招待論文
INVITED PAPER

土木学会論文集 No. 474／VI-20, pp. 1~10, 1993. 9

招待論文
関東震災の今日的意義を考える
REFLECTION OF THE KANTO EARTHQUAKE 1923

久保慶三郎
Keizaburo KUBO

正会員　工博　東京大学名誉教授
（〒178　東京都練馬区大泉学園町 8-34-8）

Key Words：*earthquake engineering, Kanto Earthquake, arch bridge, seismic demage mitigation, lateral spreading*

1. 関東震災から 70 年

1923 年 9 月 1 日に相模トラフを震源とする M＝7.9 の大地震が東京横浜を含む南関東一帯を揺り動かして，死者 14 万人（大部分は焼死者），全壊 12 万余，焼失家屋約 45 万の人的物的損失が生じ，被額総額は当時の国民総生産の 40％ にも達した．

土木学会は 1924 年 1 月に広井勇博士を委員長とする震害調査委員会を設け，総勢 107 人を動員し，詳細な報告書を 1926 年 8 月に刊行した．調査対象は 6 部に分割され，第 1 部は河川，砂防，港湾，第 2 部は橋梁と建築物，第 3 部は上下水道およびガス，第 4 部は鉄道および軌道，第 5 部が電気関係土木工事で最後が道路である．未曾有の委員会構成で，調査対象も土木工学の全分野を網羅している画期的な調査事業を実施し，3 分冊の震害調査報告にまとめている．調査は綿密に行われ，報告書は微に入り，細にわたって記述されているために，今日でも関東地震震害報告書のデータは地震工学の研究にしばしば引用されている．

わが国では 1948 年の福井地震を最後にして，死者が 1 000 人を越える地震は発生していない．地震学者の河角広博士は過去の地震のデータにもとづいて，関東地震 69 年再来説をたてた．使用した統計は相模灘およびその周辺を震源とする地震以外の地震も含んでいるので，最近の地震学者の研究によると，M＝8 程度の関東地震は今後 100～150 年は発生しないであろうと言われている．もっとも M＝7 程度の地震は南関東地域の陸地部で発生するおそれがあるので，要注意であると地震学者は発表しているが，その震源地は特定できないようである．しかしながら，地震発生の原因である太平洋プレート（東側から関東の下にもぐり込んでいる）およびフィリピンプレート（南から北に移動）はそれぞれ年間 8～10 cm，および 3～6 cm の速度で移動し，伊豆半島および三浦半島を下向きに引きずっており，地殻のひずみは年々蓄積されている．

以上の現実をふまえて，土木工学の専門家は，関東震災を再認識し，また 70 年間の地震工学の進歩と多種多岐にわたる構造物の現実の状態を考慮して，来るべき大災害を極力軽減させなければならないと考える．関東地震の轍（てつ）を踏む事態が万一起るならば，70 年前の教訓は生かされず，調査委員会の大変な努力が一文も報われないことになり，尊い犠牲者の魂も浮かばれない．以下に関東地震以前の土木技術の実情，関東地震を最も悲惨たらしめた火災および，地震から学んだ耐震的橋梁を述べ，70 年間の地震工学の発展を展望する．主として再度 M＝8 の地震の発生した場合の被害予測を都市防災の観点から考えてみたいと思う．

2. 明治から大正へ

1867 年にそれまでの徳川幕府に代わって，明治維新の天皇政治に変革され，欧米各国とのレベル差に驚嘆し，欧米の文化，技術の吸収に国を挙げて邁進した．多くの建設技術も移転されて，洋式建物やレンガ造とともに，鉄道，道路および河川に関する土木技術が輸入され，日本各地に欧米式構造物がさかんに建設された．

1891 年 10 月 28 日に，M＝8.0 の大地震が発生し，愛知岐阜の両県は大被害を受け，死者 7 000 余人，全壊 14 万余であった．この地震で伊勢湾北部から福井県南部の山中に達する大断層が発生し，中でも根尾谷断層は上下に最大 6 m，水平に約 4 m 動いた．この地震の被害を特徴づけたものは，文明開化のシンボルであった煉瓦造の建造物や無筋コンクリートの橋脚は折損，倒壊し，耐震

的配慮のされていなかった欧米技術で建設された構造物は大被害を受け，瓦壊した．

わが国はそれまでにもしばしば大地震に襲われて，多くの犠牲者が出るなど痛い目に会った．濃尾地震に遭遇し，当時の碩学の士は地震学および耐震構造の研究が建設技術に必要不可欠のものであることを悟り，翌年には文部省に震災予防調査会を設置し，その会長には当時の東大の加藤弘之総長を任命した．地震学，建築学および土木工学の第一人者11名を委員とし，地震工学の研究が開始された．土木工学の分野からは古市公威および田辺朔郎の両教授が選ばれている．震災予防調査会は構造の振動解析，静的震度法の提案など，地震工学の進歩に著しい貢献をなした．関東地震の震害調査報告（4巻から成り立っている）が第100号の最後の報告書となり，33年間の活動の幕を閉じ，研究活動は1924年に設立された東京大学地震研究所に受け継がれていく．

静的震度法は震災予防調査会，報告第83号（1915年）の佐野利器博士の論文「耐震家屋構造論」の中で提案されたもので，耐震構造の研究も1923年には1891年当時とは比べようのないくらいに進歩したと思われる．

1例として，丸の内の三菱館はレンガ造であったが耐震的配慮の下に，レンガ積か鉄金具で補強され，施工にも十分注意が払われたため関東地震でも無被害であった．ここで少し当時の土木技術のレベルについて言及したいと思う[2]．まず建設材料では，鉄筋は軟鋼の丸鋼で，許容引張強さは1 050 kg/cm^2，異形鉄筋は輸入品で，ある程度使用されている状態で，ポルトランドセメントも明治8年（1875年）に初生産されて，1919年には生産量が100万tを突破し，その28日圧縮強度は140 kg/cm^{2}以上という規格であった．大正時代のコンクリートは主として，無筋コンクリートであった模様である．鉄道施設も石またはレンガが主であって，大正3年の「鉄筋コンクリート橋梁設計心得」から鉄筋コンクリートが本格的に使用され始めたが，大正7年に水セメント比が強度を左右することを公表した状態で，ミキサーの使用も大正5～6年からと言われている．

