

8. 耐震設計のあるべき姿と今後の課題

8.1 はじめに

早くも阪神・淡路大震災が生じて5年半を経過した。大阪湾北部、六甲山南麓を東西に広がる扇状地上に、高度に発達した都市域を揺るがした兵庫県南部地震は六千有余名の尊い人命を奪い、神戸およびその周辺の地域を壊滅状態に陥れた。直接的な被害額は10兆円、種々の間接的な被害までを含めるとおよそ30兆円に及んだものと推定されている。

このような阪神・淡路大震災の重大かつ深刻な被災状況を教訓にして、再び同じ悲惨な事態が生じないことを願って、前章までに

- ① 地震工学と構造物の耐震設計法の基本的な事項
- ② 土木学会「第二次提言」の内容を受けた現在までに進められてきている耐震設計の改善に関わる調査・検討の動向

を網羅的に解説してきた。これらの内容から、新しい耐震設計の体系は従来のものとは比べ、格段に高度化、複雑化しつつあることを強く認識されたことと思う。

この章では、まず、阪神・淡路大震災をもたらした兵庫県南部地震をはじめとするこれまでの地震における土木構造物の被害状況に着目して

- ① 既往の地震での被害状況と耐震設計規定との関係
- ② 直下型地震としての兵庫県南部地震における被害の特徴

などを概観し、得られた反省や教訓について整理する。

次いで、これらの内容を踏まえて、考えられる耐震設計のあるべき姿を最近の社会資本整備や公共事業のあり方に関する議論も勘案しながら整理、提案する。そして、それらの達成に向けての課題と方策を論及することとしたい。

なお、本章の内容は筆者の限られた範囲での経験や知見に基づくものである。独断的あるいは偏った記述の印象を与えたとすれば筆者の責任であり、ご寛容いただければ幸いである。

8.2 既往の被害から得られた教訓

8.2.1 構造物の被害と耐震設計規定との関連

理科年表の地震カタログによれば、わが国では416年の大和地方で感じたと言われる地震を最初に、現在までおよそ2年間に3回、どこかの地域で何らかの被害があったと報じられた地震が生じたことになる。また、地球全体の地震エネルギーの約10%が日本とその周辺地域に集中していると言われている。このような厳しい環境にあるわが国では、台風、火山災害と並んで地震災害の軽減が重要な政策課題の一つとなっている。

明治以降、西欧の近代的な土木技術が精力的に国内に移入され、社会資本の整備が驚異的な速さで進められた。土木構造物では1891年濃尾地震で鉄道橋に落橋を含む大被害が生じたのが最初の体験であった。しかしながら、土木の分野で本格的な耐震設計が行われ始めたのは道路や鉄道の整備が全国的に進んだ時期に生じた1923年の関東地震におけるそれらの甚大な被害の体験を待たなければならなかった。

わが国で土木構造物の耐震設計の基準化が本格化したのは新幹線、高速道路の建設やバイパスなどの国道整備が盛んに行われ始めた1960年代からの、いわゆる高度経済成長期に入った頃からである。1964年の新潟地震、1968年の十勝沖地震そして1971年の米国ロサンゼルス近郊に発生したサンフェルナンド地震での地盤の液状化現象を含む各種構造物の被災が耐震設計の重要性を広く認識させた。参考までに、表-8.2.1に最近の主な地震の際に道路橋に生じた被害の特徴と耐震設計関連規定類の変遷の概要を示す。

設計基準類の内容は、この表からもわかるように、1978年の宮城県沖地震、1982年の浦河沖地震、1983年の日本海中部地震などの大きな地震の際に生じた構造物の被災形態・程度の実績に基づき改定されてきた。そして、あの1995年1月の兵庫県南部地震で、その時まで予想さえしなかった激甚な被害の発生に至ったのである。

阪神・淡路大震災での事態は何を示唆するのであろうか？古い設計基準で設計され、現行の基準類の内容を満足していない構造物に被害が集中したのは上述した地震被害と設計基準改定の経緯の再現である。大きな地震のたびに予測し得なかった現象～被害の発生が認められるという「耐震設計＝もぐら叩き」論といわれてもやむを得ないのかもしれない。

8.2.2 兵庫県南部地震での被害の特徴と原因

特に、高速道路や新幹線の高架橋の崩壊や落橋防止構造の損壊による桁の落下そしてRC中柱のせん断破壊による地下鉄躯体の崩壊は土木技術者の誰もが自らの眼を疑う光景であったと言っても過言ではないであろう。高架橋の基礎杭の損傷や液状化の発生とその直後の地盤流動による橋脚の傾斜と東灘下水処理場の各種施設の被災にも驚かされた。また、上・下水道、都市ガスなどのライフライン施設の被害は、復旧までに長い期間を要した。このような事態は住民に深刻な精神的打撃を与えたばかりでなく、日常生活にも大きな支障を強いることとなった。いわば近代的な大都市における地震災害の典型的な様相を顕現させたのである。

これらの被害は建設時点での古い設計基準で造られたいわゆる既存不適格の構造物に集中したことがその後の調査で明らかとなった。鉄筋コンクリート製橋脚の主鉄筋段落し部、地下鉄の鉄筋コンクリート製中柱など構造細目を含む耐震性能に欠陥のあった箇所、裏込めや基礎地盤を置換した砂質土の液状化の影響を受けた港湾の護岸さらには埋設管の被害がこの範疇に入るものと考えられる。この他、最近の研究成果からある程度予想し得た現象として、鋼製橋脚の損傷、液状化に伴う地盤流動の影響、基礎杭の損傷などがある。ちなみに、落橋防止構造の破損の形態については残念ながら被害を受けて初めて現象的な理解をすることができたという、設計規定を定めた当時の予測の範囲を超えたものとして考えざるを得ないであろう。

これらの構造物の設計は、その時点における地震工学、コンクリート工学などの最新の成果を踏まえて定められた規定を適用して行われたことは事実である。上述した被害の多くについては、地震動の強さがこれまでの設計で想定していた範囲をはるかに超えるものだったことが主な原因であることは確かであるが、現在の関連する分野の研究・技術の知見によれば、設計当時の基準類の内容にも不足するところがあったと考えられている。直下型地震が生じた場合、震源域近傍の地震動の強さに対して、構造特性の如何によらず震度法～許容応力度設計法を機械的に適用してきた当時の体系が無効だったのである。

表-8.2.1 主な地震による道路橋の被害形態と耐震設計法の変遷

西暦	地震名	マグニチュード M	最も特徴的な被害形態	耐震設計法
1920	関東地震 (1923年)	7.9	橋梁本体の強度不足による被害(落橋数:17うち火災によるもの9橋)	1926「大正15年道路構造に関する細則案」 →地震荷重が初めて規定される
1940	福井地震 (1948年)	7.3	基礎を含めた下部工としての強度不足による被害(落橋数:7)	1939「昭和14年鋼道路橋設計示方書案」 →設計震度の標準化 1956「昭和31年鋼道路橋設計示方書」 →地域、地盤条件に応じた設計震度の補正
1960	新潟地震 (1964年)	7.5	液状化による落橋, 下部工の沈下, 傾斜(落橋数:3)	1972「道路橋耐震設計指針・同解説」 ・修正震度法の導入 ・落橋防止対策の規定 ・液状化判定法の導入
	宮城県沖地震 (1978年)	7.4	支承部の被害 RC橋脚の損傷(落橋数:1)	1980「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」 ・液状化に対する設計法の明確化 ・主鉄筋段落し部の設計法の改良 ・動的解析用入力の規定 ・RC橋脚の変形性能照査
1980	浦河沖地震 (1982年)	7.1	RC橋脚の主鉄筋段落し部の損傷	1990「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」 ・震度法と修正震度法との区別を撤廃し、応答を考慮した震度法に一本化 ・液状化判定法の洗練化 ・設計震度算出法の洗練化(「設計振動単位」の概念の導入) ・動的解析による照査の明確化 ・RC橋脚の保有耐力照査法の明確化
	日本海中部地震 (1983年)	7.7	液状化による被害	
1990	釧路沖地震 (1993年)	8.0	RC橋脚の主鉄筋段落し部および支承部の損傷	
	兵庫県南部地震 (1995年)	7.2	RC橋脚部の損傷、圧壊 鋼製橋脚の損傷、圧壊 基礎杭の損傷 (落橋数:9、46径間) 鋼製支承および落橋防止構造の損傷 埋立て護岸付近の地盤の液状化による流動現象に起因する橋脚の傾斜と基礎杭の損傷	1996「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」 ・設計地震入力として内陸直下型地震を想定したものを追加 ・従来の震度法に加え、地震の影響の大きい橋脚、基礎、支承部、落橋防止システム等の部材については地震時保有水平耐力法を適用 ・その他、新たに規定された事項 a. 非線形性の効果を含んだ挙動解明のための動的解析法 b. 1/2地震動に対する液状化判定法 c. 地盤流動の影響を考慮した液状化による基礎の安定性照査法 d. 免震設計法 e. RCラーメン橋脚、鋼製橋脚および各種基礎に対する地震時保有水平耐力法 支承部、落橋防止システムの設計方法

被害の状況は、設計当時の技術水準に関わるものであり、現在の地震工学や耐震設計技術の低さを示すものではない。わが国の地震工学の研究は従来から世界の先端レベルにあり、現在も多方面で活発な活動を行い、優れた成果を挙げていることは事実である。問題は補強の必要性は把握していたものの、社会的・経済的な制約の中で事業実施の優先度の判断から補強の実施が神戸などの被災地域で遅れていたことにある。耐震補強の設計に用いる直下型地震の地震動の大きさを適切に評価する工学的判断の未成熟さはあったにせよ、古い基準で建設された建造物の耐震補強が最新の知見によって行われていれば、あのような極端な被害の発生を抑制あるいは軽減できたものと考えられる。

8.2.3 過去の震害状況から得られた反省と教訓

「日本人は失敗を学習しない国民である。」という柳田邦男の厳しい指摘¹⁾がある。以上述べてきた内容から、われわれは過去の震害をどのように捉えてきたのだろうか？過去の地震による被害を失敗とする見解については議論があろう。ただ、阪神・淡路大震災の高架橋や地下鉄の壊滅的な被害を以ってすれば、土木技術者の多くは筆者を含めて自らの良心として、それら事態の発生をやむを得ないとする論理には納得しないと思われる。

このような観点から、本項では、耐震設計のあるべき姿を具現化するために、兵庫県南部地震に到る既往の震害状況に基づいて考えられる反省と教訓を整理してみたい。これらは、前項までに述べた内容も踏まえると概ね次の4項目に大別されよう。

