と損傷状況の例⁹⁾

表 - 1 耐震性能と限界状態の例⁵⁾

耐震性能		耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3			
		レベル 1 地震動	レベル 2 地震動				
示方書解説	限界状態	地震後の残留変形十分に小さい	耐力低下せず、残留変形が限度以下	地震によって構造物全体系が崩壊しない。			
	照査項目	鉄筋降伏以下、圧縮破壊に対して十分安全	せん断破壊回避、応答塑性率が靱性率以下				
Priestley の定義*		Serviceability Limit State	Damage-Control Limit	Survival Limit State			
建築分野 総プロ中間		使用性 (Serviceability Limit) 使い易さ、住み易さ	修復性 (Assigned Damage) 損傷の制御	安全性 (Ultimate Limit) 人命の危険の回避			
道路橋	耐震性能	健全性を損なわない (高確率で発生する地震)	限定された損傷に止める (大地震+重要度: とくに高い)	致命的な被害を防止する (大地震+重要度: 標準的)			
	照査項目	許容応力度以下 震度法-弾性理論で算出	耐力照査+残留変位 (1/100) 応答塑性率より算出	耐力照査 許容塑性率-等価震度で算出			
水道タンク	耐震性能	液密性を維持+補修不要 (高確率で発生する地震)	液密性を維持 (大地震: プレート境界型)	崩壊防止+液密性維持不要 (大地震: 内陸直下型)			
	照査項目	ひび割れ幅+コンクリート応力	残留ひび割れ幅+ひずみ	急激な破壊防止 2次被害を起こす漏洩防止			
鉄道用橋梁	走行性	耐震性能	通常走行可能、損傷無し (列車走行安全性)	不明 (脱線する可能性の大小で分類可能)			
		照査項目	走行性に対する変位の制限値 支承部+躯体は降伏以下				
	復旧性	耐震性能	損傷無し (支承, 躯体, 基礎, 安定)	支承	躯体	基礎	安定
		照査項目	降伏耐力以下	落下防止工	応答塑性率以下	降伏耐力以下	許容塑性率以下
L N G 地下タンク	耐荷性能 (躯体)	ひび割れを許容 鉄筋降伏以下	全体変形として、崩壊に対して安全率を確保		構造系として崩壊しない		
	止水性能 (躯体)		ひび割れが貫通しない		保持の必要なし		
	気密性能 (メンブレン屋根)		メンブレンの破断回避 屋根と躯体の相対変位規定		保持の必要なし		
	液密性能 (メンブレン配管)		メンブレン・配管の破断回避 配管と躯体の相対変位規定		保持の必要なし		
	剛体安定 (躯体)	照査不要	地盤が液状化しない		躯体が転倒しない		
	手法毎の照査項目	応答変位法:現状	鉄筋降伏以下	曲げ破壊, せん断破壊に対して十分な安全率, 全断面引張		曲げ破壊, せん断破壊に対して適切な安全率	
3次元動的応答		未使用	面部材の応答塑性率 せん断破壊		面部材の応答塑性率 せん断破壊		
理想非線形		未使用	せん断破壊に対して十分安全		計算が途中で発散しない		

注) M.J.N. Priestley, F.Seible, G.M. Calvi : SEISMIC DESIGN AND RETROFIT OF BRIDGES, John Wiley & Sons, INC.

表 - 2 R C 部材の損傷レベルと補修工法のイメージ⁹⁾

損傷レベル	損傷状況	補修工法のイメージ
1 (0~B)	無損傷	無補修 (必要により耐久性上の配慮)
2 (B~C)	場合によっては補修が必要な損傷	必要によりひび割れ注入・断面修復
3 (C~D)	補修が必要な損傷	ひび割れ注入・断面修復, 必要により帯鉄筋の修正
4 (D~)	補修が必要で, 場合によっては部材の取り替えが必要な損傷	・ひび割れ注入・断面修復・帯鉄筋等の修正 ・軸方向鉄筋の座屈が著しい場合は部材の取替え