水道管も鋳鉄管の径3～24″は国産であるが，これ以上の径は英国製で，関東地震の時は遠心力鉄筋コンクリート管は使用されていなかった（大正14年に初生産）．道路橋について述べると，単純プレートガーダー橋は関東地震の翌年に復興局が設計示方書を制定する以前は，米国の規準と技術によって設計され，架設されていた．鋼トラス橋はポニー形式からプラット形式に移行してゆくのが大正初期で，大正末期ではスパンが10～15 mの鉄筋コンクリートT形梁が米国の規準で製作されていた．

当時の耐震技術については，先に述べたように三菱地所株式会社の建てた3階建のレンガ造が構造と施工に耐震的配慮がなされていたので，無被害であった．東京駅前の丸の内ビルディングも耐震補強の結果1922年の地震よりかなり強い関東地震でも丸ビルの被害は比較的少なかったと報告書に記述されている．丸ビルは迅速，軽量で経済的である点で，米国自慢の建築で，柱は鉄骨造で，柱と鉄筋コンクリート造の梁との接合部にはハンチをつけていない，見た眼には格好のよい建物であった．1922年4月にほぼ完成したが，同年4月26日に2，3の鉄骨造の被害以外はRC造の建築は無被害であった程度の地震で，2，3階にX形の亀裂が入り，煉瓦造の間仕切り壁は大被害をうけ，大きい穴のあいたものもあった．地震後補強工事を実施し，1階の間仕切り壁は筋違い入りの鉄筋コンクリート造とし，柱と梁の接合部は鉄筋コンクリート造のハンチをつけた．補強工事が1923年正月に完成したところに，関東大地震が発生し，再び被害を受けることになったが，山形鋼の筋違いが曲がったり，切損したり，壁に亀裂が入るくらいの被害にとどまった．耐震補強工事がなくていきなり関東大地震に遭遇したら，福井地震（1948年M＝7.1）で柱の圧潰が起こり，崩壊した大和デパート，または米国式設計で建設され，関東大地震で倒壊した7階建の内外ビルまたは柱の圧潰した5階建の東京会館と同じ運命を辿ったと考えられるし，土木学会の報告書[1]にも同じ記述がある．耐震工学上の貴重な経験を丸ノ内ビルディングが与えてくれたことになる．

3. 関東地震と火災

関東大震災を最も特徴づけたものは火災と流言飛語ではないかと思う．震災当時は現在のようなトランジスタラジオのような性能のよいラジオはなかったので，情報は口コミと張り紙によって伝えられたために，誤情報が乱れ飛び，一時は殺害事件まで起こる大変険悪なまた悲惨な事態にまで進んだ．日本人ばなれしていたので，あやうく殺されそうになったと旧制高校の教師の懐旧談もある．岡本舜三および萩原尊礼両博士の体験によると，「江の島が陥没した（実際は1 m余り隆起）」，「地震後三日頃からは，王子製紙の提灯を持っている者は気を付けなさい」，「門の柱に白墨で×印のついている家の井戸には毒が入っている」または「付近の鬼王神社には朝鮮人が既に押し寄せているから，家の中に逃げなさい」とかで，「町内には自警団が組織された」，さらには，「三日目には朝鮮人が攻めて来る，若い者は出ろ，年寄り子供は隠れろ」などのとんでもない情報が口から口へと伝わっていった．口こみによる情報の伝達方法が間違いを起こすことは心理学の簡単な実験でも明らかである．大地震時には皆が平常心を失っている状態で，かつ火災

や銃声がさらに人心を動揺させているので，情報の範囲にとどまらず，過激な行動を誘発し，殺傷事件まで引き起こすに到ったものと考えられる．現今は携帯ラジオの普及で大地震時の情報の収集はかなり改善されているはずであるが，放送を通じて流される情報は市民の要求に合致し，正確な表現のものでないと，関東大震災と類似な事態が起こらないとは言えないのではなかろうか．

関東大震災を最も強く印象づけたものは火災の恐怖であったと思われる．地震の発生と同時に東京だけで，137か所，あるいは150か所ともいわれる地点で火災が発生した．これらの発生した火災のうち，約40か所の火事は延焼し，東京の下町は火の海と化し，濛々たる煙は市民の恐怖心を煽った．火の勢いは旋風を巻き起こし，関東地震によって死者約10万人，行方不明約5万人の犠牲者が出たほか，約45万軒が焼失したわけで，死者，行方不明者のほとんどは火災によるものと言われ，建物の倒壊による死者は全体の1％位と考えられている．

特に焼死者の多かったのは被服廠の跡地といわれ，38 000人が焼死したと報告されている．近くの両国駅周辺の焼死者を合わせると44 000人にのぼり，両地区で関東地震による行方不明者の大半が犠牲になったことになる．萩原尊礼博士の体験によると，震災当時白鬚橋の近くに住んでおられ，一時は風下になり，濛々たる煙と熱風を受けて，避難をされたところ，急に風向きが変って奇跡的に焼失をまぬかれたとのことである．京都大学のI博士は5才の時に下町で関東震災に遭遇され，いよいよ火災の危険が迫ってきたので，被服廠跡まで辿りついたが，既に避難者で一杯で入ることができず，隣にあった安田邸に避難した．火勢が強く，もう駄目かと思ったら，旋風で毛布が舞い降りて来て，邸内に池があったので姉とともに毛布を被って，何とか生き延びたと話しておられた．被服廠跡に避難した人のうちには奇跡的に助かった人もいる．清澄公園に逃げた人はほとんど助かっていると報告され，安田邸とともに池の存在が人命を救ったのではないかと考えられる．

震災当時は東京にも手押ポンプ付きあるいは，釣瓶のある井戸が多数残っていた．河川も現在ほど道路の堀割りになったり，地下管路に変ったりしていないので，消火用水にはかなり利用され，延焼の防止に役立ったと思われる．消防庁の努力で大都市の地下には数多くの貯水槽が設置され，消防隊員がこれらの水で消火に当ることになってはいるが，初期消火はやはり個人の努力に負うところが大きいことを考えると，今後の大都市の火災は1989年のロマプリエタ地震のマリナ地区の実例に近い現象になるのではなかろうか．消防用水は地震による管路の折損で十分活用できずに，海水を水源にする消火艇と長いホースの接続で，ようやく火を消し止めたわけで，消火艇が利用できなかった場合には，火災による損害はさらに拡大したものと考えられる．