- ① 耐震設計の意義の再確認と耐震安全性に関する説明責任（アカウンタビリティ：Accountability）の必要性
- ② 現在供用中の建造物に対する耐震診断・補強の重要性
- ③ 建造物全体系の合理的な構造計画の重要性
- ④ 安全神話の創出防止

以下、これらの内容について議論を進める。

(1) 耐震設計の意義の再確認と耐震安全性に関するアカウンタビリティの必要性

1) 構造設計の定義、耐震設計の目的

これらを考えるには「設計」という行為の定義に遡ってみるのが有意義である。ちなみに設計の定義として次のものが代表的であろう。

- ① ある製作・工事などに当たり、その目的に即して、工費、敷地、材料および構造上の諸点などの計画を立て、図面その他の方式で明示すること²⁾。
- ② 思いついた【あるもの】に具体的な形を与え、その着想の正しさを確認することであり、次の三つの行動から成り立っている³⁾。
 - (1) 【あるもの】を作りたいと決める。
 - (2) それに形を与え、使用する素材を決める。
 - (3) その作り方を決める。

「建造物の設計」については、次のような定義が伊藤、尾坂によって示されている⁴⁾。すなわち、「安全性・耐久性、使用性、経済性および視覚適合性などの全ての条件を程良く満足させる建造物を具体的に指定するための全ての行動を指す。すなわち、建築家（アーキテクト）と構造家というような区別のない土木設計の分野では、対象とすべき施設が指定

された後、これに形を与え、材料を選び、諸元を定めて施工の段階に持ち込む間での全ての行為を設計と称することになる。」と述べている。

筆者は構造設計という行為を、荷重、使用材料の特性、解析法など種々の不確定要因のもとで安全性、経済性、使用性、耐久性、維持補修性、視覚適合性などを適切に満足させるように、設計計算や各種解析結果、既往の実績評価および技術開発の動向把握など、一連の作業プロセスを踏まえた工学的判断に基づき、ものの形、使用材料、施工法を定める高度な意思決定を行う知的創造作業と考える。IT化の急速な進展に伴い、構造解析や計算が設計行為そのものであるかのような風潮が感じられる。それらばかりでなく、構造計画、施工性・施工法、使用材料の特性などを含めた総合的かつ技術的判断の集積が「設計」であることを認識しなければならない。

したがって、耐震設計の目的は大地震という構造物の供用期間に比べて発生間隔の長い偶発的な自然現象による不確定性の高い荷重作用に対して、

- ① 構造物の被災による人命への影響
- ② 震後に果たすことが期待されている機能

などから定める耐震性能を確保するために、

- i 必要で最適な構造諸元（構造計画、形状・寸法、使用材料など）
- ii 施工計画

を上述した各種技術行為に基づいて行う工学的判断により定めることにある。

2) 耐震設計の意義について

耐震設計基準類は、地震工学ばかりでなく、構造工学、材料工学、地盤工学などの広範な研究成果の蓄積を待って、その妥当性が評価されて初めて刊行あるいは改定されるものである。したがって、一般には、5~10年程度の間隔でそれらの内容が見直され、改定される。これが地震工学の水準とその時点で用いられている設計基準類の内容との間の「ギャップ」をもたらす所以である。

それでは、耐震設計とはどのようなものであろうか？地震は突発性で再現性の無い自然現象であり、地震動の予測自体も不確定性の極めて高いものである。加えて構造物を支える地盤の物性や地震を受けた時の地盤の挙動を精度良く予測することも難しい。耐震設計という行為は上述した「ギャップ」を埋めるための知恵と工夫を行って、常に最新の知見を吸収するとともに、既往の震害事例とそれらの特徴、経済性、常時の使用性や安全性、施工性、維持補修性等を勘案しながら、大地震の際の安全性を確保するための最適解を見いだす知的創造作業と言えよう。現在、用いられている基準類の内容を忠実になぞるだけでは、これらの各種要因を満たす解を得るのが難しいものもあることを自覚すべきであろう。設計技術者の理解を助けるために、新たな技術や実績がある程度まとまった時点で、たとえば毎年、定期的に基準類の新規追加と古くなって意味のなくなった条項の削除等をルール化することもことも一考に値する。

設計技術者としての矜持と自然現象に対する畏敬の念を持ち、常に批判的な眼で基準類に規定された表現の背景、設計計算式の適用に際して前提となる条件などを洞察しようとする姿勢が大切である。

特に、最近の情報技術のめざましい進展により、設計技術者が高度な解析ツールを容易

に使える状況になっているが、解析方法や計算式の精度と適用条件、入力する各種パラメータの定義や具体的設定の仕方などを正しく理解しておくことが前提である。それも無しに、ただ、やみくもに解析や計算結果の評価を行うのは、明らかに意味の無いことである。

3) 耐震設計の限界と耐震安全性に関するアカウンタビリティの必要性

耐震設計の特徴として、荷重としての地震の影響、それを受ける構造物の使用材料、部材としての動的性状そして構造物を支える地盤の動的性状などがそれぞれに大きなばらつき(定量的変動特性)を有するため、ある耐震設計規範で設計された構造物の挙動の予測および安全性に関する不確実性が、他の工業製品や地震の影響を大きく受けない構造物に比べて、高いことが挙げられる。

これまで設計で想定する地震よりも小さな地震で構造物が被災した場合もあるし、逆に大きな地震に対しても構造物が被災しなかった場合もあることは事実であり、そのような意味で地震の影響を受けない、例えば機械要素の設計での安全性と比べれば、明らかに信頼性が低いのは事実である。

耐震設計の目標は、定められた予算の制約のもとで、安全性確保の信頼度を最新の知見、技術力および創造力の発揮により最大限高めながら、最適な費用対便益効果を求めることにあると言えよう。このような考え方を設計技術者が理解するばかりでなく、土木学会などの学・協会や管理者、企業者も社会一般に積極的に働きかけることが必要である。

耐震設計の精度向上には上述した各種要因に関する基礎分野から応用・先端分野にわたる広範な調査・研究が必要である。しかしながら、地震動自体が再現性のない現象であること、そして社会資本整備や防災対策という社会・経済的行為であるがための予算の制約を考えると、自ずと目標とする安全性の水準には限界があることは否定できない。言い換えれば、構造物の耐震安全性の確保とは何らかの被害の発生を想定したリスクの下での社会的かつ工学的意思決定であり、絶対的な安全性を保障することを意味ものではない。

このような点を踏まえて、一旦被災した再場合に使用ができなくなる構造物の崩壊や人命に関わる重大な損傷が生じないように、例えば、橋・高架などに対する落橋防止構造等のフェイルセーフ的対処が講じられてきている。また、地震後速やかな復旧対応を講じることができるように、震後対策の進め方や復旧工法などをまとめたマニュアルなどの整備も進められている。

しかしながら、上述したような土木構造物の耐震設計の基本的な考え方や安全性確保の限界について、社会一般には十分知らしめて来ていないのが実情である。国民の大半が阪神・淡路大震災の前までは少なくともわが国の地震工学そして耐震設計技術は世界的にも先端的な水準を有しており、1923年の関東地震級の大地震が生じても安全だと信じていたのである。1989年米国サンフランシスコ湾岸地域を襲ったロマプリエタ地震や兵庫県南部地震の1年前に発生したノースリッジ地震の際の高架橋被害状況に対して、わが国の専門家が日本では決してあのような被害は生じないという趣旨のマスコミでの発言に対し、今も厳しい批判があることは事実である。⁶⁾

1999年に相次いで生じたトルコ、台湾の大地震では断層運動による土木構造物の被害が目立った。特に、台湾中部では多くの道路橋が断層両側の地盤の‘ずれ変位’の発生により、壊滅的な被害を受けた。このような断層運動は、わが国でもこれまで多くの地震で認め

られている。中でも 1891 年濃尾地震の際、岐阜県根尾谷の水鳥地区に鉛直方向 6m、横方向に 4m の相対変位を生じ、延長 400m にも達する断層崖が現れた事例が代表的である。それ以降、兵庫県南部地震に至るまで、関東地震、北丹後地震、北伊豆地震、鳥取地震、福井地震、伊豆半島沖地震、伊豆半島東方沖地震などで断層周辺での地盤の相対的な変位の差が生じたことが明らかとなっている。

幸いにして、わが国では、これまでは、土木構造物には断層運動による直接的な被害は生じなかったため、身近な問題としてこの影響を考えてこなかった。上述した台湾の状況から、わが国でもこのような断層運動による被害の発生の可能性は決して低くはない。断層運動による‘ずれ変位’の発生に対する耐震設計上の対策については、その量にもよるが、それが数 m にも達すると物理的にも限界がある。活断層の位置があらかじめ判っていて、被害が起きてから断層による被害は想定外であったという弁解はもはや通用しない。事業の計画や設計に従事する技術者はこのことを重く受け止めなければならない。

問題は「大地震にも安全である。」とか「大地震にも耐えられる。」というこれまで行政や管理者、企業者が社会一般に説明してきた表現の意味が曖昧なことにある。土木構造物は社会資本の根幹を構成するものであるから、それらの使用者や受益者である国民は耐震安全性の水準について知る権利を有する。逆に言えば、公共施設の管理者や公益事業体は、耐震安全性の確保には限界があること、そして目標とする耐震性能の内容を具体的かつわかりやすく国民に説明しなければならない。より具体的に言うならば、極めて稀にしか起きない内陸直下型地震を含む大地震に対して

- ① 激しい地震動や断層運動による‘ずれ変位’の発生による構造物に生じる被害～損傷の受忍限度(どこまで壊れてよいのか、どの部位が壊れていけないのか?)をどの程度に設定しているのか?
- ② 特に、地震後の機能に着目した構造物の耐震性能をどのように設定しているのか?

