

◆ 特 集 ◆

最近の PC 建造物の  
耐 震 技 術

# 土木構造物における耐震技術の変遷と将来展望

丸山 久一\*

## 1. はじめに

幕末にセメントが初めて輸入され、明治初年にセメント工場が国内で造られてから 130 年以上が経つ。鉄筋コンクリート造の建物が耐震性能に優れていることは、1923 年（大正 12 年）に発生した関東大地震（関東大震災）で証明された。プレストレストコンクリートも 1930 年代後半から国内でも研究が始められ、実際に構造物が造られてから 50 年以上が経過している。

地震の多いわが国では、構造物の建造にあたっては、まず耐震性を考慮する。コンクリート構造物において、地震の影響を具体的に水平荷重として与えたのは、建築構造物の設計が最初である。1924 年（大正 13 年）の市街地建築物法施行規則第 101 条に、水平震度 0.1 としている。しかし、地震の活動度に関する知見が十分でなく、コンクリート構造物の挙動についてもよく分かっていない段階では、大きな地震が起きるたびに苦渋を味わっている。その都度、耐震技術を見直し、研究を進め、設計法を改良してきて現在に至っている。

構造物の設計は、一般には、静的な力を想定し、それに対して所要の安全性を付与するように行われる。その際、必要とされる事項は、大きく 4 項目に分けられる。すなわち、①外力の大きさ、②構造物・部材の解析手法、③安全性の評価手法、および④経験の集大成としての構造細目である。図 - 1 に、それらの関係を示す。橋梁構造物を例にとれば、①は自重等の固定荷重と車両等の変動荷重、②は部材を線材に置き換えて線形解析を行い、断面力等を求める手法、③は許容応力度の設定や断面破壊の安全度を検討すること、そして④は構造物および部材の設定方法となる。耐震設計においても、必要な項目はまったく同様で、外力として地震の大きさおよび構造物への作用の仕方をどう定めるかが違うだけである。ただ、地震の影響として構造物に作用する力は、地震の大きさのみならず、構造物自体の特性（固有周期等）にも関係することから、照査の流れは

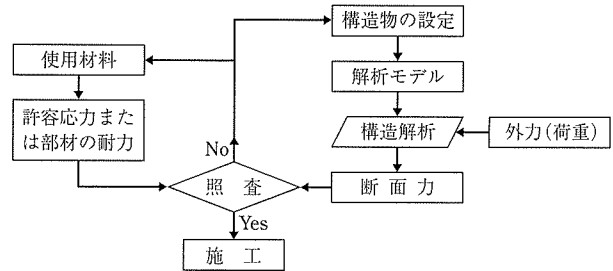


図 - 1 構造設計の基本的流れ

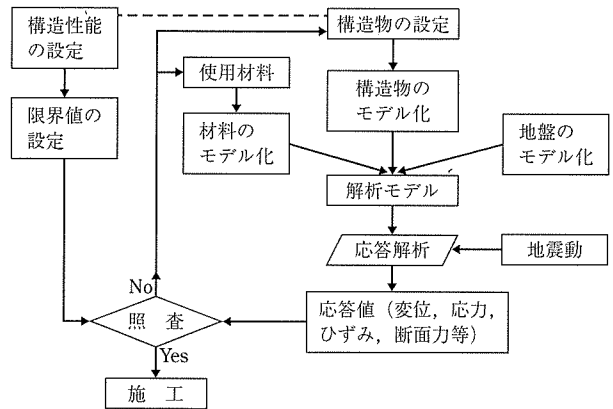


図 - 2 耐震性能照査の流れ

多少異なる。図 - 2 に、最新の耐震性能照査法に基づいて、これらの関係を示す。

したがって、耐震設計技術の変遷とは、①地震荷重の扱い方、②解析技術、③安全性の評価手法、および④構造細目、の変遷といえる。ただ、この 4 者は独立ではない。耐震設計法としてまとめる際には、おのおのの知見や技術が十分でないことを承知した上で、過去の経験や、その時点での社会・経済的な状況を考慮し、各項目相互のバランスがよくなるように配慮される。既往の地震観測や被害状況に応じて設計地震動の大きさが変わり、解析技術の進歩に伴って、地震荷重の扱い方や安全性の評価手法が異なってくる。