東京都も白鬚地区の防災拠点の建設，防火または耐火構造の建設奨励および主要道路の拡幅などにより，火災に強い都市造りを進めてはいる．関東大震災，サンフランシスコの1906年と1989年の経験を生かし，全体のシステムとして，火災に強い都市造りを見直すべきではなかろうか．

表—1　府県別橋梁被害率

府県名	橋梁総数	被害橋梁数	被害率（%）
東　京	1 286	63	5
神奈川	1 253	893	71
千　葉	690	65	8.1
埼　玉	1 312	27	2

4.　地震に弱い橋と強い橋

濃尾地震と同様に，関東地震でも無筋コンクリート造，石造およびレンガ造の橋脚は，耐震設計以前のもので，多くは切損したり，転倒した．鉄筋コンクリート造の橋脚も初めて地震の体験をした．関東南部地区の橋の被害率は表—1に示すように，関東中部のそれより，はるかに高く，地震動もより強かった．このことは木造家屋の倒壊率からも理解できる．すなわち相模川および酒匂川下流地域および房総半島南部では，家屋の倒壊率は50％を越えたのに反し，この地域を除く関東南部および軟弱地盤で形成されている隅田川および荒川流域では10～50％であった．鉄筋コンクリート橋脚の被害も地震動の激しかった地域に多く発生したのは，地震荷重が大きかったことと，地盤の軟弱なことが原因しているものと思われる．破損の形態は曲げ破壊が主たるもので，宮城県地震で多く見られたせん断型の破壊は発生していなかった．

関東地震の橋梁の被害の分析の結果，橋脚の被害率は支持地盤の良否と強い相関関係のあることが明らかになった．東海道線の馬入川橋梁および東北本線の荒川橋梁はそれぞれ橋脚の構造，使用した材料，橋脚の高さがそれほど差がないにも拘らず，地震の被害の形態は異なっていた．すなわち，馬入川橋梁では東京方の被害率は沼津方のそれより大きく，荒川橋梁では赤羽方の値が川口方のそれより大きかった．昭和30年頃に地震の被害原因を究明するために馬入川橋梁地点では常時微動の観測，また荒川橋梁地点では地震動の同時観測を行った結果，被害率の小さかった側の地盤がより良好であることが判明した[10]．荒川橋梁地点での観測した3つの地震による最大加速度を表—2に示す．

表—2　荒川橋梁地点での地震動の最大値（単位はガル）

	地震-1	地震-2	地震-3
赤羽方	12.0	4.7	2.5
川口方	24.0	6.2	3.7

同様な震害特性は1989年のロマプリエタ地震によるサイプレス高架橋の被害でも出現した．本高架橋は2層の高架橋で，地震前に補強対策を実施したが，予算の関係で構造全体の補強はできなくて，桁同志を連結する落橋防止対策のみ施工した．このため柱と梁の接合部に耐震上の弱点が残り，上層の梁を支えている柱脚が転倒し，中層路を走行中の車を圧潰し，67名の命を奪った災害が起こった．60ケの橋脚中，64番から110番まで（ただし96および97番は除く）の柱脚が破壊した．50～63番までの橋脚は亀裂は入ったが転倒には到らなかった．転倒した部分は表層地盤の軟弱な地域に限られていたことは柱状図より明らかで，96および97番は支持地盤中の杭長が他に比して長かったために転倒は免れたが，亀裂の幅は大きく，他の破損部分と同じく修復には耐えられず，撤去された．サイプレスでの，橋脚の倒壊した地盤の悪い地域で地表面の最大加速度値は，震央距離の等しい地域の最大加速度値より大きい値を示していた．米国では強震動の観測が，1932年より開始されて，地震時の地表面および構造物の震動について貴重なデータが蓄積されつつある．これは初代の地震研究所長が米国における招待講演の中で，地震工学研究には強震動の実体を知ることの必要性を強調され，強震用地震計の設置を勧告されたことが契機になって，即刻設置事業が開始されたことによる．1933年のロングビーチ，1940年にはエルセントロで強震記録がとれ，1940年の記録は最大加速度が330ガルで，構造物の耐震設計に用いる動的解析用の入力地震波として，広く使われているので，入力用標準地震波の感を呈している．ちなみにわが国での強震観測は1953年に開始されたが，関係各機関の協力で，現在2 000台以上の強震用地震計が全国に設置され，貴重な記録が得られている．

橋台橋脚のみでなく，橋桁の支承部も欧米技術で設計されていたので，地震によって破損させられた．桁の移動端には，上シューと下シューの間に円壔のローラーが設置されているのみで，過大変形抑止装置はなく，横浜市の豊国橋および万国橋の震害に見られるように，上シューはローラー上をすべってしまい，移動端の機能を果たさなくなった．またローラーの代わりに，揺動できるロッカーが設置された橋では，地震によりロッカーが転倒し，復元力を失った例もあった．

震災後直ちに支承部の改良がはかられ，移動端の支承は，上シューの飛び上がりを阻止するために，爪のついた部材で上シューを抑えるようにするほか，過大の水平変位は生じないような抑止装置が考案された．また回転端は1924年には，上下のシューが同じピンを軸に回転する案が出されて，それまでの形式（ピンを上下より抱く形式）の支承部に対し飛び上がりができない形式とすることになった．この形式のヒンヂ支承は，強震時でもその機能が絶対に守られるものではあったが橋桁の架設時には，高度の製作精度が要求されることと，施工上も容易でないことが判明したために，1925年には現在広く使用されている，ローマスナットで，上下シューの飛び上がりを止める方式に改められた．欧州諸国では現在でも，橋桁を下シューの上に単に列べたローラーで支えている形式の移動支承を見ることができるが，わが国では関東地震の苦い経験から，耐震性の高い支承が1925年には完成されたと考えられる．

関東震災の調査の中で特筆すべきことは，アーチ橋が非常に耐震性にすぐれていることを発見したことではないかと思う．関東地震当時，南関東地域には，日本橋，新常盤橋，新橋駅付近の鉄道の高架橋など，多くの石造またはレンガ造のアーチ橋が存在したが，いずれも桁橋またはトラス橋に比して，震害は著しく軽微なものであった．わが国では既に大正2年（1913年）には四条大橋，七条大橋などのアーチ橋が出現していた．