について、社会一般に対して平易に提示する必要がある。

1999 年 2 月建設省から公共事業の説明責任(アカウンタビリティ)向上行動に関する指針⁶⁾が公表された。国土条件と社会資本の整備実態の明確化が謳われ、わが国の脆弱な国土条件や間近に控えた本格的少子・高齢社会の到来を踏まえ、現在の社会資本整備の状況について国民に情報を提供し、認識の共有を進めることとされている。具体例として洪水のハザードマップ(災害予測図)により河川沿いの地域住民に危険性を開示することがあげられている。大地震に対しても、このような動きが建設省ばかりでなく他の公共機関にも波及して、耐震安全性に関する説明責任が発揮されることを大いに期待したい。

(2) 現在供用している各種構造物に対する耐震診断・補強の重要性

極言すれば耐震設計の基準類は新しく世に出るか、改定され公刊された瞬間から、それらの内容の陳腐化が始まる。一方、その時点で供用されている構造物に対しては新たな規定を適用した場合の耐震性の診断と補強が地震防災対策を進める上で重要な課題となる。

わが国の供用中の土木構造物に対する耐震診断については、1971 年のサンフェルナンド地震における高架橋の大規模な落橋被害をきっかけに、同年に道路橋の震災点検が実施されたのが最初であった。以来、国の重要施策に取り上げられ、国内外の地震によって大き

な被害が生じるたびに震災点検が行われることとなった。その後、道路橋以外の道路施設、鉄道施設、港湾施設などにも点検の対象が広がり、最近では兵庫県南部地震の後に、全国的に各種公共土木施設に対して防災点検が行われた。

耐震補強については、道路橋では1972年の道路橋耐震設計指針・同解説の刊行前に建設された橋に対する落橋防止構造を設置することから始められ、昭和年代に概ね全国的に完了していた。この他、1986年度の点検結果を受けてRC橋脚の主鉄筋段落し部の補強が、また1991年度の点検結果から液状化に対する基礎の補強がそれぞれ開始されていた。兵庫県南部地震以降は土木学会「第二次提言」の内容を踏まえて、基本的に新設の場合と同じ考え方で橋脚躯体、落橋防止構造の補強が行われている。

河川堤防や港湾の護岸、石油コンビナート等の危険物貯蔵施設についても、兵庫県南部地震の後、液状化の危険性に着目した点検と補強工事が実施された。また、上・下水道施設や電力・都市ガス・電話などについては、1983年の日本海中部地震を契機にして液状化を主な対象とした耐震診断・補強が各企業体で鋭意進められている。

わが国の大都市の地震災害ポテンシャルを考えると新設のものはもちろん、現在、われわれが利用している各種の既存構造物に対して新設のものと同じ新しい設計基準で耐震性の向上対策を講じて行かなければ、阪神・淡路大震災と同じような悲惨な事態を招くことになる。地震災害軽減に向けて耐震診断・補強の重要性は誰もが認めるところであるが、問題は、現在の大都市をはじめとする社会機能を支えている公共土木施設の多くが近代的な耐震設計法の体系が導入される1960年代半ば以前の基準類によって設計・施工されたことである。今後は国および地方自治体の多額な財政赤字の状態、少子・高齢社会の到来による財政に与える負荷の増大といった厳しい環境の中で、これらの大地震に対する備えを含む維持管理および更新をどのように合理的に進めて行くかが大きな課題となる。財源難の中で必要な事業を進める方策として、最近、地方自治体で関心を集め、始められつつあるPFI事業の計画でも、将来のリスクの対象として大地震(レベル2相当)の発生とその対策のあり方が重要なポイントとなるものと思われる。

いずれにせよ、阪神・淡路大震災の教訓として、これから社会資本のストックの時代に入ることを考えると、災害軽減の基本は古い設計基準で建設された既存の構造物に対する耐震性向上対策の実践にあることを忘れてはなるまい。

(3) 構造物全体系の合理的な構造計画の重要性

地震に強い構造とするには全体系を力学的にねばり強い、冗長度の高いシステムとすることが基本である。重要な構造物では、対象となる構造物の周辺地盤を含む個々のさまざまな条件を適切に考慮して、地震時の挙動が地震の影響を大きく受けにくい全体構造系および柱、壁などの構造部材の配置と使用材料の設定、基礎の形式や構造・材料諸元、免震・制震装置の採用などからなる耐震構造計画を行うことが構造設計のプロセスの中で大切な課題となる。

一例を挙げると関東地震の際、東京の日本橋などの石造アーチ形式には被害が生じなかった。おそらく、このような経験に基づき、昭和の初めに、新潟市内の信濃川の最下流に架かる万代橋がRC連続アーチ形式で設計・施工された。地震荷重は考慮されなかったにも拘わらず、1964年の新潟地震の際には橋台部分で変状が生じたものの、交通機能には影

響がなく震後の救急・救援や各種復旧活動などの重大な使命を果たすことができたのである。日本橋も万代橋も 21 世紀を間近に控えた現在、健全にその機能を果たしている。

現代を生きるわれわれ設計技術者は情報技術や解析技術の進展に眼を向けるばかりでなく、このように時代の変遷を超越した先人の慧眼に対して敬意を表すとともに、真摯に技術の本質とは何かを追求する姿勢を大切にすべきであろう。土木学会や地盤工学会などで、これまで刊行されている地震調査報告書の内容に改めて目を向け、大きな被害ばかりでなく、軽度なものについても状況を把握する姿勢が大切である。ちなみに、現在、土木学会から復刻版として刊行されている関東地震の被害調査報告書は地震後 80 年近くたった今日においても、多くの示唆に富む内容がまとめられており、一読に値する。

(4) 新たな安全神話の創出防止

阪神・淡路大震災の前までは「わが国の土木構造物は 1923 年関東地震級の大地震に対しても安全だ。」また、米国のロマプリエタ地震の際に生じたサンフランシスコ湾岸周辺地域の高速道路高架橋の落橋そしてノースリッジ地震の際にロサンゼルス市北方郊外の高速道路高架橋の落橋に対するわが国の専門家の間では「日本では米国に比べて厳しい耐震設計基準を定めているからあのような被害は生じない。」といった考え方が常識であった。それが 1995 年 1 月 17 日早暁 5 時 46 分に発生した兵庫県南部地震のわずか十数秒の間に脆くも崩れ去ってしまった。まさに、わが国の土木構造物に対する耐震技術そして安全性に関する神話が崩壊したのである。

何故このような神話が生まれてくるのであろうか？このような問いかけに対し、外岡秀俊は著書⁷⁾の中で興味深い洞察を投げかけている。

すなわち、「神話」とは危機に対して脆弱な現実を覆い隠す被膜であり、普段は意識されることなく、崩れることによってしか露呈しない社会の合意事項(例えば、関東大震災級の地震に耐えられる。)だと示唆している。以下、土木技術者にとって重要な見解が示されているので、少々引用させていただく。

- 大切なのは、災害によって露呈した社会の合意事項のどの部分が崩されたのか、その箇所と原因を探り、確定して行くという作業だろう。その場合に、合意のレベルがどこにあるのかを、その都度明らかにしておく必要がある。社会の合意と言っても、技術者や専門家、法曹、消費者など、各職種、各層によってその認知度や了解の範囲が大きく異なるからだ。
- 「神話」は技術者や専門家が独自に創りあげ、流布することによって成立するのではない。「神話」は実は、一定の専門家の合意がさまざまな網の目を通じて社会に流布される間に、次第に緩められて変質し、当事者ですら、気がつかないうちにその変質した合意を暗黙のうちに受け入れることによって成立する。その時点で、専門家は、責任と権限を持った技能集団ではなく「神話」を解釈する巫女、ないしは預言者に近い集団に転化する。

専門家の合意は、社会的合意にならない限り、また新たな「神話」を紡ぐことにしかならないだろう。

設計基準類を整備する立場の行政および公益企業体の技術者そして実際に設計実務に従

事する民間の技術者にとって、これらの指摘に対して謙虚に耳を傾けるべきではないだろうか。

阪神・淡路大震災を深刻かつ重大な教訓にして改定された基準の内容が、それらの趣旨、前提を離れて一人歩きしないように、また、われわれ設計技術者が本質的な理解を十分にしないで、思考停止的な基準類を運用することのないように、最大限の努力をしなければならない。このためには、

- ① これまでの大地震の際の被害状況
- ② 建設地点の地形・地質
- ③ 当該構造物の構造特性

等から大地震の際に構造物が示すであろう挙動(パフォーマンス)をできるかぎり想像豊かに、視野を広くめぐらせて想定することが大切である。そして、安全性の照査の対象となる‘限界状態’を漏れのないように整理・分類することが要求される。

このような設計技術者の、常に創造的で、積極的な問題抽出と解決への姿勢が「阪神・淡路大震災にも耐えられる。」という新たな安全性の神話の創出を防ぐことになるものと考えられる。兵庫県南部地震における神戸市内の地震動の強さをしのぐ次の大地震(Next Big One)発生の可能性は誰も否定できないのである。

8.3 耐震設計のあるべき姿

阪神・淡路大震災の体験は、広く社会に地震防災に対する関心を巻き起こした。施工不良や早期の復旧に関する疑念の報道に加えて、耐震設計の考え方や基準の内容に関する記事、例えば、地震の上下動(縦揺れ)の影響などについても、詳しく報じられた。おそらく、わが国では初めて、専門的かつ大量に耐震技術に関する解説記事がマスメディアから発進されたものといっても過言ではあるまい。

その後、最近に到るまでの公共事業や社会資本整備の進め方に関する議論の高まりの中で、事業評価による客観性の確保、各種の事業計画への住民参加制度、国民に対する事業や予算執行に関する説明責任(アカウンタビリティ)の向上などの動きが国においても考えられるようになってきた。

本節では、このような社会の状況および前節でまとめたこれまでの地震災害の反省と教訓とに基づいて、これからの耐震設計のあり方、かくあるべきだという観点で論を進めてみたい。大別すると次の三つの観点になろう。

① 社会資本整備の立場；

社会への開かれた内容、すなわち、使用者、受益者である国民に、わかりやすい内容を目指すこと。

② 災害軽減の立場；

地震防災対策への適用が容易であること。

③ 技術論的立場；

設計体系がリアリティの高いものであり、設計に従事する技術者の創意・工夫が活用されるものであること。

これらについての見解を以下にまとめる。

8.3.1 社会資本整備の立場から

先進国では、WTO の条約締結による国家間の通商障壁を撤廃するための施策として、建設市場の開放の観点から、構造物の設計体系を各国国内の規定や規格にもとづく設計計算の手法・条件を細目にわたり取り決められた「仕様規定型設計」から、各種の限界状態における構造物の挙動や機能の具体的達成（パフォーマンス）目標と安全性の水準を明確に規定した「性能規定型設計」へ移行させることが大勢である。わが国でも、1998年に「建築基準法」が改正され、「性能規定型設計」が導入された。また、世界的な耐震設計の標準となる事項を定めた ISO-3010 の性能規定型への改定作業を日本が幹事を引き受け、建築分野の学識経験者が担当している。適用の範囲には土木構造物も含まれることから、土木の分野でもその対応が迫られ、土木学会では地震工学委員会が設計地震荷重や土木構造物に対する意見の取りまとめを行うこととなった。

対象構造物の重要度に応じて定められる確保すべき耐震安全性の水準と具体的内容、言い換えれば、耐震性能の内容についての合意が広く社会一般の間で形成され、それらが耐震設計基準あるいは設計示方書としてわかりやすい形式である「性能規定型設計」として表現されることは 8.2.3(1)で述べたアカウンタビリティの具現化という意味からも望ましい。基準類の中で安全性の確保を含む耐震設計技術の内容と目標水準について、管理者、企業者が広く社会一般にわかりやすく説明するのである。このような認識が阪神・淡路大震災に対する設計技術者としての反省、教訓の実務への反映につながるはずであり、ささやかな道義的責任を果たすことにもなるものと思いたい。

