



4. われわれは何を引き継ぐべきか (1) 21世紀における耐震設計の 技術的課題

佐藤忠信 Tadanobu SATO

正会員 工博 京都大学教授 防災研究所地震災害研究部門

都市直下地震への対応

1995年兵庫県南部地震は人口密度の高い都市域の直下で発生した地震であったので、わが国の耐震設計の思想を大幅に転換した。表-1は濃尾地震以後のわが国で発生した主な地震の被害の特徴を一覧表にしたものである。建物と道路橋の耐震設計法の変遷も同時に示した。大きな地震が発生するたびに地震災害の新しい局面が現れ、それに基づいて耐震設計の見直しが行われてきたこ

とがわかる。兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台で最大 818 cm/sec^2 もの地表面加速度が観測された。これは、周期帯域 $0.3 \sim 1.0$ 秒において、構造物の弾性応答が減衰定数 5% で $2G$ になるような波形であった。このことを考慮して、都市直下で発生するマグニチュード7クラスの地震の震源近傍での地震動強度を耐震設計に反映するための努力が精力的に行われ、各種の耐震設計基準、標準、指針が改定された。兵庫県南部地震を発生させるよ

表1 地震被害の概要と設計基準の変遷

地震名	マグニチュード	発年月日	死者数	建築	道路橋	被害の特徴
濃尾	8.0	1891.10.28	7 273			根尾谷断層の出現、震災予防調査会の発足、地震学・耐震工学のスタート
三陸	7.1	1896.6.15	26 360			津波
関東	7.9	1923.9.1	142 807			RC造の耐震性認識、組積造・煉瓦造被害大、山の手・下町の被害差、震後の火災
		1924		初の耐震基準 $k=0.1$		
北丹後	7.5	1927.3.27	2 925			断層の出現、家屋被害甚大
三陸	8.3	1933.3.3	3 064			津波
		1939			初の耐震基準 $k=0.2$	
鳥取	7.4	1943.9.10	1 083			断層運動による地変、家屋被害甚大
東南海	8.0	1944.12.7	1 060			重工業地帯の被害大、家屋倒壊多し、津波
南海	8.1	1946.12.21	1 443			家屋倒壊多し、津波
福井	7.3	1948.6.28	3 769			都市直下地震・断層の出現、沖積地盤での木造家屋の被害大、震後火災
		1950		建築基準法 $k=0.2$		
十勝沖	8.1	1952.3.4	29			
新潟	7.5	1964.6.16	26			砂地盤の液状化、落橋、石油コンビナートの火災
十勝沖	7.9	1968.5.16	52			鉄筋コンクリート柱のせん断破壊、山崩れ・地すべり、鉄道・道路の被害大
		1972		せん断補強の強化	動的効果の導入 地盤条件の考慮	
伊豆半島沖	6.9	1974.5.9	30			崖崩れ
伊豆大島	7.0	1978.1.14	25			崖崩れ、鉱さい堆積場よりシアン流失
宮城県沖	7.4	1978.6.12	28			ライフラインの被害大、地盤条件による被害差大、都市型地震災害
		1980			変形性能照査 せん断補強の強化	
		1981		所要靱性/保有 体力照査($S=1g$)		
日本海中部	7.7	1983.5.26	104			警報前に津波到来、液状化被害
長野県西部	6.8	1984.9.14	29			大規模山崩れ
		1992			保有体力照査($S=1g$)	
釧路沖	7.8	1993.1.15	2			最大加速度 922 gal の記録
北海道南西沖	7.8	1993.7.12	230			津波被害大
兵庫県南部	7.2	1995.1.17	6 000			都市直下地震、断層の出現、地盤の不整形形成の影響大、都市機能の喪失、港湾施設の被害大、弾性応答スペクトルが $2G$ を超える

うな地震断層活動の再現期間は数百年から数千年になると言われている。仮に再現期間を2千年として構造物の耐用年数を50年とすれば、耐用年数内に兵庫県南部地震のような地震動に遭遇する確率は3%以下であるといえる。したがって、遭遇する確率は低いが極めて強い地震動に対して構造物や施設の耐震性をどのように保証するべきかという問題に対する回答を、地震後の5年間に、何らかの形で出すことができたと言える。こうした活動が一段落した時点で、1999年にはトルコ・コジャエリ地震と台湾・集集地震が発生し、断層運動に基づく地表面変位により構造物に大きな被害が発生した。ところが、わが国の耐震設計法には、断層変位に対処する方法論を具体的に記述したものはほとんどない。20世紀の終わりに、こうした地震が発生し地震被害の異なった様相が出現したことは、21世紀におけるわが国の耐震設計のあり方を考える上で、大きな課題が提示されたといえる。

