

○関東大震災以降の主な被害地震と地震工学の発展

- ・1933 年昭和三陸地震津波：岩手県沖 250Km に日本海溝の外縁部（アウターライズ）の太平洋プレート内で発生した正断層型のM8.1の巨大地震。1896 年明治三陸地震津波（M8.5）の広義の余震。揺れによる被害は小さかったが、地震発生から 30 分～1 時間後、北海道、三陸沿岸に大津波が襲来し、死者・行方不明者 3,064 人という大惨事となった。
- ・1933 年ロングビーチ地震：米国カリフォルニアの M6.7 の活断層による地震。アナログ式強震計による世界初の強震記録を観測した。NS で 0.13g、EW で 0.15g、UD で 0.15g。ここで g は重力加速度（980 gal）。
- ・1940 年インペリアルバレー地震：米国カリフォルニアの M6.9 の活断層による地震。断層の近くの町、エルセントロにて強震計による強震記録を観測した（図 1）。特に NS（南北）成分の加速度記録は、最大で約 340 gal（cm/s²）であり、エルセントロ波（El Centro 波）として基準法や設計用地震動の基準となった。
- ・1944 年東南海地震：M7.9 のプレート境界地震で、名古屋市の沖積や埋立て地域を中心に大きな被害を生じた（図 2 参照）。主な被害は、死者 1223 名、家屋全壊約 1 万 6 千棟、半壊約 2 万 3 千棟など。
- ・1946 年南海地震：M8.0 のプレート境界地震で、中部地方から九州まで広い範囲に津波と地震動による被害を生じた（図 2 参照）。主な被害は死者 1330 名、行方不明 102 名、住宅全壊約 1 万 2 千棟、半壊約 2 万 3 千棟、流出家屋約 1500 棟など。

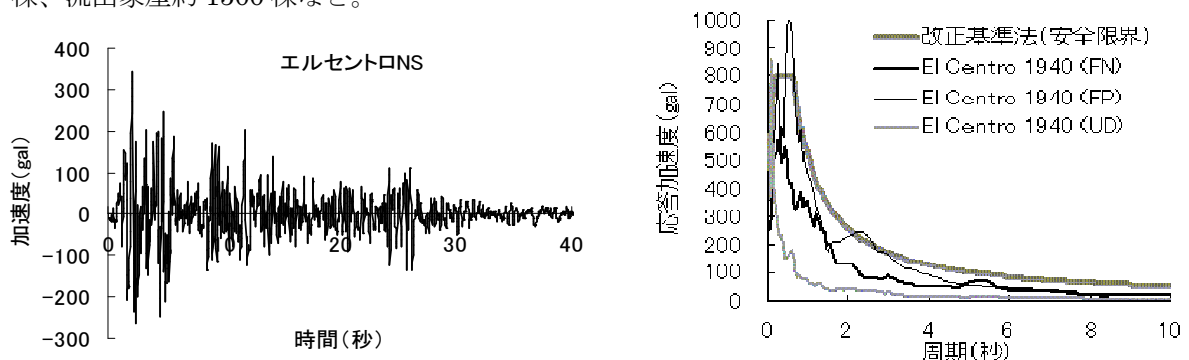


図 1 エルセントロ波と加速度応答スペクトル（5%減衰・1 質点系の地震応答スペクトル）

- ・1948 年福井地震：福井市の直下で発生した M7.1 の活断層による地震。死者は 3769 名、家屋倒壊約 3 万 6 千棟、半壊約 1 万 2 千棟、焼失約 4 千棟などで、福井市は壊滅状態となった（図 3）。図 4 に示すように福井平野の沖積地域では全壊率は 100% 近くにも達する地域があり、これを契機に気象庁震度階に震度Ⅶが新設された。さらに市街地建築物法に代わり、全国を対象とした建築基準法が 1950 年に施行された（設計震度を 0.2 以上とする許容応力度設計法。但し、安全率は 1/2 となり、実質は旧法と同等レベルである。基準法は建築物の敷地・設備・構造・用途について、その守るべき最低限の基準を定めた法律であることに注意）。また木造住宅においては床面積に応じて必要な筋違等を入れる壁量規定が定められた（その後、1959 年の改定で強化）。一方、1952 年にわが国初めての強震計（SMAC）が開発された。