実際、設計実務では上述した「性能規定型設計」が港湾施設や鉄道構造物の耐震設計基準類で採用されることとなった。日本道路協会においても道路橋に対して、「性能規定型設計」の移行に向けて、「道路橋示方書・同解説」の条文・解説の改訂作業が平成 12 年度末の刊行に向けて、現在、鋭意進められている。これら基準類の改定では、耐震設計の目的・目標、意義を平易に示すばかりでなく、設計で想定する地震動の大きさと各種の限界状態を想定した具体的な耐震性能のメニューの関係を対象とする構造物の重要度や機能に応じてわかりやすく表現することに重点が置かれている。

また、耐震安全性に関する社会的合意形成については、発生時期や震源域を特定することが難しい大地震の際の地震動強さと構造物がそれを受けた場合の耐震性の確保目標を、誰が、どのように、どの程度に定め、いつまでに整備するのか、そしてそのために必要となる財源をどのようにして確保して行くのかという命題で表現することができる。すなわち、大地震に対する適正な防災投資水準に関する社会的合意形成の問題と言える。これをクリアして初めて、これからの構造設計の主流となる、「性能規定型設計」の意義を受益者(利用者、納税者)が理解する契機になるものと思われる。

8.3.2 災害軽減の立場から

大地震の際の被害を軽減するためには、現在供用中の構造物の耐震性能をできるだけ正確に評価し、問題がある構造物に対して耐震補強を行うことが大切である。今後、社会資本ストックの時代を迎えるに当たって、耐震診断・補強の推進が社会的に重大な課題となる。このような状況の変化を考えると、新設の構造物を対象にした「耐震設計」という狭

義の用語ではなく、新設も既存構造物もその対象に包含した「耐震性能評価・向上技術」と位置づけ、広義の「耐震設計」として用いた方が適切であろう。

この考えは広義の耐震設計のもつ社会的な重要性和地震災害の軽減への意義を示唆するものである。地震災害を防ぐという‘防災’の概念は適切でなく、災害の程度を如何にして最小限に留めるかという‘軽減’の概念に立脚して、広義の耐震設計をハードな震前対策の重要な手段の一つと位置づけ、震前・震後のソフト的な他の対策と併せて災害軽減を図ることが合理的である。安全性の評価を行うに際しては、構造解析に用いる計算式や耐震構造細目など耐震設計の最新の考え方を適用しなければ耐震性の向上はできない。既設構造物に対する耐震性の診断や補強設計を行う際には、これらの耐震設計で採用される新しい手法、条件などを反映することが必要である。

地震災害の規模は、図-8.3.1に概念的に示すように、

- ① 災害の誘因となる地震動の強さ
- ② 素因となる地形・地盤条件
- ③ 被害拡大要因としての地域の土地利用状況、建物や土木施設の保有耐震性能、耐火性能など
- ④ 被害抑制要因としての事前（震前）および震後対策の実施水準

などの相対的なバランスによって決まるものと言えよう。

耐震設計は、その地域に現存する建物や各種土木構造物の設計時点での関連する技術水準に基づいて定められた耐震性能を保障するものであり、それらが築造されて以降、現在まで長期間経過している場合には現時点での設計規定に照らした耐震補強が震前対策として必要となる。これに対して、震後対策には緊急措置、応急復旧～本復旧に至るまでの種々のソフト的なものが含まれる。

地震災害をできるだけ軽減するためには、既存の施設や構造物に対する8.2.3(2)に述べた震前対策としての耐震診断・補強の実施や災害の拡大を防ぐ震後対策の適切な実施計画の準備・立案と実践を系統的に行うことが不可欠である。耐震設計法を充実、高度化したら、早急にその成果を耐震診断や耐震補強に反映させることによって、その地域の地震に対する脆弱性を一定の水準で改善することが技術的には可能となる。要は、耐震設計法の改善を速やかに既存構造物の耐震補強事業に生かすことそして災害拡大防止のための震後対策を予め整備しておくことが地震災害の軽減の信頼性を高めるために必須の条件となる。いわば災害軽減対策効果の信頼性向上の有力な手段として、震前対策として広義の意味での「耐震設計」すなわち「耐震性能評価・向上技術」の向上を図ることが重要と考える所以である。

以上、述べてきた地震災害軽減のための種々の対策を実効的なものにするには、社会的合意形成のプロセスを踏まえて

- ① 社会システムの一環として耐震診断や評価を地震災害アセスメントとして法制化すること
- ② 大地震を対象とした耐震性向上対策を事業化する制度を確立することが必要と考えられる。

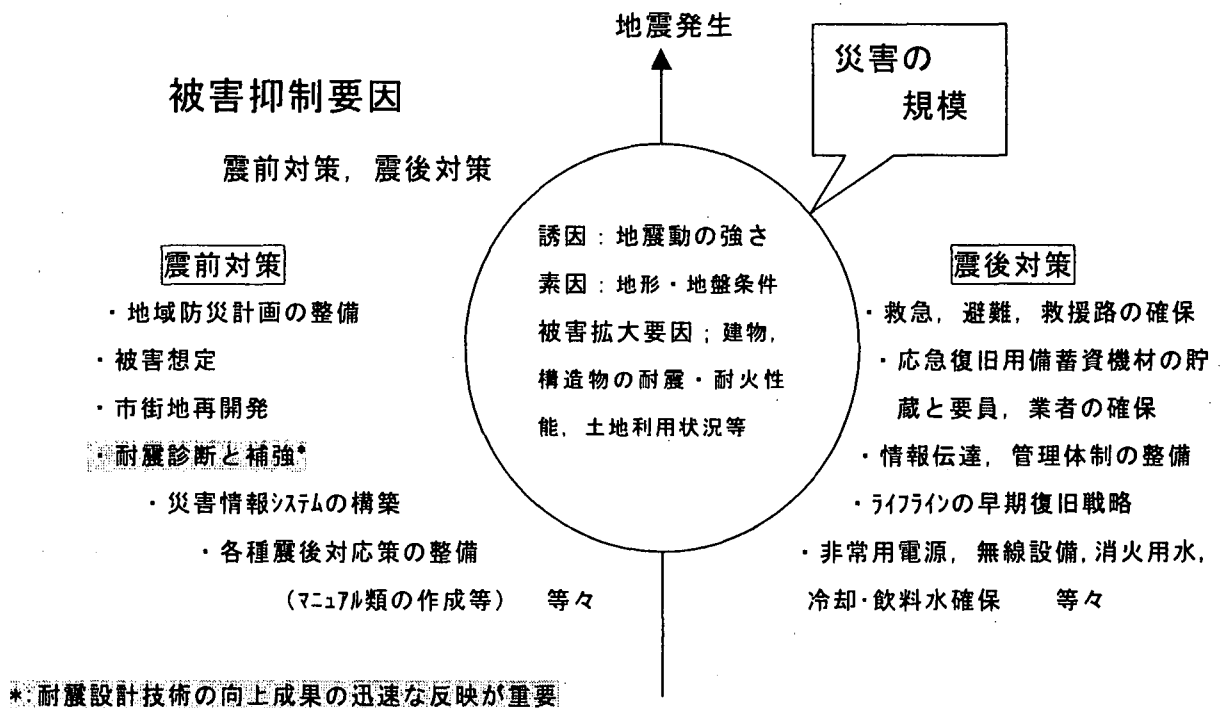


図-8.3.1 地震災害とその軽減対策の関係の概念

8.3.3 技術論的立場から

情報技術の進展は、眼を見張るものがある。耐震設計技術はその恩恵を大いに受けている。建造物の大地震時の挙動をシミュレートする非線形動的解析など高度な解析が、まさに手軽にパーソナルコンピュータで行うことが当然のようになった。耐震設計がもはやその活用無しでは考えられなくなった。

ここでは、このような環境の急激な変化のもとで、耐震設計の枠組みおよび設計技術者の側からの観点から整理を試みる。

(1) より実際に近い挙動が考慮可能で信頼性の高い耐震設計への展開

建造物の供用期間の間に、生じる確率が極めて低いと考えられる大地震に対して、建造物～基礎～周辺地盤を一体とした詳細な非線形動的解析を実施して耐震性能の照査を行うことは可能ではあるものの、その結果については実際の強震時の観測との同定が不十分な現状では、残念ながら信頼性に欠けると言わざるを得ない。また、この種の解析を逐一、耐震設計に取り入れることも合理的ではない。

これらを克服して、地震時の建造物に対する耐震性能に基づいて限界状態を適切に想定すること、そして、それには建造物の地震時挙動予測の技術を、よりリアリティを高めたものとするのが目指すべき方向であろう。周辺地盤を含めた建造物の弾性状態から損傷～破壊に到る塑性化領域までの地震応答を精度良くトレースできるような詳細な解析法に基づく精緻な設計方法およびそのような挙動を包含した比較的簡易な方法等のメニューが提示されるような幅の広い体系が望ましい。設計の対象となる建造物の重要度および構造システム特性の複雑さの程度(比較的単純なもの～複雑なもの)に応じて、設計者がそのメ

ニューの中から適切と判断される設計方法を選択しうるような体系である。

同時に、海外からのわが国の耐震設計に対する十分な理解が得られる体系と内容に整備すべきである。今後、より国際的な観点からわが国の耐震設計を公平かつ客観的に見直してみる姿勢も必要とされよう。

耐震設計の信頼性を高めるためには、もちろん、よりリアリティの高い設計計算モデルを作り上げ、それらを活用することが必要であるが、それに加えて、人命に影響を及ぼすような大規模な被害が生じないような施設や構造システムをリダンダンシーに富む計画とすること、すなわち極力、不静定次数の高い構造や機能確保を目的としたバックアップシステムの整備などを講じる必要がある。この他、落橋防止システムや地中構造物などの相對変位吸収装置（継手など）等のフェイルセーフ的機能を有する構造細目を積極的に採用すべきである。なお、落橋防止システムについては単に、標準的なタイプを設置するだけでは不十分であり、必要に応じて、動的解析を適用して、その動的挙動を定量的に評価し、耐震安全性を設計技術者の総合的な判断に委ねる設計方式することが望ましい。

なお、構造システム特性に着目した耐震設計の具体的内容については、本テキストの特別セミナー：「構造システムとしての挙動を考慮した耐震設計」の中で詳述されている。設計実務に従事する技術者にとって、新しい観点から興味深い内容が盛り込まれているので、参照されたい。