注) () 内は, 図 - 3 に示す記号と対応している。

については, せん断破壊しないことを前提として, 鉄筋が降伏せず, コンクリートが圧縮破壊しなければ, この性能を満足すると考えられる。土木学会コンクリート標準示方書 [耐震設計編] では, 部材の降伏を限界状態とし, 鉄筋およ

びコンクリートの設計強度を限界値としている。ただし, 水道タンクのように, 過度の漏水が限界状態となるような場合には, 残留ひび割れ幅に対して限界値を設定する必要がある。

耐震性能 2

「地震後に機能が短時間で回復でき, 補強を必要としない」という性能について, 部材がせん断破壊やねじり破壊をするときには, これを満足しない。

部材がせん断破壊やねじり破壊をしないときには, 「地震後に機能が短時間で回復でき, 補強を必要としない」という性能に対する損傷の程度を如何に表すかが問題となる。

損傷の程度を直接に表すものとして, 構造物を構成する材料であるコンクリートあるいは鉄筋の損傷がある。上の耐震性能 1 で「地震後に補修せずに使用が可能である」という性能を保証する最大損傷を鉄筋の降伏あるいはコンクリートの圧縮破壊とするというのは, この考えに基づいて

いる。「地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない」という損傷程度の指標として、構成材料の最大応答ひずみが考えられる。しかし、ひずみは局所に集中しやすく、現実の損傷と対応させるためには、ある範囲をもった平均的なひずみを用いる必要がある⁹⁾。

一方、部材の損傷程度と荷重変位曲線との間には密接な関係がある。たとえば、曲げ破壊型の柱部材では、かぶりコンクリートの剥落をともなう軸方向鉄筋の座屈が耐力低下の原因となることが明らかにされている^{7,8)}。図-2は柱部材の損傷程度と荷重変位曲線との関係を示したものであり、図-3は荷重変位曲線の変化点での現象を示している⁹⁾。さらに、表-2は、補修工法のイメージと部材の損傷程度との関係の一例である⁹⁾。これらのことから、部材がせん断破壊あるいはねじり破壊しないときの「地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない」という性能の有無は、部材の最大応答変位をみることによって確認できる。土木学会コンクリート標準示方書【耐震設計編】では、この性能に対する限界値として、部材のせん断耐力あるいは部材の終局変位としている。

建造物の残留変位が著しく大きくなると、再使用するうえで支障がある場合もある。その場合には、地震後の残留変位に対して限界値を設定する必要がある。

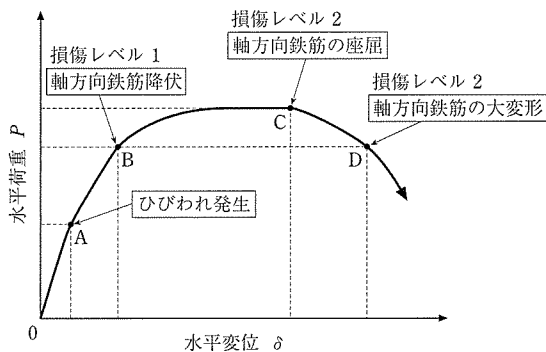


図-3 柱部材の損傷程度と荷重変位関係⁹⁾

耐震性能 3

「地震によって建造物全体系が崩壊しない」という性能を照査する技術は発展途上にある。コンクリート建造物の場合、一般に、建造物の質量および負荷質量、土圧、水圧などに抵抗する部材がせん断破壊しなければ、この性能を満足すると考えられる。一方、部材がせん断破壊をしなく

ても、構造全体系の変位が過大となり、自重による付加モーメントが増大して自己崩壊に至ることやメカニズムの状態に至るおそれがある場合には、それを限界状態とする必要がある。

6. 応答値の算定

6.1 構造系のモデル化と地震入力位置

要求性能に応じて設定した限界値に対応して、想定する地震作用による応答値を算定する。

建造物に作用する地震力は、建造物地点の表層地盤の影響を大きく受ける。また、建造物の地震時応答には、建造物あるいは基礎と周辺地盤との相互作用の影響もある。建造物と地盤の種類のコラボレーションは無限にあり、これらの影響を適切に評価するためには、基礎や表層地盤を含めた構造系全体を解析する必要がある。そのためには、地震力を表層地盤の下から入力することが必要となる。入力位置は、一般には、地震応答に影響が少ないと判断される硬さの地層の上面である工学的基盤面とされる。