## 2. 地震荷重

地震による構造物への影響は、静的な外力として扱うことから始まった。墓石の倒壊状況あるいは構造物の破壊状況等の観察から、構造物に水平力や鉛直力を負荷した結果と類似であると判断したためと思われる。建築物では、上記に述べたように、関東大震災後の 1924 年に水平震度として 0.1 を定めたのが最初である。



\* Kyuichi MARUYAMA  
長岡技術科学大学 教授

土木構造物では、道路橋の設計において、1926年（大正15年）の「道路構造に関する細則案」で初めて設計水平震度が規定された<sup>2)</sup>。その際、沖積層と洪積層について、おのおの0.2~0.3、および0.10~0.15と定めた。地震の影響を考慮することについては、鉄道橋の設計の方が早いようで、1919年（大正8年）に出された通達では、地震の許容加速度を示している<sup>2)</sup>。ただし、具体的記述がなされたのは、1930年（昭和5年）の「橋梁標準設計」においてで、水平震度として0.2と定めている。

土木学会においては、1931年（昭和6年）に初めて制定された土木学会コンクリート標準示方書で水平震度として0.2、鉛直震度として0.1と定めた。図-3に、水平震度の変遷を示す<sup>2)</sup>。設計方法は許容応力度設計法で、耐震設計には震度法を採用していた。1986年（昭和61年）に限界状態設計法を導入するまで、その設計法および震度はそのままであった。

道路や鉄道構造物の耐震設計においては、当初から、地震の記録等に基づいて、震度の設定を地域や地盤状態に応じて異なる値を定めていた。図-3の震度は、それらの最大値と最小値を示す。

構造物の応答特性の影響を震度に取り入れたのは、1971年（昭和46年）の道路橋示方書が最初である<sup>3)</sup>。鉄道構造物の設計標準では1979年（昭和54年）から<sup>4)</sup>、また、土木学会コンクリート標準示方書では1986年の限界状態設計法から<sup>5)</sup>、地域における地震の発生状況（地域係数）、地盤の影響（地盤係数）とともに、構造物の特性を考慮した係数の積として、設計水平震度が与えられた。図-4に、構造物の特性として固有周期が水平震度に及ぼす影響の一例を示す。

地震による影響を受けても、コンクリート構造物に被害が生じなければ、一般には、震度や許容応力度の変更はな

い。場合によっては、種々の検討の後に、震度を小さくするとか、許容応力度をより高めに設定し直すこともあった。しかし、一旦、大きな被害を受けると、再度検討し直して、震度を大きくし、また、許容応力度を低下させている。

地震時の加速度記録が精度よく測定されるようになり、構造物の大変形時の挙動も徐々に解明され、安全性の照査に部材の保有耐力が用いられるようになると、設計水平震度も新たに設定し直される。道路構造物では1990年（平成2年）から<sup>6)</sup>、また鉄道構造物では1992年（平成4年）から<sup>7)</sup>、基準の弾性応答水平震度を1.0とし、それに地域係数、地盤係数、構造物の応答に関する係数を乗じて、設計水平震度を求めることとした。さらに、道路構造物では、1995年の兵庫県南部地震以降、内陸直下型地震に対して、弾性応答水平震度に相当する加速度応答スペクトルの値を2.0にまで引き上げた<sup>8)</sup>。このような大きな震度に構造物が耐えられることを評価する手法として、後述する“エネルギー一定則”という概念が導入された。

構造物の応答特性が考慮されるようになった背景には、動的応答解析技術の開発、発展がある。グランベールの原理に基づく振動方程式は確立していたが、それに基づいて実構造物の振動特性を解析するためには、電子計算機の開発、発展を待たねばならなかった。欧米では1950年代から、わが国では1960年代から数値解析技術が急速に進展した。それらの技術の発展は、地震国であるわが国において、1960年代後半から始まった高層ビルの建設に大きく貢献した<sup>9)~11)</sup>。

ただ、線形弾性振動の範囲にとどまる動的応答解析技術では、地盤振動を入力としてコンクリート構造物の応答を直接調べるには不十分で、コンクリートの非線形履歴特性の解明やそれに基づいた非線形応答解析技術が進歩するまでは、動的応答解析は、あくまで補助的な手段でしかなかった。