(2) 設計技術者の創意・工夫などの動気づけが可能な設計基準類の整備

繰り返すが、耐震設計という行為はただ、単純に地震荷重を含む地震の影響を決めて、計算なり解析をして耐震安全性の照査を行うものではない。種々の不確定性を考慮して大地震に対して抵抗力のある、ねばり強い構造物を創り出すための知恵と工夫すなわち高度な工学的判断を伴う創造的な作業である。これを可能ならしめるには、ただ単に、マニュアル的な細かい設計の手順、構造細目などを記述した仕様規定型の設計基準ではなく、設計技術者が固定観念にとらわれずに、創意工夫を行えるような知的好奇心を駆り立てさせる体系と表現内容が望ましい。詳細な解析や検討手法を採用すれば安全係数（構造物係数）を小さくすることができ、経済的な設計が可能となることを明らかにすべきである。

そのような意味で性能規定型の設計体系に移行することは時宜を得たものと言えよう。

8.4 今後の課題と対処方策

本節では、これまでに記述してきた地震災害軽減に向けて広義の「耐震設計」すなわち「耐震性能評価・向上技術」にむけて、あるべき姿や目標を、急激に変化するわが国の社会・経済情勢のもとでどのように実現して行くべきかについて次の6つの要因に着目して考えてみたい。

- ① 地震災害軽減に向けての社会的合意形成
- ② 広義の「耐震設計」に考慮すべき想定地震とその強さの合理的な設定
- ③ 耐震補強対策事業の合理的な推進
- ④ 耐震性能評価に着目した狭義の「耐震設計」の信頼性向上
- ⑤ 断層運動への対処

⑥ 技術力・品質の向上

以下の各項にこれらの課題と対処の考え方の概要をまとめる。

8.4.1 耐震安全性および震後機能の確保水準に関する社会的合意形成

耐震安全性の水準および震後機能の確保水準に関する社会的合意形成を達成するには、国民に経済的な負担増を新たに求め、自己責任を実践して行くことを期待するものであるから、行政は、正しい情報を適切に開示するとともに責任の所在を明確にする必要がある。この情報には構造物の重要度、更新の難度、供用期間などに加えて、現状の耐震性評価、資産価値、想定する地震動の大きさとそれを受けた時の機能の発揮状況、損害（直接、間接）額や救急・救援、消火活動などの人命に及ぼす影響の度合い、そして、それらと耐震性向上に要する費用との比較や事業実施計画などが含まれることになる。

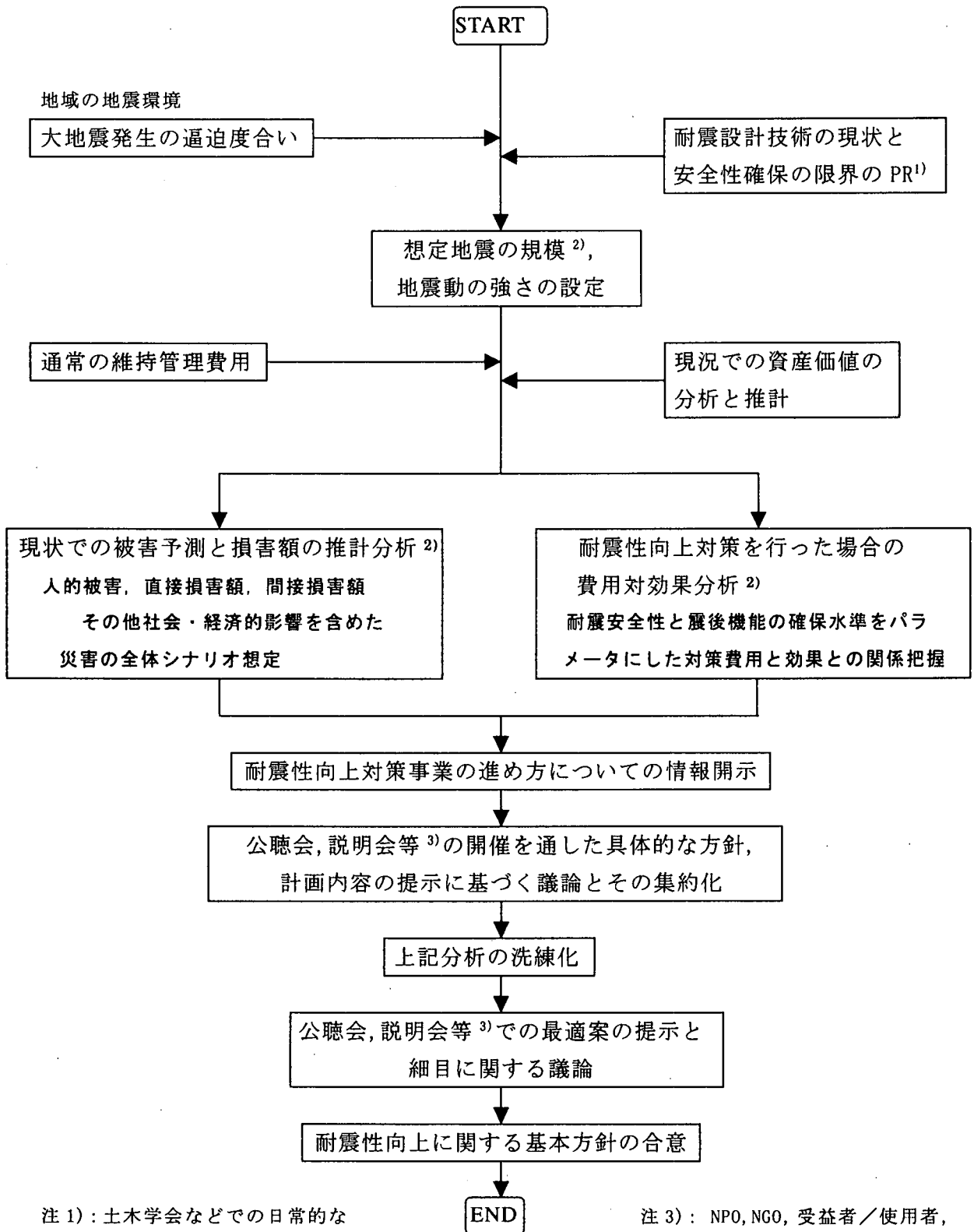
合意形成を進める上で必要と考えられる各種の施策や方策とその実施のプロセスを図-8.4.1に示す。

図-8.4.1に示した合意形成へのプロセスを達成する上での要点はつぎの通りである。まず、社会一般への耐震設計の意義と技術の現状についての理解を促すことが必要である。その地域の地震環境などの情報についてもわかりやすく話題提供することも有益であろう。

大切なのは、現状での災害予測～リスクを誤解が生じないように正確に公開することである。これまでは、いたずらに社会一般を不安に陥れることを恐れて、管理者が把握している知見や情報をつまびらかにはして来なかったのが実情であろう。わが国の固有の文化や社会習慣を配慮したとしても、管理者や企業者がこのような対応を積極的にとることが必要と考える。先の国会で制定された「情報公開法」の具体的な効果がどのように発揮されるか興味の待たれるところである。

一方で、マスコミの報道姿勢にも改善の余地がある。ややもすれば、災害報道では生じた被害の原因の合理的な追求よりも組織や個人の責任の所在を明らかにしたがる傾向が強いように感じられる。地震という不確定な現象に対して設計時点である一定の技術的判断（地震の際の挙動予測、安全性の評価）に基づく結果として、施工され、供用されている‘もの’には安全性の限界が常に存在する。報道記者の多くはこのような事実をよく理解していないか、あるいは知ろうとしないかのどちらかの範疇に入るのではあるまいか？先年アメリカ西海岸で発生したロムプリータ地震やノースリッジ地震の際のサンフランシスコやロサンゼルスで発行された新聞記事では、鉄筋コンクリート橋脚の被災のメカニズムが専門技術の観点からわかりやすく図を用いて解説されていたことが印象的であった。よく判らない現象の発生に対してどのように原因を推定して、同じような被害を再び生じさせないようにするにはどうしたらよいのか？という姿勢に基づく冷静で客観的な報道が望まれるのである。

阪神・淡路大震災の教訓を生かすためには都市や地域全体の耐震性の向上を迅速に進めなければならない。当然、膨大な財源が必要となるので、確保すべき安全性の水準についての社会的合意形成が求められることになる。その根本として、どれだけ危ない状況で日々の生活を送っているのかについての社会的な共通認識を持つようにすることが不可欠である。ある地域や路線の中で、どのような箇所で、どのような被害が、どの位の件数で生じ、人命に及ぼす影響がどの程度か？機能支障の程度がどのようになるのか？などといった



注 1) : 土木学会などでの日常的な
情報発進が必要

注 2) : 学識経験者、専門家、管理者、
受益者／使用者の代表者等
からなる委員会で検討・審議
することが必要

注 3) : NPO, NGO, 受益者／使用者、
社会的弱者など各界各層から
の参画を要請

図－8.4.1 耐震性向上に関する社会的合意形成までのプロセス

状況がシナリオ的かつビジュアルに想定できるような情報を公開しなければ意味がない。

次の段階では、現状で何も対策を講じない場合(Without)の損失の大きさと耐震性向上対策を施した場合(With)に耐震安全性そして震後機能の確保水準をパラメータにした費用に対する便益効果の感度を把握すること(Cost & Benefit Analysis : CBA)が重要である。確保水準の程度が合意形成を求めるための代替案となる。この費用の財源には最終的には納税額の増額や使用料金値上げなどの受益者負担となるが、この負担がどの程度家計に響くかが究極の問題となる。

この際、対費用効果の推計を合理的なものとするには、供用中の各種構造物の資産価値を推計する必要がある。税法上の減価償却期間を過ぎていても現在の果たしている社会的役割を何らかの経済学的手法で金額に換算しなければならない。上述した東京の日本橋のように竣工後およそ 90 年も経過して今日もなお重要な道路交通機能を果たしているものの価値を考えなくては防災投資という概念がそもそも成り立たない。

また、目安として当該施設全体の資産に対する耐震性向上対策の費用がどの位になるのか、現行の維持管理や予防保全的な対策に使われる費用との相対的な比率がどのようなものになるのかといったことを公開することも有意義と思われる。

このような進め方を実のあるものにするには、国民各層すなわち納税者、受益者からの意見を幅広く受け容れ、活発な議論することが前提となる。安全は‘ただ(無償)’では得られないこと、その負担に対し、自らのリスクに対する判断が必要なことのコンセンサスが求められるのである。

このようなプロセスで耐震性向上対策事業を推進している興味深い事例⁸⁾を紹介しよう。米国カリフォルニア州サンフランシスコ湾東部沿岸地域の水道企業体(EBMUD⁹⁾ : East Bay Municipal Utility District)で行われている耐震補強プロジェクトである。