新常盤橋は無筋コンクリートの3径間のアーチ橋でスパンはそれぞれ約81 m，幅員は18 mで，日本橋本石町と麹町大手町の間に架設されていた．震害は東側スパンで，クラウン付近に対称に2ケ所，スパンの1/5の位置に1ケ所の計3ケ所のクラック，中央および西側のスパンはクラウンにそれぞれ1ケ所でクラックがアーチの下縁に発生した．付近に位置していた日本橋は震害調査報告書では無被害と記述されている．アーチ橋は構造の特性上橋脚に大きい水平反力が作用するので，橋脚の下部工は必然的に水平抵抗力が大きく，安定な構造となっているために，地震時に構造物の被災の原因である水平荷重にも強い特性を保有し，震害率の非常に小さい橋梁形式となっているものと考えられる．地震後復興された隅田川の10の橋梁のうち7橋までがアーチ橋（下路形式も含めて）であったのは，復興局の設計者が上述の震災の教訓を十分に理解した結果と言えるのではないだろうか．

昭和2年に福田武雄博士が設計した新潟市の万代橋にも関東地震の教訓を生かし，景観上も秀れたアーチ橋の形式が採択された．万代橋の設計には地震荷重は考慮されていなかったにもかかわらず，1964年の新潟地震（M＝7.5）では軽微な損傷にとどまり[7]，設計震度0.2で設計された昭和大橋，八千代橋が落橋または橋脚の折損

により使用不能になった．単純ばりの形式の橋梁に比して，万代橋は秀れた耐震性を示し，地震後の救援物資および復旧資材の運搬に大いに貢献した．

アーチ橋の特性は旧ユーゴスラビヤ国のスコピエ市のカーメン・モスト（石橋の意）でも明らかになった．同橋は4～500年前にオスマントルコ時代に建設された石造アーチ橋で，1963年のスコピエ地震で周辺のレンガ造の共産党本部や役所の建物およびアパート式の住宅が壊滅的被害を受けた中で，無被害で，現在も人道橋として市民に親しまれ，使用されている．アーチ橋が耐震的に秀れていることは日本橋の震害調査から発見され，震災後の復興事業に早速応用されたが，新潟地震やスコピエ地震でも，アーチ橋の高い耐震性が検証されたものと考える．

5. 湘南地方の震害と山腹崩壊

地表面の地震動の最大加速度値はデータのほとんどない震源付近を除くと，震央距離が小さくなる，すなわち震源地に近づけば近づくほど大きくなる特性を有している[1]．したがって地下埋設構造物を除く構造物の被害率（被害個数と全数との比）は震源地に近づくほど高くなる．関東地震においても表—1の橋梁の府県別の被害率でも明らかなように，東京よりは神奈川は大変高い値を示しており，特に湘南地方で震害が大きかった．木造家屋の震害については，前節で橋の被害を述べるに際し，付言したが，二宮，平塚，茅ヶ崎，および鵠沼一帯で倒壊率が50％以上であった．これに反し東京での木造家屋の倒壊率は10％以下であったデータを見ても，湘南地方の地震動が如何に激しかったかは明らかである．

家屋や鉄道施設等も湘南地方で大被害を受けたが，山地の崩壊は特に激しかったようである．土木学会の調査報告書によると，酒勾，相模，早，多々，金目の5河川の流域で特に山腹が数多く崩壊し，特に丹沢山塊から流れる酒勾川，相模川の流域で激甚の被害が発生したと記されている．さらに地震の1次被害は9月15日の降雨によって，拡大されたと報告されている．聞くところによると，丹沢山塊方面は山腹の崩壊とともに上がった砂煙りが夥しい数に上ったようであった．しかしながら，砂防あるいは山地崩壊の記録は報告書の1節のみで，記載の頁数も約半頁位にとどまっていて，崩壊地点および地辷りを起こした断面，山腹の地質等の記述は全然なかった．ただし崩壊した土砂による河川への影響については，報告書の第1巻に詳述されている[1]．

山腹の崩壊は人家の少ないところで多く発生するので，詳細な調査が行われることが少ないのであるが，関東地震による山崩れのうち，124名の死傷者を出した根府川駅での災害は最大のものであった．標高838mの聖岳の山腹での崩壊土砂は根府川に沿って，約3kmを急速度で滑り落ち，熱海線（小田原—熱海間）の根府川駅に停車していた下りの列車を，駅もろとも海中に転落せしめた．死者111名，傷者13名の大惨事となり，流出した土量は約26万m^3と報告されている．

山地崩壊の研究は1978年の宮城県沖地震による造成地の崩壊を見るまでもなく，今後は宅造地および崖地の崩落による人家の被害の発生が予想され，震害研究の重要な1分野になると思われる．しかしながら，関東震災の報告書を初めとし，1978年の伊豆大島近海地震（M＝7.0）の斜面の安定に関する日本道路協会の調査報告[12]以外は，斜面の高さ，地滑りの幅，斜面の角度，地震の強さおよび土質に関するデータ等について報告された資料はほとんどないのが現状である．この分野の研究はいわゆる学際領域に属する研究であり，地震工学的知識ばかりでなく，土質力学，地質学および振動学の知識を必要とすることが，従来研究されにくい分野であったことの第1の原因ではないかと考える．次に山地の崩壊は人的損失を伴うことが過去の地震でははなはだ少なかったので，注目されることも少なく，この分野が研究者の研究意欲を掻き立てられなかったことの原因として挙げられると思う．

崖地，斜面の地震時安定の研究は，河川の堰きあげとその決潰による下流への被害を誘発する問題，崩落した土砂が雪氷または河の水を抱き込んで土石流となって村落を埋没させるなどの2次災害の問題などを防止するためにも，重要になってくるし，今後究明されるべきものと考える．また本問題の研究は崩壊したデータの収集分析から始められ，崩壊のメカニズムおよびその数理解析技術の開発，推進を経て，崩壊の予測手法の開発ならびに災害発生防止対策および災害軽減の技術などの研究にまで進んでゆくものと思われる．関東地震ではわずかしか報告されなかった山腹の崩壊も，造成地，崖地へと研究が拡げられ，地震工学研究の1分野にまで成長するのではなかろうか．