地震荷重として地盤振動をそのまま使用する設計法の採用は、1996年（平成8年）に刊行された土木学会コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕が最初である<sup>12)</sup>。1995年（平成7年）に発生した兵庫県南部地震（阪神大震災）は、コンクリート構造物の耐震設計あるいは耐震性能の照査において、新たな一歩を踏み出す契機となった。2002年（平成14年）に出版予定の〔耐震性能照査編〕では、耐震性能を照査する地震動として、図-5に示されるような時刻歴

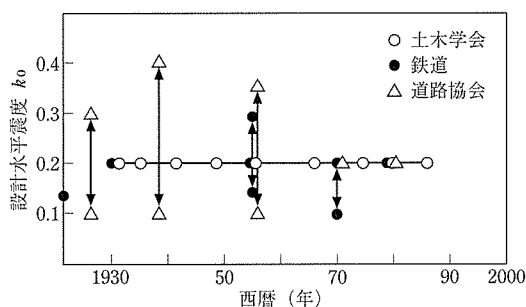


図-3 設計水平震度の変遷（許容応力度）<sup>2)</sup>

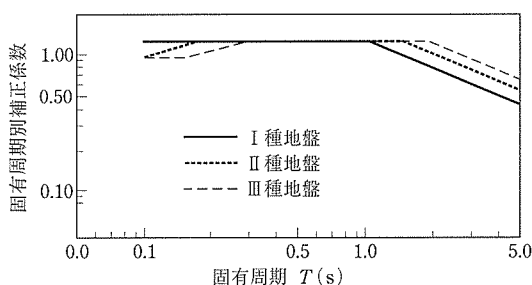


図-4 構造物の固有周期を考慮した補正係数<sup>6)</sup>

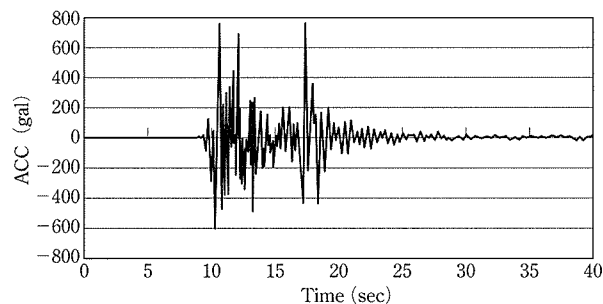


図-5 人工模擬地震波形の例

の地盤振動（加速度波形）が採用される予定である。

### 3. 解析技術

耐震設計に用いる解析技術は、耐震設計法と密接に関わっている。地震の影響を静的な水平力に置き換える震度法では、静的な構造解析手法で十分である。さらに、安全性の評価を許容応力度で行っている場合には、線形弾性解析で十分となる。土木学会のコンクリート標準示方書では、1986年に限界状態設計法を導入するまで、基本的には線形弾性解析で行ってきた。また、限界状態設計法を導入したといっても、コンクリート構造物および部材の評価に材料非線形特性を考慮するようになっただけで、動的応答解析の必要はなかった。

構造物の動的応答解析に関する実用的な研究は、前述のように、欧米では1950年代から、わが国では1960年代からである。多自由度系の応答解析では、線形弾性振動であっても、微分方程式を連立させて解くことなので、理論解の開発は別として、実用に供するためには、大量の計算を処理できる電子計算機（コンピュータ）の出現を待つ必要があった。コンピュータの記憶容量が大きくなり、演算速度が超高速になると、弾塑性解析、非線形解析も可能となり、それらの解析結果等に基づいて、設計水平震度にも構造物の応答特性を反映させることができるようになった。