供給人口約 120 万人を抱えるこの企業体は、近い将来マグニチュード 7 級の直下型地震の発生に備え、供用中の各種施設に対して詳細な耐震性の調査・診断を実施した。その結果にもとづいて、現状のままではどのような被災が生じるのかをビジュアルに表現した被害想定シナリオを利用者である住民、企業に公開した。あわせて最低限の緊急対応の他に 4 段階の耐震性向上計画の内容とコストを提示し、利用者と地震直後の消火活動への影響および飲料水供給の程度を含む議論を徹底して行う機会を設けたのである。そして全体として 189 百万ドル、日本円にしておよそ 210 億円の事業規模を決定し、1994 年から 2005 年の完成に向けて事業を開始した。この費用は今後 30 年間に平均的な利用者が年間一人あたり約 20 ドル、日本円にしておよそ 2,200 円の負担になる。これらの事業内容は関連する市当局、都市計画委員会、住民団体、企業団体、ロータリークラブなどの地域活動団体、退職者団体や生活弱者団体などに教育・広報活動を通して周知が図られたようである。

このプロジェクトの推進は、サンフランシスコ湾岸地域で最大マグニチュード 7 級の大地震を引き起こす原因となる活断層が北西～南東方向に数条にわたって分布し、それが近い将来に発生する可能性が高いこと、そして一旦、大地震が発生すれば大規模な都市型災害となるという社会的な認識が行き渡っていることが前提となっている。いわば大地震の発生を確定論的に考えた耐震性向上対策事業と言えよう。

これに対し、大地震の発生時期についての逼迫度合いがよくわかっていない場合には、どのような対処が考えられるのであろうか？リスクの概念を導入し、災害のリスクについ

ての情報の開示とそのリスクの低減に要する耐震性向上対策に必要な費用との関係を地域住民に適切に説明することによって社会的に許容しうるリスク (Acceptable Risk) の合意形成を図ることが可能になるものと思われる。

このような概念は、われわれにとって暗黙知として自らの行動や判断の意思決定のベースになっている。例えば、飛行機に搭乗するとき、雨が降るかもしれない空模様で外出するときなど、自分でリスクを評価し行動している。大地震で生じる災害についても同様な類推は可能で、濱田政則は新幹線の直下型地震による脱線の可能性を引用してリスクと便益との比較から、許容しうるリスクについてある種の社会的合意が形成されているものと指摘¹⁰⁾している。今後、この種の研究の成果が地震災害軽減の対策事業に反映されることを期待したい。

8.4.2 被害想定および耐震性向上対策に想定する地震動の大きさについて

国の地震防災対策の基本となる方針は国の「防災基本計画」(平成7年7月改訂)に示されているが、土木学会「第二次提言」と同じ趣旨で二段階の強さの地震動(レベル-1, レベル-2)を想定し、それぞれに対して確保すべき耐震性能の内容を規定している。重要な点はきわめて稀にしか生じないとしているレベル-2 地震動(海洋底のプレート境界もしくは内陸の活断層で生じる大地震により引き起こされる対象地点の地震動)の性格である。すなわち、①想定する地震として、当該地域の地体構造から想定しうる最大級の地震で、それを上回るものはないとするのか、それとも、②それを超える確率を見込むべきものとするのかという問題である。これについては、特に内陸の活断層による大地震による地震動が対象となる。これには地震そのものの規模の想定と地震動の予測精度という二つの問題が含まれる。

①の考えは原子力発電所の耐震設計で考慮されているものである。一般の社会基盤整備の対象となる公共構造物や建築物にあっては、安全性と経済性とのトレードオフの関係で所要の耐震性能を総合的な判断により定めざるを得ない。したがって、②の考えを採用することになる。この、①と②の相違は、構造物が被災して、その機能に支障をきたし、人命や社会環境、自然環境にどのくらいの範囲で、どのくらいの時間(次世代、三世代)わたって影響を及ぼすのか?によるものである。設計で考慮したよりも強い地震動を受けた場合でも、人命に影響を及ぼすような壊滅的な被災を生じさせない知恵と工夫を如何にして発揮するかが大事なポイントである。

われわれ土木技術者にとってもう一つ重要な点は地震学の、特に活断層の活動の可能性に関する評価である。新聞等のマスコミの報道は調査・研究の成果が、ただちに地震防災上有益な情報であるかのようなイメージを与えるものが多いように見受けられる。発表される数値自体の持つ意味を良く理解しなければならない。地震学は地球を対象に扱う科学であり、時間の概念が工学で扱うオーダーに比べ、桁外れに長いこと、そして数値のもつ有意性、つまり有効数字は高々一桁なのである。一方、耐震設計や耐震性向上対策などは社会的な行為であり、重要な安全性の評価を行うには、有効数字を比べてもその前提となる地震動の推定に一定水準以上の確かさが必要となる。このような背景を地域住民に理解させることも実際の事業に従事する設計技術者にとって、これから必要な達成目標の一つになるものと考えられる。

活断層の調査結果に基づいて、具体の工学的な意思決定を行うには、地震学の調査研究の成果を掘り下げ、より詳細、精密な地質学的、地体構造に関する地球物理学的、地殻変動などの測地学的な調査を行って信頼性が高い情報を得た上で、想定する地震の規模や地震動の特性を定める必要がある。地震防災や耐震設計に関わる技術者にとって、地震予知に関する工学的な次元での信頼性の問題も含めて理学 (Science) と工学 (Engineering & Technology) の相違を理解することが重要と思われる。

8.4.3 地震災害軽減のための迅速な耐震補強事業の展開

耐震補強は上述した構造システムや施設の構成システムに着目して構造的、機能的に重要度を適切に評価した事業計画を定めて行う必要がある。現在、行われている道路橋の耐震補強では橋脚、支承、落橋防止システム等を対象にしているが、重要なことは橋全体系としての挙動を評価し、どの構成要素(部分)が安全性に最も影響が大きいかをレビューすることである。この他の施設、例えば上・下水道などのライフライン施設の耐震補強についても同様なことが言える。予算執行上の問題はあるかもしれないが、単に、機械的に業務発注を進めることは新たな「安全神話」を作り出すことに手を貸すことになりかねない。管理者は無駄の無い合理的な補強事業の進捗を図るために、技術的につめた計画の策定を行う必要がある。耐震診断や補強設計業務の発注に当たってプロポーザル方式を積極的に採用することも有効な手立てと考えられる。

また、限られた予算を効率的に活用するためには、対象とする施設を構成するシステムの特性に着目した効果的な耐震性向上対策を講じることが基本である。システムを構成する各要素の重要度の合理的な評価方法の確立が大きな課題である。例えば、道路橋などでは橋は道路の一部を構成するものであるから、道路網として地震直後の状態を想定して、通行機能の支障による救急・消火や救援、復旧活動への影響の程度を考慮した地震防災上の重要度の評価方法が提案¹¹⁾されている。上水道管路やガス導管などではネットワークとしての地震後の供給信頼性解析結果を震後対策の評価に反映している¹²⁾。上述した米国のEBMUDでは、水道管路のネットワークの現状評価に基づいて、緊急時にバックアップを果たすため、管轄区域の南東縁部に新たなループを形成する管路を耐震性向上対策事業の一環として敷設することとしている⁸⁾。

これまでは管理者や企業者がそれぞれ単独に地震防災上の重要度の評価、設定を行ってきた。大都市のように都市機能は多くの公共施設、例えば、

- ① 道路、鉄道などの交通・運輸関連施設
- ② 電力、ガス、上水道、電信電話などの生活関連資源や情報の供給施設
- ③ 廃棄物、下水道などの処理施設
- ④ 警察、消防、病院、自衛隊などの人命や都市機能の安全確保を任務とする施設

などによって支えられているのが実態である。

地震災害の軽減対策を適切に講じるためには、これらの多様な施設を被災の波及もしくは連鎖効果という共通の視点で重要度の評価を行うべきであろう。柳田邦男は阪神・淡路大震災の状況から次のような鋭い指摘¹³⁾をしている。

「交通機関の被害は、大惨事になる上に、時宜の救援活動にも支障を来すものであるから、耐震性の確保は通常のビル（や構造物）以上に厳格にすべきであるにもかかわらず、

そうなのではないなかったことが今度の災害で露呈された。」

このような批判に応えるには、いわば施設の管理者の縦割りの慣行を排して、大地震が生じた後の被害状況のシナリオに基づいて一元的に、社会システム全体を見通した重要度の評価を図る必要がある。土木学会、建築学会などが指導的な役割を担い、具体的方法論の検討とその成果に基づく重要度の試案を広く提示し、社会的な合意形成を速やかに達成することが望ましい。

8.4.4 仮想現実(Virtual Reality)から脱却した高い精度の耐震設計の確立

耐震設計の信頼性を高めるためには、

- ① 実際の地震を受けた際の建造物の応答挙動を定量的に把握すること
- ② 既往の震害の状況からそれらの原因を的確に把握し、設計に反映させること

が前提となる。

①については、実際に地震動および建造物の応答を観測して、基礎や周辺の地盤を含む構造システムの動的挙動の実態を把握することが不可欠である。従来から、各種建造物に対して強震観測が行われてきたが、基礎や地盤内の工学的基盤を含む建造物全体系の挙動の観測を実施しているものは極めて少ないのが実状である。これでは耐震設計法の根拠や前提を検証するには不十分であり、如何に建造物や地盤の動的解析法が高度化、精緻化されても耐震設計法の精度向上には役立たない。建築物に対する地震応答観測の蓄積と比べると明らかに見劣りするの否めない。耐震設計を **Virtual Reality** の次元から実際の現象に即した真の **Reality** の次元に引き戻すために、早急に国を挙げて実際の周辺地盤を含む各種の建造物に対する地震観測を推進すべきである。このような観測の実施は建造物の地震後の健全度評価に役立つのはもちろん維持管理～予防保全の観点からも有効であり、付加価値の高い事業として積極的に優先度の高い施策として事業化を進める必要がある。

しかしながら、この種の観測は息の長いものであり、有用な情報を得るには、大地震の発生を待たなければならないという効率の極めて低いものである。したがって、それを補うために、大規模な振動実験を系統的に行うことによって建造物の損傷から破壊までの挙動を把握する試みも重要である。科学技術庁では、現在、兵庫県三木市に世界で最大級の三次元振動台を建設中であり、その積極的な活用方が望まれる。同庁では、研究振興調整費による科学技術全般にわたる研究テーマを広く公募しており、平成10年度には、土木学会が主体となって作成した研究計画のプロポーザルが採択された。「建造物の破壊過程解明にもとづく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」と銘打たれたこのプロジェクトでは、平成11年度から5ヶ年間を目途に総額およそ15億円の予算が想定されており、建築物を含む各種建造物の破壊機構の解明を目的にさまざまなタイプの実験研究が国内の官学民の主要研究機関で精力的に行われるとのことである。これらの成果を大いに期待したい。