- ・1960 年チリ地震津波：チリ沿岸に Mw 9.5 の超巨大地震が発生し、チリ海岸では最大 20 m 以上に達する大津波が発生した。約 15 時間後にはハワイ、約 23 時間後には日本に達し、三陸沿岸を中心に大きな被害を生じた（日本の死者・行方不明者 142 名）。これ契機に津波の早期警報のための国際組織である太平洋津波警報組織国際調整グループ（ICG/ITSU）が 1968 年に誕生した。

- ・災害対策基本法（1961 年制定）：1959 年伊勢湾台風（名古屋地方を中心として死者・行方不明合わせて約 5,000 人もの犠牲者を出した）を契機として、災害全般にわたる基本的な法律として制定された。この法律に基づき国には中央防災会議が、地方自治体には地方防災会議が設立し、防災計画の策定や災害発生時の措置等が定められた。

- ・1964 年新潟地震：M7.5 のプレート境界地震で、新潟、秋田、山形の日本海側沿岸の広い範囲に被害をもたらした（死者 26 名、家屋全壊約 2 千棟、半壊約 7 千棟など）。図 5、6 に示すように、この地震で新潟市で

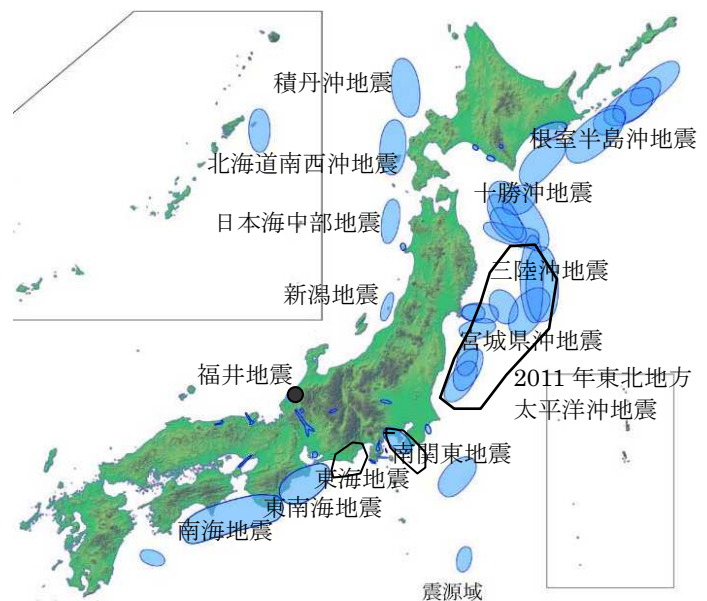


図 2 主要なプレート境界地震
(<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/2-1.htm> に加筆)

大規模な**液状化現象**が発生し、多くの建物が地盤の支持力を失って**不同沈下**や傾斜を生じ、さらに地盤の**側方流動**による基礎杭の破壊や落橋などを生じた。また**長周期地震動**により、新潟港の石油タンクの**液状揺動（スロッシング）**による大火災（計 149 基タンクのが炎上し、15 日後に鎮火）が発生した。図 7 は、液状化で転倒した川岸町アパートと、1 階で得られた強震記録である。この地震を契機として、1966 年に「**地震保険に関する法律**」が制定され、**地震保険**が制度化された。

- ・ **液状化現象**：図 13 に示すように緩い砂層が水で飽和しているとき、強い振動を受けると、砂粒子の間隙が小さくなり、水圧が高まって砂層全体が液化する現象。2011 年東日本大震災でも浦安市などを中心に大規模な被害を生じた。現在では地盤改良など様々な対策が可能となっている。



損壊した大和百貨店（福井市）。1 階が潰れ、各階の梁が著しく破壊し、また火災による被害も受けた。小林啓美氏（東京工業大学名誉教授）撮影・提供。

図 3 福井地震により倒壊した大和デパート
(<http://www.soc.nii.ac.jp/ss/naifuru/pdf/nf-vol9.pdf>)