6. 震災以後の地震工学

地上構造物の耐震設計法は1915年に震災予防調査会の報告書の中で提案されたことはすでに述べたことである．関東地震を契機にして，静的震度法に基づく耐震設計法が規準化され，「市街地建築物法」は関東地震の翌年に，また「道路構造に関する細則（案）」が3年後に決定された．静的耐震設計の基本的考え方は現在も変わっていないが，水平設計震度k_hはその後の研究成果を採り入れて，地域別，地盤別，構造物の需要度別にk_hを修正するほか，構造物の周期，および延び特性（DUCTILITY）の関数としており，現在世界各国でほぼ共通の規準となっている．延び特性のよい構造物は

耐震性が高いと考え，k_h を小さくしている．耐震的な構造物の条件として，構造物が脆性破壊をしないように特別に配慮している点も注目に値しよう．脆性破壊を起こさせないためには，延びのよい材料を用いること，せん断破壊に対する抵抗力を強くし，曲げ破壊で設計すること，および不静的次数の低い構造物では部材の座屈の発生を防止することが必要条件となる．

地震時に構造物に作用する力は本来動力学的なものである．それを静力学的な力に置換して設計しているので，構造物の周期特性などの諸要素を考慮して，設計震度を規程し，耐震設計法としている．設計手法として次第に合理化されてきてはいるが，地盤まはた構造物の動的挙動は研究者の最も知りたい点である．このために，起振機による強制振動試験，初期変位を与えた後の自由振動試験および実地震による振動観測などの方法がある．実地震の観測により，地震時の挙動を直接知ることができるが，基本物性，とくに任意の振幅で振動する場合の，振動周期，減衰定数を把握しにくいので，この目的のためには，強制振動試験または自由振動試験が必要である．1次のモードの正しい減衰定数は自由振動試験により得られるが，高次のモードの減衰定数は強制振動実験でなければ求められない．

粘性減衰をもつ1自由度系の減衰定数 h は近似的に

$$h=\frac{1}{2\pi}\frac{\Delta W}{W}$$

で与えられる．ここに ΔW はヒステリシスループの面積，W はひずみエネルギーをあらわす．

東京電力株式会社の100万ボルト送電鉄塔（ボルト接合構造で高さは143 m）の実大振動実験が行われ，振幅の小さい間は鋼材の内部減衰に原因すると考えられる減衰定数の特性が示され，h は0.6～0.7％であった．振幅が増加するにつれて，ボルト接合の継手に相対ズレが生じ，摩擦によるエネルギー損失が起こり，上式中の $\Delta W/W$ が振幅とともに大きくなり，h が増加し，最大で5～6％（塔頂の振幅が7 cm）にまで達した．さらに振幅が大きくなると，ボルトで接合されている板の相対変形も増大し，ボルトはボルト穴に衝突し，変形が拘束され，継手の剛性が急増することになり，ΔW の増加分より W のそれがより大きくなるので $\Delta W/W$ は振幅の増加とともに減少してくる．この結果ある振幅より大きな振幅では h は減少を始め，塔頂の振幅が40 cm位で，h は3％前後にまで低下する．この傾向は h が，$\Delta W/W$ に比例するとして，鉄塔をモデル化して求めた理論解でも精度よく説明することができた．このことから，粘性減衰のある系で理論的に求められる h の式は，ボルト接合構造の系にも適用できることが判明した．

強震時の地盤の震動観測については，第4節で述べたように，米国では1932年，日本では1953年から開始され，地震動に関する貴重な知識を得ることができた．これらのデータは1950年代に開発された動的解析の技術とうまく結合され，超高層ビルの地震時挙動を明らかにすることができた．許容応力度法に代わる許容層間変位量の提案，小振幅時は高い剛性を保ち，大振幅時には剛性が低下し，構造物の剛性を弱め，周期を延ばすスリット壁の開発とともに，超高層ビルの建設を地震国においても可能にし，高さ148 mの霞が関ビルが超高層ビルの第1号として1968年に完成した．霞が関ビルの入力波としてはエルセントロ（1940年）およびタフト（1952年）の記録波が用いられ，入力レベルも3段階すなわち，100，200および400ガルで耐震性の検証がなされている．

橋梁や建物などの地上構造物の耐震設計技術と開発研究は日進月歩で進んで行ったが，埋設管等の地下構造物の耐震設計法は1970年の初めまで規準化されることはなかった．規準化された第1号は1972年に制定された石油パイプライン事業法であろう．この規準の考え方は1960年に書かれたG. Housner博士のサンフランシスコ湾を横断する地下鉄道（BART）の耐震安全性に関する報告書で示された[8]．この報告書の中で，地下鉄のトンネルの耐震検討は伝播する地震波動の振幅と波長から求められる地盤のひずみをベースにすべきことが提案され，その振幅と波長は専門家の判断によるべきことが述べられ，結論としてサンフランシスコ湾内の地下鉄道の構造物は十分耐震的であると締めくくられている．1953年に岡本舜三博士[3]が「地震力を考えた構造物設計法」の中で，関東地震による水道管の震害特性を調査した結果を述べられ，水道管の最も被害率の高かったのは隅田川の西側であるのに反し，木造建物のそれは隅田川の東側の軟弱地層の深い地域であったことを指摘された．このことは木造建物と埋設管とでは震害発生のメカニズムが異なるもので，前者の被害率は地表の最大加速度値で決まるが，後者のそれは地表の最大加速度値では決められないことが示唆されており，Housner博士の考え方の源泉になっているのではないかと考える．

1972年の石油パイプライン事業法の中の耐震設計法では，均等厚の地表層および直管を仮定し，入力の5つの波を重ね合わせて応答値を求めている．日本ガス協会は1982年に「ガス導管耐震設計指針」をまとめ，表層厚が直線的に変化する地層，直管以外のベント管，T字管にも適用できるようにすると同時に，許容応力度法に代わる許容ひずみで設計する方法を提案した．

新潟地震で落橋した昭和大橋の教訓として，落橋防止

構造の必要性が認識された．直ちに「道路橋示方書，V 耐震設計篇」に採用され，桁と桁，桁と橋脚または橋台を連結する方法,橋台または橋脚上にブロックを設置し，桁の過度の移動を防止する方法，天端幅に余裕をもたせて桁のずれ落ちるのを防ぐ方法などが提案されている．