構造系全体を解析するには、建造物と地盤の相互作用が直接に解析できる建造物と地盤を一体とした連成解析がよ

表-3 建造物と地盤の連成解析による解析方法

建造物の種類	地上建造物, 地中建造物
解析方法	時刻歴応答解析
建造物の解析モデル	有限要素モデルあるいは線材モデル
地盤の解析モデル	有限要素モデル
入力値	時刻歴加速度波形
入力位置	基盤面

い。標準的な考え方を表-3に示す。しかし、建造物の種類や特性によっては、建造物と地盤の相互作用が無視あるいは適切にモデル化できる場合がある。この場合には、建造物と地盤を個別に解析する方法を用いることができる。この方法の詳細を表-4に示す。

6.2 解析方法

応答値を求めるための解析方法には種々のものがある。静的解析、応答スペクトル法などの準動的解析、時刻歴応答解析などである。これらの解析方法には一長一短があり、解析精度がよくなるに連れて計算方法が煩雑になるといわれている。近年、コンピュータを用いた数値解析技術は著しく進歩し、解析結果の信頼度も高くなっている。地盤も

表-4 建造物と地盤を個別に解析する方法

建造物の種類		地上建造物	地中建造物
建造物の解析	解析方法	時刻歴応答解析	応答変位法(静的な解析)
	建造物の解析モデル	有限要素モデルあるいは線材モデル	
	相互作用のモデル	ばねモデル	
	入力値	地盤の解析で算出した時刻歴加速度波形	地盤の解析で算出した地盤の変位
	入力位置	建造物の下面	建造物の側面
地盤の応答解析	解析方法	時刻歴応答解析	
	地盤の解析モデル	層で区分した1次元離散化モデルあるいは有限要素モデル	
	入力値	時刻歴加速度波形	
	入力位置	基盤面	

含めた構造系全体を解析するためには、時刻歴応答解析が最も合理的である。

一般の地中構造物は、周辺地盤の変形に追従させられるような挙動をし、構造物の質量による慣性力の影響は小さい。すなわち、地盤と構造物の振動モードが一致している場合には、先に地震時の地盤の変形を求め、これを強制変位として構造物に静的に作用させる方法を用いることができる。これを応答変位法という。

6.3 地震動の表現方法

解析方法によって、地震動の表現方法は異なる。静的解析では震度であり、準動的解析では弾性応答スペクトルあるいは非線形応答スペクトルである。

時刻歴応答解析を行うためには、地震動を時刻歴の波形として表現する必要がある。地震動の波形は、変位、速度あるいは加速度で表すことができる。一般には、振動方程式を解くために便利である加速度波形が用いられる。図-4に加速度波形の例を示す。

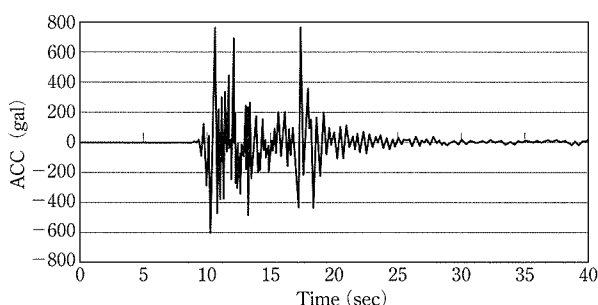


図-4 時刻歴加速度波形の例

6.4 構造物のモデル化

解析を行うためには、構造物をモデル化しなければならない。構造物は部材あるいは要素が三次元に接合されているので、厳密には三次元のモデルとするのがよい。しかし、地震動の入力を構造物の軸方向あるいは軸直角方向とし、構造物の応答が二次元で表せる場合には、構造物を二次元でモデル化して解析を行うことができる。