設計用地震動の設定法

現行の耐震設計の基本は地震荷重に耐えられるように構造物を設計することであるから、地震荷重を合理的に設定するための努力が21世紀にも精力的に進められるであろう。地震学の分野では、地震を発生させる断層の破壊メカニズムを設定できれば、1~2秒以上の周期帯域における地震動のシミュレーションは可能になってきているので、将来の耐震設計では解析的にシミュレートされた地震動を用いて設計が行われるようになるものと考えられる。このためには耐震設計で考慮しなければならない地震断層の場所とその活動度を明らかにするための研究が精力的に行われなければならない。さらに、地震断層の破壊メカニズムを設定するための研究が必要である。アスペリティの分布^{*}や破壊開始点といった断層の破壊メカニズムを規定するパラメータの不確定性を的確に評価できる方法論が提示されなければならない。伝播経路と局所的な地盤構造の不規則性・非線形性をモデル化した場合のモデルの不確定性、モデルを規定する地盤パラメータの不確定性なども、研究されなければならない課題の一つである。地震は地球の動的な物理現象の一つであり、こうした現象をシミュレートする際の不確定性を観測データの集積によって少なくする努力を継続的に行うことも重要である。集積したデータは千年経っても有用だからである。

土木構造物に使える先端技術の開発

自重に耐えることが上部構造物を設計する場合の基本原則であり、構造形式の多様性は自重によって発生する部材応力を少なくする努力から考案されてきた。地震動によって発生する部材応力は常に自重によって発生する

部材応力に付加されていたので、耐震設計は受身の設計理論といえる。この観点に立てば、構造物の自重を減らすことができる新しい構造形式の開発や構造材料の軽量化に関する研究が必要である。コンクリートや鉄から作られている構造部材の靱性能を向上させる努力のみならず、その軽量化に関する研究が必要である。方向性のそろった微細空洞を有する鉄材などのような素材そのものに関する最先端の研究成果を製品化する努力や複合材料を構造部材として利用するための研究が行われなければならない。航空機では自重を減らすことが主命題であるのでこの種の技術開発が進んでいる。こうした領域の最先端技術を土木構造物に利用できる技術へと発展させることも視野に入れておく必要がある。

上部構造物に入力する振動エネルギーを熱エネルギーとして消費できるダンパーの利用技術は耐震設計のみならず、住環境の静穏化技術として現在も使われているが、今後ますます利用されるようになる。地震動の入力エネルギーを遮断できる免振構造をうまく利用すれば、地震力を設計に考慮しなくても良い条件が見つかると考えられるが、さらに能動的に入力地震動のエネルギーを利用することにより、地震力をまったく考慮しなくて良い設計体系が開発される可能性もある。

耐震設計は非正常な地震動が入力する構造系の動的な応答を評価することに帰着されるので、構造物の設計はすべて動的解析によって行われるようになって考えられる。このためには、コンクリートや鉄などから構成される構造部材の力と変形の関係式を規定する構成式の一般化、構造部材を結合する接合部の動的挙動を記述するための汎用モデルの構築などが必要である。斜面や土構造物ならびに地中構造物が地震時にどの程度変形するかを予測するための技術も早急に開発されなければならない。特に、液状化の問題では、液状化の発生過程のみではなく、液状化した後の地盤の変形挙動を説明できる理論を構築し、液状化した地盤の変形過程が地盤内に埋設されている構造物の破壊過程に及ぼす影響を定量的に把握できるようにならなければならない。

人材の育成

地震に対する知識の集積により、地震災害を完全に防止できるようになるのはまだまだ先のことになるであろうから、地震時には構造物にある程度の損傷が発生することを許容する、許容リスクの概念が定着し、リスクレベルに応じて構造物の性能を選択できる性能設計の規範がまもなく一般的に受け入れられるであろう。しかし、近年の都市域への人的・物的集中度は加速度的に高くなってきており、30年も経過すると都市の形態は大きく変化するので、耐震設計の概念そのものを5年ごとに更新する努力が必要であろう。情報化の著しく進展した巨