動的応答解析を直接照査に用いるためには、微分方程式を与えられた境界条件の下で精度よく短時間で解くという

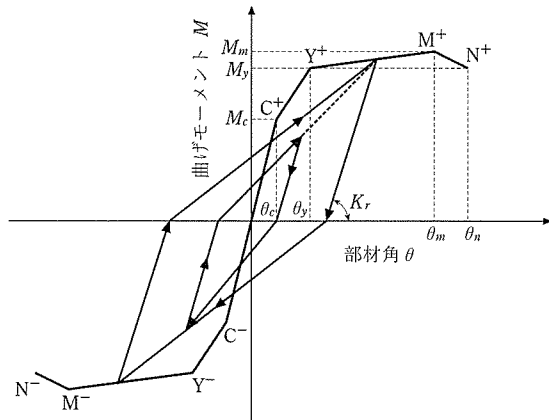


図 - 6 棒部材の履歴モデル

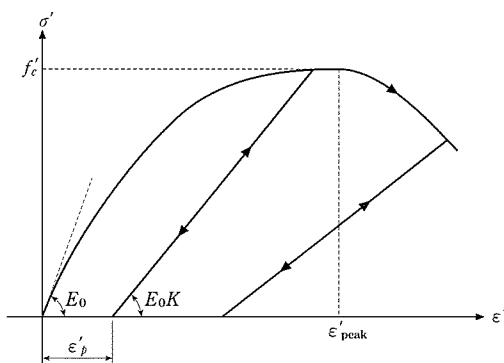


図 - 7 コンクリートの履歴モデル

数値解析技術のほかに、構造物を構成する部材、材料の非線形履歴挙動、地盤中および地盤から構造物への振動の伝達状況等に関するより精確な知見が必要である。

1970年代後半からは部材の非線形履歴挙動に関する研究が、また、1980年代に入って、材料の非線形履歴挙動に関する研究が進められ、数値計算用のモデルが種々提案された（たとえば、図 - 6, 7）。ただ、非線形解析は収束計算に多大な記憶容量と計算時間を必要とするため、特殊な構造物（原子力発電施設やLNGタンク等）以外では、耐震設計にほとんど用いられていなかった。しかし、兵庫県南部地震後に、関係各機関や学協会等でコンクリート構造物の被災状況に関する精力的な調査研究が行われ、非線形解析の有効性が確認されるとともに、その一般化に関する活動も始まった。これらを受けて、土木学会では、非線形解析をコンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕の原則とすることとした。

### 4. 安全性の評価

コンクリート構造物の耐震設計法は、前述のように、地震荷重として構造物に水平力を静的に作用させる手法として、1920年代に導入された。その際、構造解析として線形弾性解析を、また、安全性の評価として材料の許容応力度を用いた。すなわち、一般の鉛直荷重に加えて、自重のある割合（震度）を水平力として作用させ、構造物・部材を弾性域の許容応力度内に収める設計思想である。

この手法は、設計の上で簡便であり、ある程度合理性もあることから、耐震設計手法として国内外において長期間採用されている。その間、地震被害の教訓を得ながら、震度および許容応力度、とくに、コンクリートの許容せん断

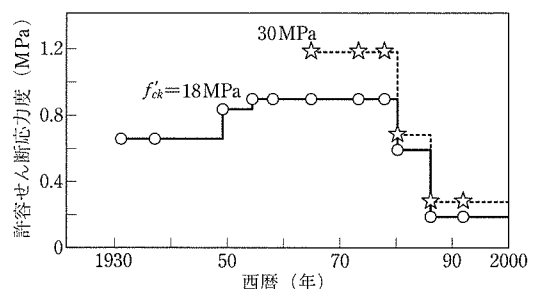


図 - 8 コンクリート標準示方書における許容せん断応力度の変遷<sup>2)</sup>

度を変更している。図 - 8 に土木学会コンクリート標準示方書におけるコンクリートの許容せん断応力度の変遷を示す<sup>2)</sup>。なお、この図では、耐震設計ということで、通常の許容せん断応力度を1.5倍に割り増してある。

前述のように、地震時にコンクリート構造物が大きな被害を受けると、その検討を基にして、許容応力度が低減される。土木学会コンクリート標準示方書では、1980年（昭和55年）にコンクリートの許容せん断応力をそれまでの6割程度にした<sup>13)</sup>。

土木学会コンクリート標準示方書では、1996年から耐震

設計の原則を震度法から動的応答解析による照査に移行させたが、道路構造物や鉄道構造物の設計では、震度法を採用し続けている。ただし、安全性の照査項目は、道路構造物では1990年から、また、鉄道構造物では1992年から、材料の許容応力度ではなく部材の保有耐力に変わっている。これは、地震荷重の項でも述べたが、実際に観測される応答加速度が1.0gを超えていること、鉄筋コンクリート部材は部材の降伏後でも相当に変形能力を有していること等が明らかになり、それを適切に評価する必要が出てきたことによるものである。設計の思想としては、図-9に示すよ