耐震設計技術としての個々の取組むべき課題については、既にこのテキストの前章迄にまとめられているので、ここでは敢えて詳しく触れないが、重要なものとして、設計地震動の合理的な設定、液状化に伴う地盤の流動が建造物に及ぼす影響、盛土や擁壁などの抗土圧建造物に適用する耐震設計の考え方、免震・制震システムの設計法などが挙げられよう

- ②の「既往の震害の状況からそれらの原因を的確に把握し、設計に反映させること」に

については、従来の地震被害調査結果の活用や原因究明の方法論にも再考の余地がある。これまででは、限られた時間の中で調査報告書を作成すること自体が目的化され、被害の典型的事例に着目した検討に重点が置かれ過ぎた感が否めない。被害の報告が目的の資料は、とりあえず速報として刊行し、被害の分析・考察に関わる内容については、その後、一定の期間を置いて、公刊するという方式も考えらよう。

被害の全体像を把握しようとするには、被害や軽微な被害を受けたものも含めた整理分析を行って、関連する要因を抽出し総合的な被害像を浮かび上がらせるアプローチが重要である。このような観点から阿部ら¹⁴⁾が兵庫県南部地震の際の阪神高速道路神戸線を対象に行った分析結果が参考になろう。GISを活用した高田ら¹⁵⁾の成果も注目される。磯山、石田ら¹⁶⁾はGISを用いた兵庫県南部地震における水道管路の挙動の分析結果に基づき、水道管路の地震被害予測式を提案している。これからの地震防災計画の策定の前提となる被害予測に有効な手段を提供するものと考えられる。

8.4.5 断層運動への対処について

最新の地震学や地質学の知見、活断層のトレンチ調査の結果などから、総合的に近い将来、大地震の発生の際に断層運動が生じる可能性が高いものと判断された場合の構造物の耐震対策は、社会的にも技術的にもきわめて重要な課題である。幸運にも、兵庫県南部地震の際には断層運動はほとんど土木構造物に影響を及ぼさなかった。唯一、桁架設中であった明石海峡大橋の主径間部の海底に、橋軸と斜めの北東～南西方向に断層に沿った横方向の‘ずれ変位’が生じた。淡路島側の主塔を支える3Pとアンカレイジ4A剛体基礎が正規の位置から南西方向に1m強移動し、主塔間のスパンが1m程度広がったが、設計変更を要する不具合には至らなかった。

地震の際の断層運動が構造物に与える影響は、この断層が構造物を横切る場合に生じる。構造物は断層両側の地盤の相対的な発生変位の差(differential displacement)、すなわち、‘ずれ変位’の発生によって大きなせん断力の作用を受けることになる。

断層運動に備える対策の基本的な考え方を図-8.4.2に示す。対象となる構造物がこれから建設され、長い間にわたって供用されるのか、あるいは現在すでに利用に供されているのかによって、選択が異なってくる。新設の場合は計画自体を断層運動の影響の無いと考えられる地点にまで迂回させることはできるか、そして既設の、現在供用中のものについては切り回し移設ができるかどうか重要なポイントとなろう。これらが不可能か、きわめて難しい場合には、断層を横切る地点での耐震対策を検討する。対策の原理は‘ずれ変位’に力で対抗することは不可能であるから、それを可撓性構造の継手により吸収することにある。

当該地点の状況や構造物の常時に要求される機能により、どうしても耐震対策の実施が困難な場合、遠隔操作による早期異常検知装置を活用して、できるだけ被害の拡大を防ぎ、災害軽減に最善を尽くすとともに、震後対応を迅速に図るよう努める必要がある。

上述した断層近傍での各種構造物の耐震対策に有効と考えられる内容～方策の考え方を表-8.4.1に示す。このうち、実績としては、わが国では、JR山陽新幹線新神戸駅のプラットホームの立体ラーメン構造部分に用いられた可撓性継手構造、ニュージーランド南

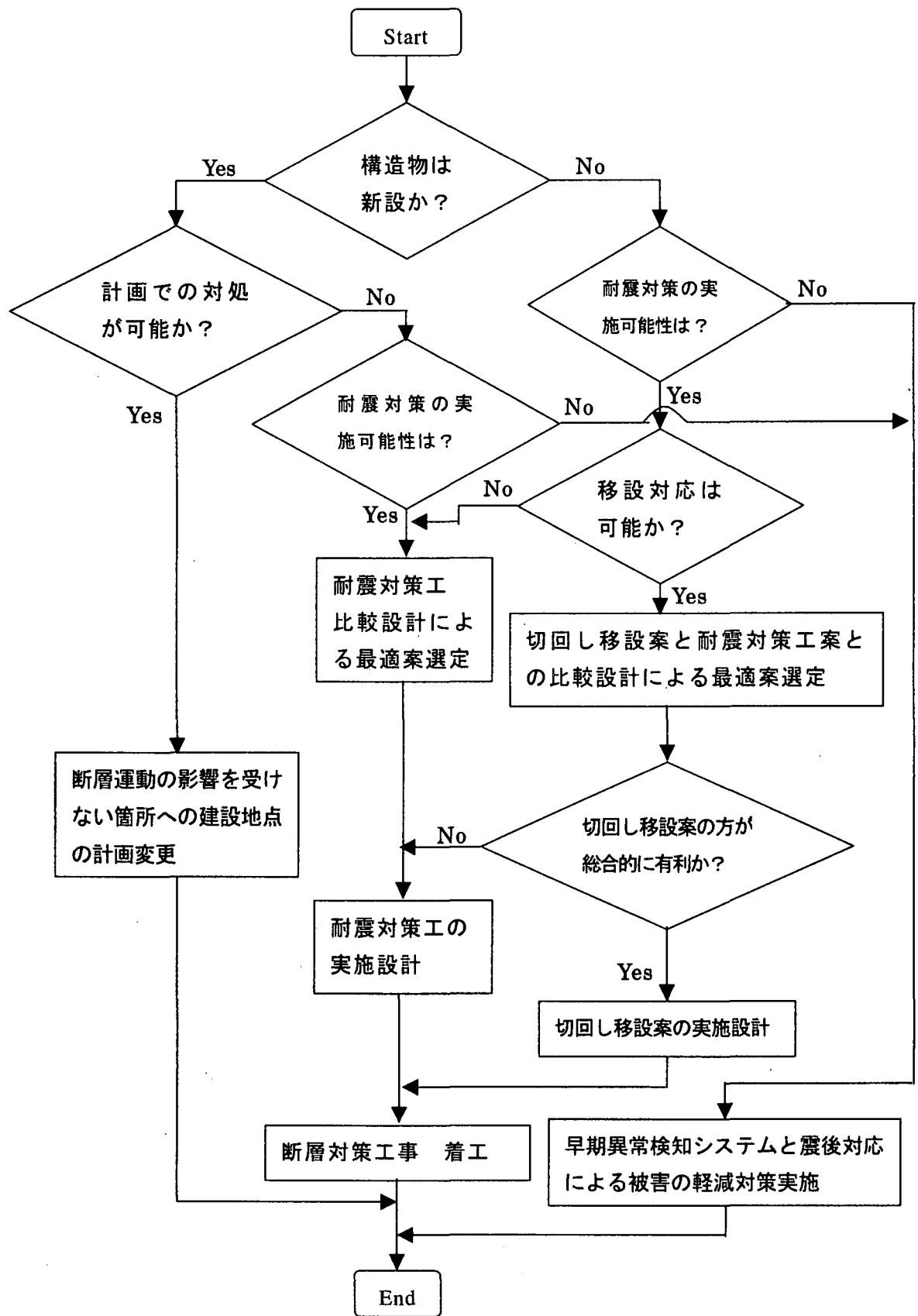


図-8.4.2 断層運動の対策の考え方

島のアレキサンドラ近郊のクライド ダム（コンクリート重力式）の本体内に、鉛直方向に設けられた可撓性継手構造などがある。

水道管路の事例として、前述した米国カリフォルニア州の水道企業体 EBMUD で実施した断層対策の事例を図-8.4.3⁸⁾、8.4.4⁸⁾に示す。断層を横切る個所では断層の両側の地盤にそれぞれ遠隔装置で作動する緊急遮断弁を設置し、本管が破断した場合にはそれと平行して数条、敷設しておいた緊急対策用の枝管を機能させ、水量損失を最小限に抑えることを意図している。

表-8.4.1 活断層横断箇所における耐震性向上対策の考え方の一例

[対策の基本原則：断層運動によって生じる‘ずれ変位’の吸収]

	新 設	既 設	備 考
単一施設	可撓性継手構造の採用	同左？	ダム，駅舎等での実例あり
地上線状 構造物； 〔道路・鉄 道〕	土工の採用が原則。不可の場合 橋・高架；長径間化 or 小径間単純桁の 連続採用	早期異常発生検 知システムによ る対応が主体 か？	橋・高架の場 合，桁と橋脚 を剛結とする ことは不適切
地中 構造物	〔道路・鉄道トンネル，共同溝など〕 断層をはさむ両側に遠隔装置に より作動する&可撓性継手(単独 or 複数直列)を配置	同上	
	〔水道・ガス管路〕 断層をはさむ両側地盤内に遠隔装置 により作動する緊急遮断弁&大変位 吸収継輪もしくは可撓性継手の設置 (管自体の長さに余裕を持たせるこ とも可)	〔水道・ガス管路〕 断層をはさむ両 側に緊急遮断弁 の設置&バイパ ス枝管の複数並 列敷設	既設につい ては実績あり (EBMUD)