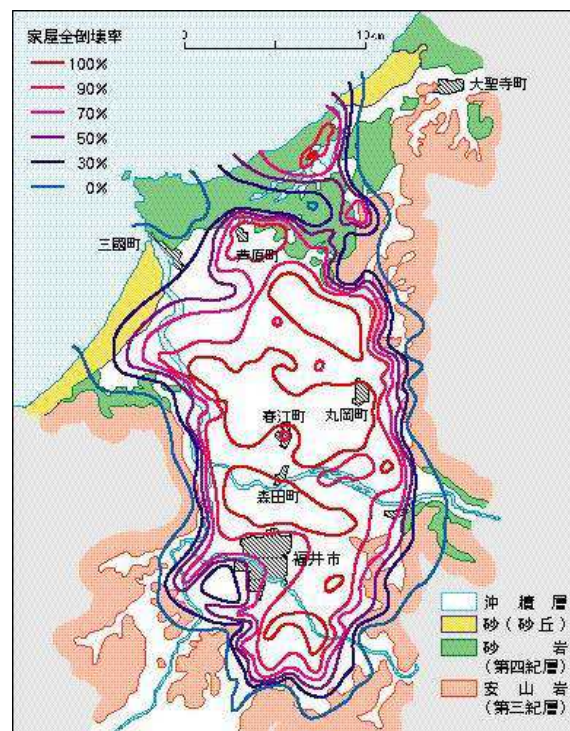
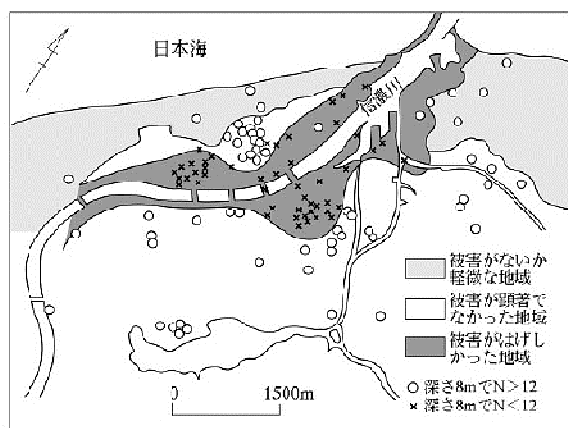


図 4 福井地震による家屋全倒壊率
(<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/f6-21.htm>)



新潟市被害分布とN値との関係（深さ8m、N=12を基準としたボーリング結果の分類と被害地域の関係。大崎順彦による）

図 5 新潟地震による新潟市の被害分布
(<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/index1.html>)

400gal 1964 新潟地震 新潟市川岸町 NS (M=7.5, Δ=51.4km)

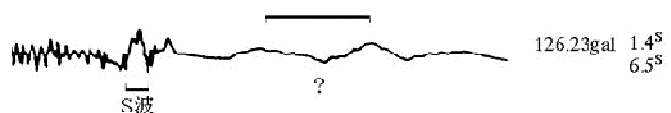


図 6 新潟市川岸町アパートの加速度記録と被害
(http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/ekijouka_map/q&a.html)

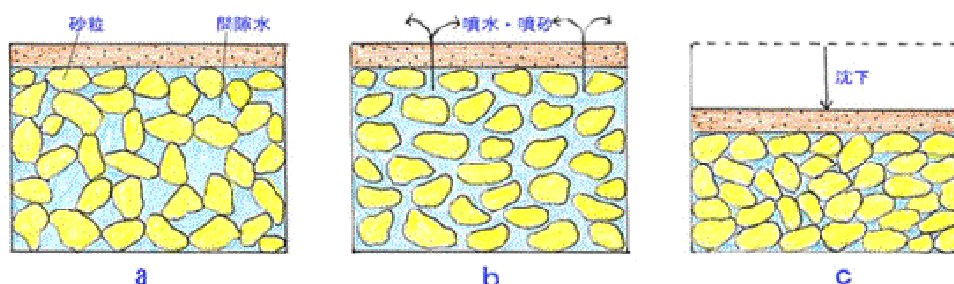


図 7 地震による飽和砂質地盤の液状化現象
(<http://www.bosai.go.jp/library/bousai/manabou/index.htm>)

- ・ **1968 年十勝沖地震**：M7.9 のプレート境界地震で、北海道から東北の太平洋側沿岸の広い範囲に地震動と津波による被害をもたらした（死者 52 名、家屋全壊約 7 百棟、半壊約 3 千棟など）。この地震では建築基準法によって耐震設計された RC 造建物が地震動によって大きな被害を生じた。とくに学校建築の窓側桁行面にて、構造計算上無視される**垂壁・腰壁**によって**短柱（内法高／柱幅<2.5）**となった RC 柱に顕著な脆性のせん断破壊を生じた（図 8）。また激震時に中低層建物の応答加速度は 1g にも達し、屋上の煙突やペントハウスに著しい被害が生じた。八戸市の港湾事務所で観測した強震記録（NS で 0.24g、EW で 0.18g、UD で 0.12g）は**八戸波**として知られ、設計用地震動の標準波のひとつとなった。**建築基準法が 1971 年に改正**され、鉄筋コンクリート造の柱の**せん断補強筋規定が強化**（柱の帯筋間隔を狭くする）された（図 8）。また**木造住宅**では、**基礎をコンクリート造又は鉄筋コンクリート造の布基礎**とすることが義務付けられた。