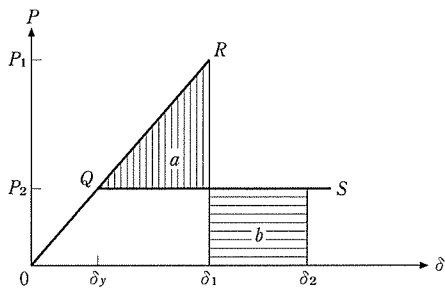


図-9 設計震度と部材の抵抗能力との関係

うに、 $P_1$ という大きな設計震度に対して、部材の降伏耐力が $P_2$ と小さくても、終局変位 $\delta_u$ が $\delta_2$ より大きければ、耐震性能を有するというもので、 $\delta_2$ は、面積 $a$ と面積 $b$ が等しいという条件で求められる。これは、ニューマークによって提案されたもので<sup>14)</sup>、俗に、“エネルギー一定則”とよばれている。

土木学会コンクリート標準示方書では、1996年から耐震性能の照査は時刻歴応答解析によるとした。その理由として、コンクリート構造物の非線形応答解析がかなりの精度で実施できるレベルに達しており、耐震性能として地震後の状態（たとえば、残留変位等）をある程度評価できること、“エネルギー一定則”では応答変位の最大値の目安しか得られず、その確度に疑問があること、また、“エネルギー一定則”では復元能力の高いPC構造物の耐震性能が適切に評価できないこと等が挙げられる。

### 5. 構造細目

コンクリート構造物の耐震性能は、主として水平力に抵抗することであり、その主たる役割を受けもつ部材は、鉛直部材、とくに、柱部材である。柱部材がせん断破壊のような脆性破壊をしなければ、コンクリート構造物の耐震安全性はほぼ保たれているといつてよい。

兵庫県南部地震後の調査で、柱部材（橋脚）の耐震性能においては、帯鉄筋の量および定着方法が非常に重要であると改めて認識された。そこで、構造細目の変遷として、帯鉄筋の最小鉄筋比の変遷について述べる。図-10は、断面が1m×1mで、軸方向鉄筋径を32mmとした場合の最小帯鉄筋比の変遷を示したものである<sup>2)</sup>。

土木学会では、1931年のコンクリート標準示方書で、帯鉄筋の規定として、(1)直径6mm以上、(2)間隔を柱の最小幅以下でかつ軸方向鉄筋直径の12倍以下、と定め、

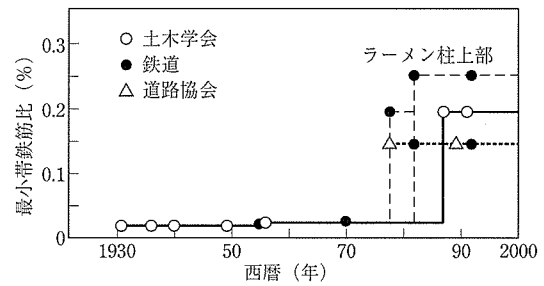


図-10 最小帯鉄筋比の変遷<sup>2)</sup>

1956年に、帯鉄筋間隔について、さらに、帯鉄筋直径の48倍以下を追加した。1980年に、前述のように許容せん断応力度が大幅に見直されるとともに、梁の最小スターラップ量が0.15%と規定され、柱にせん断補強鉄筋を配置する場合には、これに準じることとなった。1980年までは、許容せん断応力度が大きかったこともあって、土木構造物の大部分の柱部材は、コンクリートの許容せん断応力度を満たすように設計されていて、帯鉄筋量は、上記の最小量を配置するだけでよかった。1986年には、塑性ヒンジ化する範囲（部材接合部から柱幅の範囲）に配置する帯鉄筋の間隔を部材最小寸法の1/4以下とするとともに、柱の最小帯鉄筋比を0.2%とした<sup>5)</sup>。これらの規定は、現在の示方書でも引き継がれているが、1996年の示方書〔耐震設計編〕では、部材のじん性率を直接計算する式が示されたため、帯鉄筋の最小量が断面の設計を支配するとは限らなくなった<sup>12)</sup>。

道路構造物の耐震構造細目は、基本的には土木学会と同様な経過をたどっている。したがって、兵庫県南部地震で被災した構造物（1964年（昭和39年）の下部構造物の指針に準拠）の帯鉄筋は、上記の最小鉄筋比しか配置されておらず、現行の基準に比べて著しく小さかった<sup>2)</sup>。