注：この表の内容はあくまでも概念～原理的なものであり、今後の技術開発によって斬新かつ画期的な工法が実用に供されるようになることも考えられる。

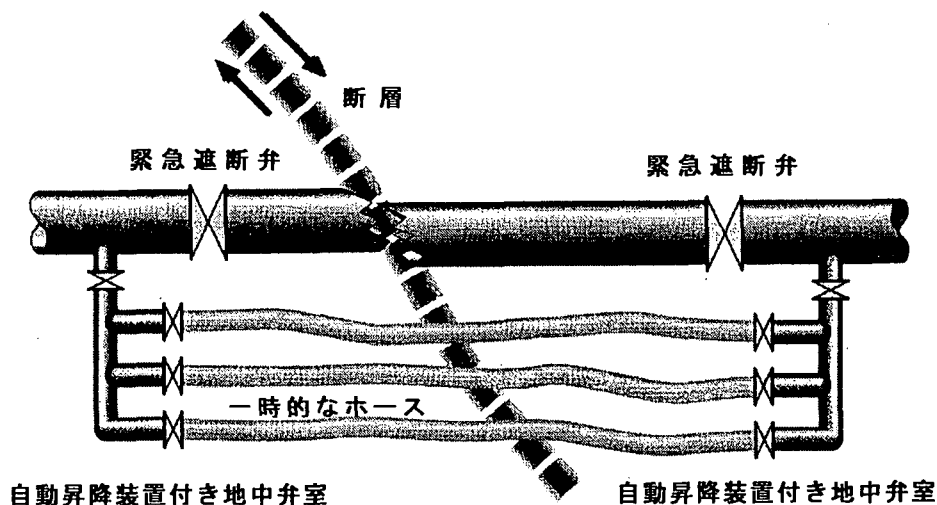


図-8.4.3 EBMUDにおける水道管路の断層横断箇所における耐震対策⁸⁾

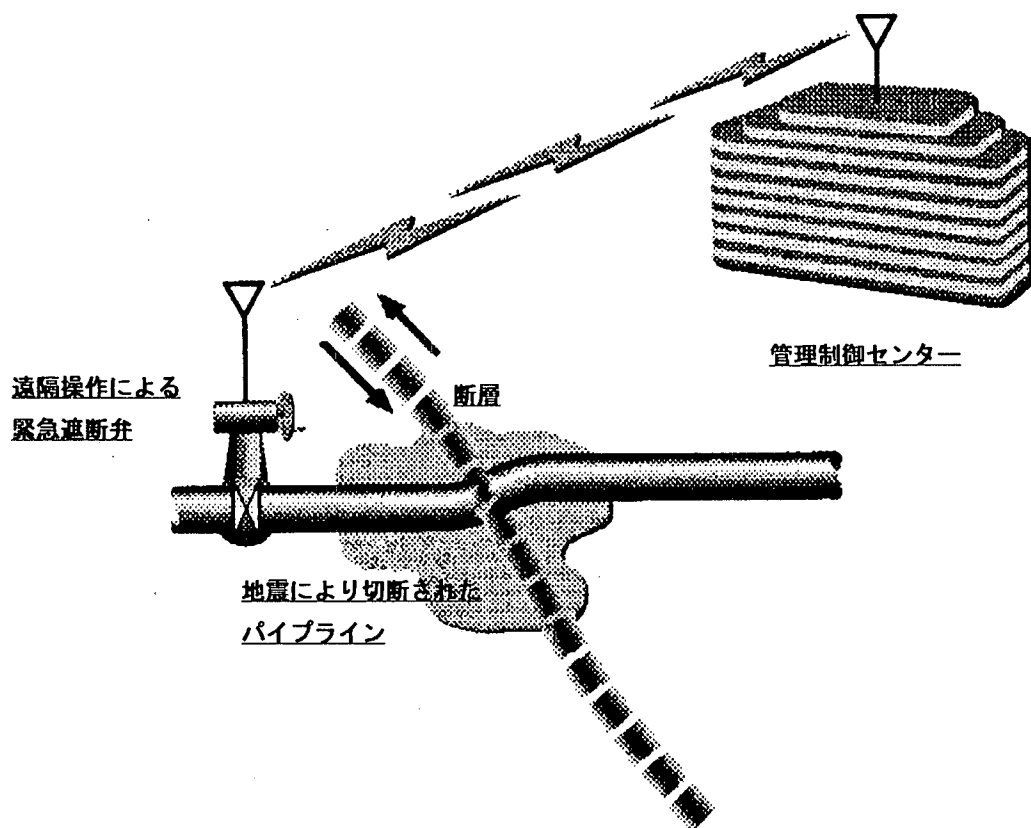


図-8.4.4 遠隔装置による緊急遮断弁の制御⁸⁾

8.4.6 技術力・品質の向上について

耐震設計が高度化して行くことは上述した精度向上を目指した研究の進展を取り入れる以上、必然の流れである。これからは設計技術者の高い能力と豊かな経験に根ざした主体的かつ合理的な工学的判断が極めて重要な意義を持つようになるものと思われる。情報化の著しい進展のもとで、自らの日々の研鑽が耐震設計の品質を決定する大きな要因となることを自覚することが大切である。企業側としても単に情報化投資を進めるばかりでなく、設計技術者に対する定期的な教育・研修の実施や ISO9001 などの確実な運用などによる品質の確保に努めるべきである。

技術者個人へのインセンティブの一つとしてわが国の国家資格の一つである技術士の専門科目に「耐震・地震防災」を設けることが有意義と考えられた。土木学会では学会内に設けられた「阪神・淡路大震災対応技術特別研究委員会」からの提言を受けて、1997年3月に日本建築学会と協同して両学会長名で技術士制度を所掌する科学技術庁長官あてにその旨の要望書を提出した。遺憾ながら先の国会での技術士法改正の過程の中では、考慮されなかったようである。地震災害軽減への意義を考えると上述した「地震災害アセスメント制度」の施行と関連させて耐震性評価・向上技術に関わる公的資格の新たな導入が望まれ

る。

この他に重要な課題として、発注者側の技術者(In-house Engineer)の技術力育成・向上が挙げられる。現在では公共事業の設計は建設コンサルタンツ企業に発注されるが、発注機関によっては技術検討や設計成果そのものに対する適切かつ迅速な評価・判断が必ずしも十分に為されない場合も少なくないように見受けられる。公共事業に対する合理的な執行が期待されている昨今の状況も考えると耐震設計技術の高度化に対処しうる技術的に核となる要員の育成と教育・研修制度の整備も必要と考える。

2001年に予定されている中央省庁再編といった行政改革,そして地方も含めた多額の公共財政赤字という厳しい情勢の中で,規制緩和や経済的効率性を追求して,社会資本整備に民間資本を導入するアイデアも提案されている。しかしながら,わが国の厳しい自然環境の下で,安全で安心できる社会を築き上げ,適切に維持管理して行くには,少なくとも管理者である発注機関には技術的に核となる精鋭の専門家を擁して,管理～発注者責任を果たして行かなければならない。いずれにせよ,少子・高齢社会の到来,高度情報化の著しい進展,経済の国際化の影響による産業構造の急激な変化という様々な社会情勢の転換期に当たって,新たな視点から In-house Engineer の育成のあり方についても議論すべきではないだろうか。

8.5 おわりに

阪神・淡路大震災の深刻かつ重大な事態をわれわれ技術者は風化させてはならず,きちんと後世に伝える責務があることを忘れてはならない。現在,関係機関で進められている,耐震設計の高度化や性能規定化への動きおよび耐震補強事業の重要なことは,兵庫県南部地震以前の社会状況と比べると,特に発注者や設計技術者の対応にいわばコペルニクスの転回を迫るものである。このためには行政組織や企業の努力に加えて設計に携わる技術者個人が自らの研鑽に主体的に取り組むことが必要である。

最近の公共事業のあり方や構造物の耐震安全性に対する社会的関心の高まりの中で,社会資本の整備,維持・更新に参画する設計技術者の使命は最終的には国民のためにあるということを認識する必要がある。国民の安全の確保と安心できる社会の整備のために,設計技術者は,自らが専門職業人としての高い倫理観と誇りを持って耐震設計の新たな展開に対して積極的に取り組むこと,そして,これまでの,ややもすると指示されたことに対処する体質から,積極的に問題を指摘し,解決して行く責任ある信頼される存在となるように自らの意識と発想の転換を図ることが求められている。

また,阪神・淡路大震災の教訓を地震災害の軽減に生かすためには,耐震技術や各種施設や構造物の耐震性の現状について,管理者や企業者が社会一般にわかりやすい情報の開示を行って,耐震診断や補強の重要性と実施の意義の理解,さらには地震災害軽減のための適正な投資水準に関する社会的な合意形成が得られるように努力することが大切である。

これらの達成には地震災害アセスメントの制度化などの社会システムの整備が必要であり,必要な財源の確保方策と併せて,それらを推進する方法や仕組みを精力的に官学民が一体となって検討すべきである。

なお,紙面の都合で本章の中では議論として触れることができなかったが,次のテーマも極めて重要な課題として早急に取り組むことが必要と考える。

- 地震動，特に震源域近傍での強さの予測技術の精度向上
- 全国レベルでの活断層や地震地体構造などの統一的なデータにもとづく地震動のハザードマップの作成
- 21 世紀中には生じる確率が高いと考えられている太平洋のプレート境界に発生する M8 級の巨大地震とその余震の発生も考慮した，震源域近傍に位置する地域の耐震設計および補強対策の基本方針の策定

参考文献

- 1) 柳田邦男：この国の失敗の本質，講談社，1998.12
- 2) 広辞苑 岩波書店.
- 3) 渡辺 茂：岩波講座 基礎工学 10 設計論 I.
- 4) 伊藤 学，尾坂 芳夫：土木工学大系 15 設計論，彰国社.
- 5) 中野孝次：いまこそ山河に償いを，中央公論 6 月号，1998.
- 6) 公共事業の説明責任（アカウンタビリティ）向上行動指針，建設省，平成 11 年 2 月.
- 7) 外岡英俊：地震と社会 上 —— 「阪神大震災」記，みすず書房，1997. 11.
- 8) D. M. Diemer：ANTI-SEISMIC MEASURES ON WATER SUPPLY IN CALIFORNIA, Proc. of Water & Earthquake '98 Tokyo, IWSA Internatinal Workshop, 1998. 11.
- 9) <http://www.ebmud.com>.
- 10) 濱田政則：新しい耐震設計，土と基礎，Vol. 47, No. 6 Ser. No. 497, 1999. 6.
- 11) 例えば，佐藤次郎，篠崎之雄，佐伯光昭，磯山龍二：大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法，土木学会論文集 No. 513, 1995. 4.
- 12) 例えば，Isoyama, R., T. Iwata and T. Watanabe：Optimization of Post-Earthquake Restoration of City Gas Systems, Proc. of the Trilateral Seminae-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Nov. 1985.
- 13) 前出 1) と同じ
- 14) 阿部哲子・藤野陽三・阿部雅人：1995 年兵庫県南部地震による高架道路橋被害に関する総合的分析 - 阪神高速神戸線の橋脚被害を中心とした -，土木学会論文集 No. 612, 1999. 1.
- 15) 高田至郎・森川秀典・松本正人・花川和彦：GIS データベースに基づいた橋梁耐震診断法の構築と損傷確率マトリックスの評価，構造工学論文集 Vol. 44A, 土木学会, 1998.
- 16) 磯山龍二・石田栄介・湯根清二・白水 暢：水道管路の地震被害予測に関する研究，水道協会雑誌，第 67 巻，第 2 号(第 761 号)，1998.2.