構造物をモデル化する方法としては、有限要素モデルや線材モデルなどがある。線材モデルは、図-5に例を示すように、構造物を線材と質点の組合せでモデル化するものである。適用範囲が限られるとともに、モデル化の良否が解析精度に影響を及ぼす。有限要素モデルは、図-6に例を示すように、構造物を要素の集合体として表すものである。面的な広がりをもつ構造物など、構造物や部材の形状にも自由に対応できる。

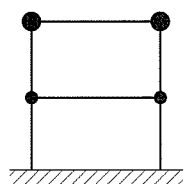


図-5 線材モデルの例

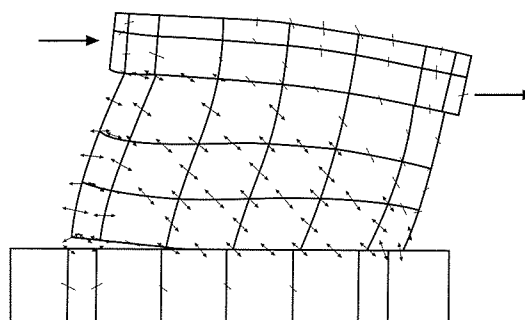


図-6 有限要素モデルと解析結果の例

いずれの構造モデルにおいても、その力学特性が再現されるように材料特性をモデル化しなければならない。有限要素モデルでは、構成材料の応力—ひずみ関係が用いられ、線材モデルでは、棒部材の材端モーメント—回転角関係などが用いられる。材料モデルは、非線形領域を包含し、交番繰返し荷重に対応できるものでなければならない。

6.5 地盤のモデル化

地盤は三次元的な広がりをもつものであり、厳密に解くためには有限要素モデルが適している。構造物と地盤を個別に解析する場合で、構造物周辺の地盤構造が水平成層構造のときには、一次元のモデルによって地盤の応答解析を簡略化することも可能である。

6.6 構造物と地盤の相互作用のモデル化

相互作用の影響は、構造物と地盤との間にばねを設定することでモデル化できる。地上構造物の場合には、基礎をどう取り扱うかが問題となる。たとえば、杭基礎の場合には、地盤中の杭基礎の頂部に水平力、鉛直力、回転モーメントを作用させたときの水平力—水平変位関係、鉛直力—鉛直変位関係、モーメント—回転角関係を算定し、それらを地上構造物の支持ばねとすることなどがなされている。

7. おわりに

前にも記したように、本稿は、土木学会コンクリート委員会耐震設計編改訂部会で議論されていることを著者が個人的に解釈したことを述べたものである。部会主査の丸山久一先生をはじめとして部会委員には、ご理解いただけるようお願いする次第である。改訂版は平成14年12月に発刊される予定となっている。解析モデル等の詳細はそちらをご覧ください。

参考文献

- 1) 平成8年制定コンクリート標準示方書 [耐震設計編], 土木学会, 1996.7
- 2) 2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.11, 土木学会, 2002.3
- 3) 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 土木学会誌, Vol.81, No.2, 土木学会, 1996.2
- 4) LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針, コンクリートライブラリー No.18, pp.13, 土木学会, 1999.12
- 5) 土木学会コンクリート委員会耐震研究小委員会, コンクリート構造物の耐震技術—現状と将来展望—, コンクリート技術シリーズ

- No.20, pp.35, 土木学会, 1997.7
- 6) 土屋智史, 前川宏一: 多方向入力を受ける RC 棒部材断面の損傷指標, 土木学会論文集, No.718 / V-57, 2002.11
- 7) 島 弘, 伊藤圭一, 北西隆司, 水口裕之: RC 橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす帯鉄筋配置の影響, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, pp.33-40, 日本コンクリート工学協会, 1990.5
- 8) 島 弘, 伊藤圭一, 水口裕之: 曲げ破壊型 RC 橋脚における鉄筋座屈モデルによる靱性解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.741-746, 日本コンクリート工学協会, 1990
- 9) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定方法, 土木学会論文集, No.683 / V-52, pp.31-45, 2001.8

【2002年9月13日受付】



刊行物案内

PC 橋架設工法 2002年版

頒布価格：会員特価 4 000 円（送料 400 円）

：非会員特価 4 800 円（送料 400 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会