大都市圏に将来発生するであろう都市直下地震に当てはまるシナリオを書くことができるかどうか、21世紀の耐震設計のあり方を論ずる基本となる。このためには、予想もつかないような地震災害を想像できる能力と、それを説明するための科学的な基礎に裏付けられた説得力のある地震災害シナリオを書ける研究者を育てることが大切である。

また、ここまで具体的な話題にはしなかったが、断層運動の結果として地表面に現れる地盤変位の予測法や対応技術の開発が、21世紀における耐震設計の重要な課題になることは論を待たない。想像力の豊かな若い研究者が問題の解決に精力的に従事してくれることを願っている。

* アスペリティ分布：地震断層面の強く接着している部分の分布で、そこが破壊することにより強い地震動が発生する。

4. われわれは何を引き継ぐべきか

(2) ものが壊れて人を殺す

21世紀になっても問題は変わらない

片山恒雄

Tsuneo KATAYAMA

フェロー会員 Ph.D 科学技術庁・防災科学技術研究所所長

今年2000年ということで、「21世紀になったら」という議論が大流行だが、21世紀になっても太陽が西から上るわけではない。大地震が起これば、神戸やトルコや台湾で経験したように、「もの」が壊れて人を殺すのだ。

私にとっての阪神大震災

あれから何度書いたろうか。あの朝、私は、日米都市防災のワークショップに出席するため、大阪のホテルで寝ていた。程なく震源が神戸市のすぐ近くであるとわかったにもかかわらず、私は、最終的に6千人をこえる人が亡くなる震災になることを想像できなかった。

地震から数カ月間、私は、それまで私が抱いていた、わが国の地震工学、耐震設計に対する過剰な自信に心底嫌気がさしていた。5年経った今でも、あの地震の時までの自分の発言を思い出すと自己嫌悪に陥ってしまう。はっきりとは言えないが、1970年前後を境に、日本の建造物の耐震性は大いに上がりはじめた。しかし、同じ期間に、日本の都市は、その中に古くて弱い建造物を抱えたまま、急激に膨張していた。これらの都市化地域は、本当に強烈な地震の揺れを経験したことがなかった。それなのに、私は、日本の都市は地震に対して十分強くなったと考えていた。

1985年メキシコ地震、1989年ロマプリエタ地震、1994年ノースリッジ地震の被害をどれも直接見る機会があったのに、わが国の地震被害とは無縁と思っていた。

神戸の震災まで、私にとっての地震防災は、東京を中心とした南関東地域、せいぜい東海地震に対する地震防災だった。直下地震は頭の中しかなかった。何万もの建造物を破壊し何千の人命を奪う震災が、まだ日

本のどこに起こっても不思議ではない。これが私にとって最大の教訓であった。

「もの」よりシステムと考えていた

阪神・淡路大震災は都市的震災だったという。都市的震災、ライフライン、ハードな対策、ソフトな対策、こんな言葉を使いだしたのはいつ頃だったろうか。

1978年6月宮城県沖地震が起き、仙台市を中心とした地域のガス、水道、電気など「生命線」の被害が大きく注目された。宮城県沖地震の後、ライフラインという言葉が広く使われるようになり、これに前後して、ハードな対策、ソフトな対策ということが言いだされた。私は、日本の大都市ではシステム的な対策、ソフトな対策のほうが大切な時機がきたと考え、「建造物の耐震からシステムの防災へ」などと言っていた。

私は、都市震災は四つの特徴を持つと思っていた。火災、情報、ライフライン、そして経済的打撃である。阪神・淡路大震災でも、これらのすべてが起こった。しかし、建造物の問題がすっぱりと抜け落ちていた。いつもは立派に見える建造物の中にも大きな被害を受けるものがあるという視点である。直接何千という尊い人命を奪うのは、建造物の崩壊であり、地震後多くの被災者に苦しい生活を強いるのは、システムよりやはり「もの」の被害なのである。ソフトな対策が重要でないとは言わないが、もっとも基本となるのは住宅やビルや工場や橋など「もの」を地震に対して強くすることなのである。

そして今世界最大の震動台をつくる

神戸クラスの地震の時に「ひびも入らない」建造物を