鉄道構造物の基準も、1978年（昭和53年）までは土木学会の示方書と同じであった。1978年には、それまでの地震による鉄道構造物の被災状況から、柱部材の最小帯鉄筋量を0.2%とするとともに、部材接合部から有効高さの2倍の範囲には、0.25%以上の帯鉄筋量を配置することにした。1983年（昭和58年）には、部材のじん性率として4以上を確保することを目標にかかげ、帯鉄筋量はコンクリート断面積の0.15%以上、部材接合部から有効高さの2倍の範囲では、帯鉄筋の間隔は100mm以下とし、コンクリート断面積の0.2%以上でかつ計算上必要な量の1.2倍の量を配置することとした<sup>2)</sup>。1992年には、じん性率を確保するための帯鉄筋量を算定する式が示され、最小量が断面の設計を支配するとは限らなくなっている<sup>2)</sup>、<sup>7)</sup>。

### 6. 将来展望

2002年刊行予定の土木学会コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕では、地盤中の工学的基盤面に与えた地震動の加速度波形を基に、コンクリート構造物の応答挙動を時刻歴で求めることを原則としている。これは、1996年に制定された示方書〔耐震設計編〕の基本思想を踏襲し、内容をより具体的に記述したものである。構造物の応答解析方法として、材料の履歴モデルを基に有限要素解析で表現

する方法と、従来から用いられている部材の履歴モデルを用いる方法を併記し、どちらで行ってもよいとしている。研究レベルの高さを示方書に反映したという点では、世界の最先端を行っている。

世界の示方書における現状は、ニュージーランドの規定のように、地震時に部材が所要の変形能力を発揮できるための最小帯鉄筋量を規定しているものが多い。規定の帯鉄筋量さえ配置しておけば、部材のじん性能等は計算しなくてもよく、設計という観点からは、この方が簡単である。

簡便という観点からは、部材のじん性率が10以上となる新しい配筋方法を開発することによって、耐震設計の検討を省略できる可能性を示す研究も行われている<sup>15)</sup>。

将来展望ということでは、2通りの流れが予想される。一つの流れは、土木学会コンクリート標準示方書の方向で、構造物および部材の性状をより精確に把握し、数値解析技術をさらに向上させて、いろいろな場合について、数値シミュレーションで耐震性能を照査するものである。この方法は、新しい形式の構造物の耐震性能、あるいは、既存の構造物を耐震補強した場合の耐震性能等を照査するのに有効な方法である。

もう一つの流れは、最小限の構造細目を規定するだけで所要の耐震性能を満足する方法である。大変形時まで耐力を保持できる部材の開発は勿論であるが、免震構造や制震構造の開発およびその性能に関する研究も含まれる。この手法は、ある程度限定された形状寸法の構造物の設計には、現実的で有効な方法となる。

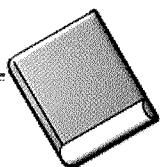
コンクリート構造物自身の耐震性能に関する照査技術は、現状でも相当なレベルに達しているといえる。それに比べ

て理解の度合いが低いのは、地盤と構造物との相互作用であり、さらには、地盤中の地震動の伝播状況である。構造物の耐震性能をより精度よく照査するためには、この面の技術の発展がより一層望まれるものである。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：兵庫県南部地震に関する耐震技術特別研究委員会報告，1997
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー 87，平成8年制定コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕改訂資料，1996
- 3) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1971
- 4) 日本国有鉄道：耐震設計指針（案）解説，1979
- 5) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，1986
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，1990
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），1992
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，2002
- 9) 梅村 魁編著：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法，技報堂，1973
- 10) 青山博之：物法・基準法・新耐震－RC建築物の設計法－，コンクリート工学，Vol.45, No.1, pp.94-97, 2002
- 11) 山田善一編著：耐震構造設計論，京都大学出版会，1997
- 12) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕，1996
- 13) 岡村 甫：RC設計法－土木，コンクリート工学，Vol.45, No.1, pp.91-93, 2002
- 14) N.M.Newmark and E.Rosenblueth: Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1971
- 15) 石橋忠良：地震被害の教訓，コンクリート工学，Vol.45, No.1, pp.98-101, 2002

【2002年8月19日受付】



#### ●関連書籍のご案内

### ●PC建築 —計画から監理まで—

平成14年11月発行

社団法人日本建築構造技術者協会編／技報堂出版刊

B5判・178頁・本体価格4,800円(税別)

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233