1974 年の伊豆半島沖地震（M＝6.9）の震源地近くに存在した五十鈴橋（3 径間連続プレートガーダ橋）[9]は，橋桁が橋台に埋め込まれ固定された鉄板に溶接接合されていたので，地震で鉄板には大きい張力が作用し，コンクリートが剥落し，橋脚上の支承部のアンカーボルトは多く切損したが，橋桁は落橋を免れ，落橋防止構造の有用性を示す証拠となった．

地震工学の進歩により，構造物の耐震強度を予測することが可能になってきた．鉄筋コンクリート造の建物については，部材寸法，壁率等を知って，動的解析手法を用いて，耐震強度を求め，補強対策を実施するまでに到り，すでに東海地震関連で，静岡県などで診断が実施されている．橋梁については，東京都の橋梁の地震対策のために，既設橋梁の耐震強度を測定する必要があって，著者らは数量化理論を用いて，科学的に，橋の構造・寸法，設置地盤の種別等に評価点を与え，調査対象橋梁の該当項目別の評価点の積がある一定の閾値を超えると，落橋の可能性が非常に高いものと判定する手法を開発した[9]．東京都の既設橋梁 264 橋に，提案の手法を適用して判定したところ，6 橋が落橋の危険性が高いことが判明した．関東地震で東京府下の永久橋の被害率が 2～3% であったと矛盾しない被害橋梁数となっている．しかし同じ手法を 1989 年のロマブリエタ地震で桁の落下したベイブリッジとサイプレスの高架橋に適用したところ，該当項目別の評価値の積は，東京都の橋梁の診断に用いた閾値よりはかなり小さい値しか得られなかった．間違った判定をした原因としては，項目別の評価値を数量化理論で求めたときの標本の橋は全部日本の橋で，サイプレスの高架橋等のように耐震設計以前に近い橋梁は含まれていないので，米国の橋の判定には，設計震度の大小を新たな項目として追加して，評価値を計算し直すべきものと考える．

建物とか橋梁以外の構造物では，斜面の安定の判定手法が建設省土木研究所で研究されているほかは，地下鉄用の都市トンネル，一般の山岳トンネル，鉄骨造の建物およびライフライン施設などは研究が全然といってよいほど進んでいない領域である．土木研究所の斜面の判定法を 1978 年の伊豆大島近海地震によって崩壊した斜面および非崩壊の斜面に適用したところ，マクロ的判断をするときには比較的妥当な判定結果ではあるが，判定の精度は実用とはいい難いもので，土木研究所の調査研究に続く研究が必要であろう[12]と思われる．

1964 年に発生した 2 つの地震アラスカ地震（M＝8.4）と新潟地震（M＝7.5）により，砂地盤の液状化の研究が大変な速度で進み，飽和したゆる詰めの比較的均等粒径の砂は，地盤の剪断変形により体積が縮小し，間隙水圧の上昇を発生させ，これにより砂の骨格が破壊され，液体状の挙動を示し，支持力を失い，剪断抵抗も非常に小さくなるメカニズムが解明された．新潟市の川岸町の 3 階建のアパートは支持力を失い，転倒したほか，マンホールは浮上し，RC 造の建物は傾斜したり，沈下したりした．新潟駅近くにあった東跨線橋は橋台間の移動ずれが 60 cm 以上に達し，橋桁は天端からずり落ちて，桁下の列車を圧潰した．地震後の調査で，砂地盤の液状化に伴う剪断力の喪失で，表層地盤が重力で液状化層上をすべり，大きく変位したためであることが，引き抜いた杭のクラックの分布形状などから類推された．

1983 年の日本海中部地震で，能代市内の中圧ガス導管が 5 ケ所で切損した．その調査委員会で原因を模索しているときに，砂層の液状化による地盤の永久変位が思い浮んだ．地盤の地震時の永久変位の求め方として，地表前後の同一地区の航空写真を比較することを思いつき，実測したところ，定性的にも定量的にも妥当な結果を得，能代市内での最大の永久変位は 5 m に達していた．同じ手法で新潟市内の地震による永久変位を求めたところ，万代橋近くの左岸側の堤防で 8.8 m の永久変位が生じているほか，市内の永久変位の分布を知ることができた．地盤の液状化に伴う永久変位を側方流動（LATERAL SPREADING）と称し，側方流動による基礎杭の変形，破損の解明および埋設管の挙動の数理理論による解析が現在盛んに研究されており，側方流動をうける埋設管の耐震設計法は早期にまとめなければならないと考える．

7. 集中度を増す都市と発生する震害

昨今，大都市への人口の集中は全世界的，全国的傾向で，これにより施設が新設され，拡充されて，このことがさらなる人口の集中を招きつつあるといえる．東京を例にとると，丸の内地区だけで，東京証券取引所の第 1 部上場企業の本社の 10% はこの地区にある．従業員数で比較すると 15% が，また資本金では 1 部上場企業の 24% であり，丸の内地区だけで全国の資本金の約 1/4 という驚くべき集中度を呈している．これに伴い，鉄道施設，高速道路，ライフライン施設などの公共施設が中小都市に見られない密度で建設された．その他オフィス用の建築物も，超高層ビルを含めて，丸の内地区には林立し，しかもそれらの多くは大地震の洗礼を受けていなくて，その耐震性が必ずしも確認されたとはいい難い．

また東京など限られた大都市の問題かも知れないが，異常に高い土地価格のため，各企業の勤め人の住宅は都心から1時間以上のところが多く，千代田区の人口は昼間は約100万人であるが，95％は通勤者で占め，夜間人口は5万人に過ぎない．昼間時に大地震が起これば，帰宅する手段のない人々で都心は混乱するし，夜間の地震の場合は企業を防衛する人手が得にくく，復旧が遅れ，万一火災でも発生すると大事に到らないという保証もない．

1923年の関東地震当時と比較すると，人口集中と生活レベルの戦後の急速な向上とが原因となって，驚くべき新旧の比率になっている．数字をあげて説明すると，車の台数は1：1800（70年前は7500台），水道の普及率は5倍，ガスのそれは10倍で，ともに現在は100％に近い普及率である．電話は30倍で，人口1人当りでは2，3台の電話を保有していることになり，まさに情報化時代のシンボルである．人口について述べると，70年前は約250万人であるから，区部で考えると約5倍の増加であるが，首都圏の人口で論ずると，10倍の増加と言える．

70年前と比較すると地震工学は格段に進歩しているし，建設技術も向上している．しかしながら部材断面は合理化されているし，密集度も都市の全域に拡がっているなどの不利益な部分も考慮すると，構造物あるいは施設の被害率が大幅に減少するとは言い難いのではないだろうか．東海銀行の調査[11]によると，再度M＝7.9の地震が相模湾で発生したとして，1989年度価格にして，約94兆円の1次被害額に達すると予想し，GNP比では23.5％と報告されている．筆者らが，科学技術庁の大都市震災調査委員会で約15年前に調査した結果でも，約80兆（89年度価格）の被害額となった．結論として，関東地震クラスの地震が発生すると，GNPの1/5～1/4の1次被害が発生する可能性が高いことになる．ちなみに1923年の地震では被害総額は6.4兆円で，当時のGNPの約40％を瞬時にして失ったことになった．

国土庁が南関東地域（1都3県）の地震被害想定を1981～87年の間に行った．その報告によると被害の実体が量的に示されているので，その概要を引用することにする．木造および非木造で，全数は725万棟および134万棟で，大破する棟数はそれぞれ，34万（4.7％）および4.6万（3.5％）で，中破はそれぞれ37万（5.1％）および5万（3.7％）となっている．大破した家屋は建て直しをすると考えられるので，処分しなければならない残骸が発生することになる．残骸は木造で150 m^3／棟，非木造で4000 m^3／棟と仮定すると，1都3県で処分すべき残骸の量は $2.3\times10^8 m^3$ に達し，昭和48年から平成8年までに東京都が中央防波の埋立処分場に埋めた量（$8.3\times10^7 m^3$）の2.8倍の処分場を必要とするという驚くべき量の残骸を処分しなければならないことになる．

推定される死者数は国土庁の報告では南関東で15万人で，東京都の防災会議の推定値は3.7万人（1985年）と9.4千人（1991年）で大きい食い違いがあるが，1都3県の人口比率で修正すると，前者が15万人となり，国土庁の推定値と同じ値になっている．1976年M＝7.6の唐山地震での死者が中国側の発表で約24万人で，埋葬が一大難事業であったらしいので，M＝7.9の地震が相模灘で発生すると，未曾有の規模の人的物的損害が発生し，筆舌にはあらわし難い程の惨々たる事態になることが懸念される．

上述は震災の1次被害についてであり，地震後の工場の操業の停止，企業活動の沈滞などを考えると，震後の短期間の経済は復興景気や世界の各国からの支援で，活気を呈するが，やがて負債の返済や生産活動の停滞により，わが国の経済は好転せずに，2～3年後には為替レートも170円台になると，東海銀行の調査は予測している．異常に人口，その他の集中した大都市，特に東京の震災は70年前とは似て非なるものとなる可能性が極めて高いのである．

8. 都市の耐震化

大都市の震災を軽微にとどめることは，現状の地震工学レベルの技術ではかなり困難で，今後の地震工学のより一層の発展が必要である．本節では都市の耐震化のために必要な技術で，すでに地震工学の分野で萌芽的なものを述べてみる．

今世紀前半までの耐震技術は地震力に十分抵抗できる建造物を設計する技術であったといえる．建築物では壁率を高めるとか，鉄筋コンクリート構造では鉄筋量をふやすとかの手法が，耐震設計の主要な考え方であった．1969年に旧ユーゴスラビアのスコピエ市の3階建の小学校がゴム支承を用いた免震構造の第1号の建物として完成された．現在一般に用いられているゴム支承は支持力を増加させるために鋼板とゴムの互層の積層ゴムが使用されているが，第1号の免震ビルは鋼板なしのものであった．免震ビルの考え方は1891年に日本（ローラー）で，1909年に英国（滑石）で考案された．これらの方法では地震終了時の残留変位量は確定できず不安となり不採用であったが，ゴム支承の弱い復元力で，問題点が解決し，現在は日本で盛んに免震構造が使用されている．わが国では第1号の免震ビル（4階建）が1986年に完成し，橋梁にも応用され，数橋の免震橋が完成または施工中である．免震ビルの発想は従来の耐震設計の考え方

を根本的に変えたものであり，ゴム支承などにより構造物への地震入力を遮断または軽減しようとするものである．

橋梁や建物以外の構造物の耐震設計は依然として，地震力に抵抗でき，破損しないことが原則になっている．しかしながら第6節の「震災以後の地震工学」で述べた側方流動が5mにも8mにも及ぶとなると，これらの異常とも言える永久変位に耐えられる埋設管路の耐震設計が可能かどうかはなはだ疑問に思われてくる．上述の危険性のある地盤に敷設される管路の前後には，緊急遮断弁を設置して，被害をその区間のみに止めるようにするか，または迂回通路を併設し，被災時には迂回路で供給を継続できるように設備しておく方が，地震に強い管の建設より得策と思われる．

港湾施設としての岸壁も，軟弱地盤上ですべての岸壁を耐震的にすることは，莫大な経費を必要とするので，1~2バースのみを大地震時でも機能を失わないように設計すれば，港湾としての最小限度の役割は十分果たすことができる．埋設管路または港湾施設が1つのシステムとして必要最小限度の機能は果たせるようにするなど，考え方の転換をはかるべきではないかと思う．

従来は破壊的地震が発生すると，復旧が遅れるために，災害が大きくなるケースが多かったと思われるが，仮に被害が発生しても早期に復旧が完了する技術の開発も今後は大いに推進すべきであろう．早期に復旧するためには，震害箇所および被災の形態の早期に検出する技術の開発，検出した情報の伝達技術および対応策決定の手法の研究が必要である．建設省では昭和56年より5年間の総合技術開発プロジェクトとして「震災構造物の復旧技術の開発」を実施し，斜面および土構造物，橋梁構造物および地中構造物の被災判定手法，復旧工法および復旧優先順位などを検討するとともに，震災復旧技術マニュアル（案）をまとめた．開発された技術としては，TVカメラによる管路内の変状調査技術，ヘリコプターとビデオカメラによる橋梁などの変状調査手法および斜め写真による土構造物の被災判定法の開発を行ったほか，樹脂注入による鉄筋コンクリート橋脚の補修技術も研究した．TVカメラによる管路の変状調査の手法は1993年の釧路沖地震のガス導管の被災判定に応用された．

緊急遮断装置の開発も，都市の震災の軽減に有効であり，一般使用の石油ストーブにはすでに一定加速度以上の震動で遮断装置が作動し，火が消えるようになっている．都市ガスではマイコンメーターの設置によって，200ガル以上の地震動では自動的にガスの供給が停止され，災害の拡大を未然に防ぐことになっている．新幹線には開業時より，40ガル以上の地震動を感振器が感知し，列車への電気の供給を止め，線路を巡回する手法が採られている．最近は80ガルの感振器を併用し，40ガルで一旦送電は止めるが，80ガルの感振器が感知しないときは送電を継続するシステムが採用され，小規模の地震に対しては，電力の供給停止による停車時間を短縮し，乗客への迷惑を極力減らしている．

関東地震で，個人個人の活動の重要さが，発生した火災の初期消火や，避難行動を通して認識されたのではないだろうか．最近では企業が独自で自衛消防を作るだけでなく，建物の耐震診断や有害物質の外部への漏洩防止など，企業防災が企業活動の主要な部位になりつつある．結局個人または企業レベルで独自の防災体勢を考え，政府は政府として，防災技術の開発，避難路の確保および復旧技術の開発等に努力すべきであろう．企業としては前述のほか，経済損失の極小化，従業員の防災訓練などが防災上なすべきことだと考えられる．個人は家具の固定，食料品の備蓄，家族間の連絡方法の打合わせおよび防災訓練への参加などが重要項目であろう．要は個人，企業および政府が自らのやるべきことを考え，発災時に実行し，三者が有機的に活動し，災害を最小限に止めなければならないと考える．

9. 震害の軽減

1964年と1976年に，パリのユネスコ本部で地震学と地震工学に関する政府間会議が開催され，最初の会議では車の両輪である2つの分野の協力によって震害をなくすための方策が討議された．しかし12年間に震害は相変わらず発生し，多くの人命と財産が失われたので，第2回の会議では災害の軽減をはかる技術的諸問題が議論された．地震工学は100年間にかなり進歩したが，震害の根絶には到っていない．

地震予知技術も地震学者の努力で開発されつつあるが，世界で予知に成功したのは海城地震（中国東北地方の遼寧省南部に，1975年2月14日，19時36分に発生したM=7.3の地震で，約7時間前に避難命令が出された）の1例しかない．この地震では人命の損失は予知の成功のため大変少なかったが，90%の家屋は損傷した．震害額は以下に述べる理由によって，建設投資額とともに増加するが，地震工学の進歩によって災害の増加する度合いは減らすことができるし，そのことはまさに地震工学の使命でもある．

震害が根絶できない理由は

1） 地震に対し脆弱な構造物が現存している．
2） 地震現象は完全には解明されていない．

3） 構造物の設計は経済原則に基づいている．

4） 地震を経験していない構造物が多く存在する．

などによる．第1の課題を補足すると，古いレンガ造の建物，日干しレンガの家屋に地球人口の5割以上が住んでいるし，配管でも，地震に弱いネジ継手の鋼管，ヒューム管がいまだに使用されていることなどがあり，すべての構造物および施設が十分な耐震強度を有しているとは言えない．

構造物を破壊させる地震現象も複雑で，今年1月の釧路沖地震でも，観測された地表面の最大水平加速度は710ガル（EWに近い方向）およびこれと直角方向に600ガルであったにもかかわらず，家屋の被害率は小さく，地表層による増幅特性が明らかにされていない．設計者が最も正確な知識の欲しい震央近傍での大地震の震動特性，最大加速度と地震の規模（マグニチュードで表わす）との関係も十分解明されていない状態である．断層も地震発生後に説明されるので，トンネルや埋設構造物の断層対策は現状では不可能である．

一方構造物は経済の原則に基づいて設計されるので，旧東大地震研究所の建物のようにいかなる強さの地震にも耐えられる構造物を設計することは，設計上は可能であるが，その構造の寿命期間中に遭遇する地震の確率，地震の強さを考えると，あまり賢明な策ではないことは自明である．現在標準設計震度は0.2となっているが，この値を越える地震動の発生する確率は必ずしも小さくはないので，ある程度以上の強い地震に襲われると，損傷する構造物が発生することになる．

第4の理由は，地下鉄トンネル，超高層建物，長大橋梁は大地震を経験していない構造物であるので，地震時の挙動は動的解析の手法を用いて予測はしているが，真の挙動，発生する断面力などは未知の部分を残していると言わざるをえない．構造材料にしても，高張力鋼は地震の洗礼を受けた材料とは言えなく，これを用いた構造物が絶対地震に安全とは言い切れないところがある．

以上の不安材料があって，震害を地球上から根絶することは不可能であっても，設計および施工に関する建設技術の進歩発展と，地震工学の進歩と国の経済力の援助によって，震害はできるだけ軽減し，人生を安楽に過せる社会を築かねばならないと考える．

文　献

1） 土木学会編：関東大地災震害調査報告，1926.

2） 土木学会編：日本土木史（大正元年～昭和15年），1965.

3） 岡本舜三：地震力を考えた構造物設計法，1953.

4） 萩原尊礼：地震学百年，東大出版会，1982.

5） 翠川三郎：釧路沖地震の地震動，震災予防協会地震工学振興会ニュース，130号，1993.

6） G.W. HOUSNER 他10名：COMPETING AGAINST TIME（時間との戦い——ロマプリエタ地震報告書），1991.

7） 土木学会編：新潟地震震害調査報告，1965.

8） G.W. HOUSNER : REPORT ON BART TUNNEL, 1960.

9） 久保慶三郎：地震と土木構造物，鹿島出版，1981.

10） 土木学会：耐震構造設計に関する研究報告書，（昭和37年度国鉄委託）.

11） 東海銀行調査月報，1989年1月.

12） 日本道路協会道路震災対策委員会“1978年伊豆大島近海地震災害”1979年3月.

（1993.7.12受付）