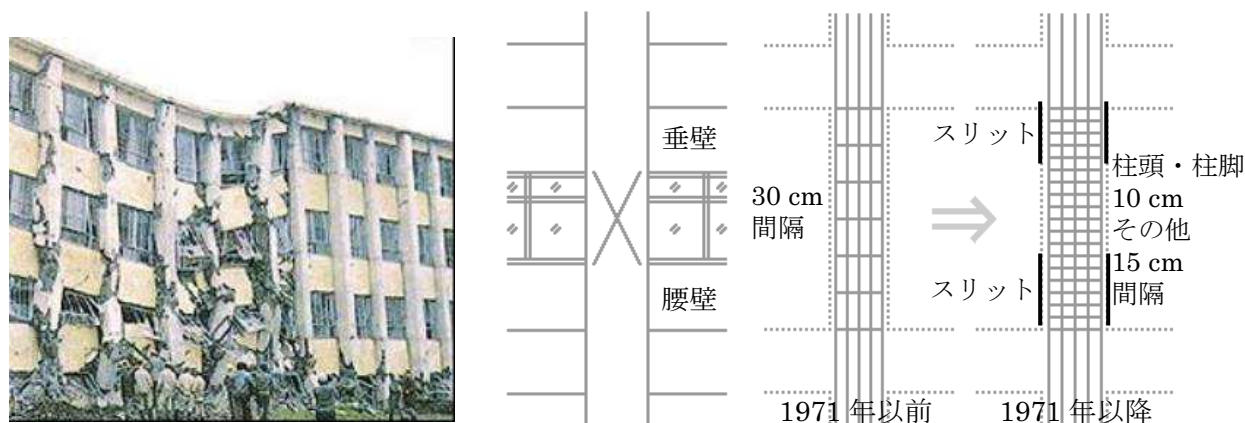


図 8 十勝沖地震による函館大学の被害（左 <http://www.kajima.co.jp/tech/seismic/higai/030604.html>）と基準法改正による RC 柱せん断補強筋の強化（中、右 http://www.jsca.or.jp/vol2/15tec_terms/200403/20040320-2.html）

- ・ **1971 年サンフェルナンド地震**：米国ロサンゼルスに北に位置する M6.6 の内陸活断層による地震で、死者 59 名の被害を生じた。震央から約 10km にある新築の**オリブビュー病院**（2 階建て RC 造）では 1 階部分を壁の無い柔構造とする耐震設計（**Soft First Story**）を採用したが、せん断補強筋の不足で脆性破壊を生じ、1 階部分が崩壊した。また震央から約 9 km にあるパコイマダムの強震計では S74W 成分が 1.25g、S16E 成分が 1.24g を観測した。この頃から大きな加速度を記録しても軽微な被害に留まっている建物が多数あり、最大加速度などの**地震破壊力指標**と地震被害の関係が議論されるようになった。
- ・ **1975 年海城地震**：中国遼寧省海城県と営口県の地下に発生した M7.3 の地震。多くの前兆現象があり、中国政府は臨震予報（**地震短期予知**）を出すことに成功したとされ、死者は 2000 名以下であった。
- ・ **1976 年唐山地震**：中国唐山市の直下に生じた M7.8 の地震。市の 9 割以上の建物が被害を受け、死者約 24 万（全体では 60 万とも言われている）、負傷者約 16 万という 20 世紀で史上最大の被害を生じた。中国国家地震局は、この地震の長期予報と中期予報を出していたが、短期予報と臨震予報は出せなかった。
- ・ **大規模地震対策特別措置法と東海地震予知情報**：1944 年東南海地震では東海地震の震源域が割れ残ったことより（地震の**空白域**）、東海地震が近い将来に起こることが懸念されている（**東海地震説**）。1970 年代は**地震の直前予知**が楽観視されており、東海地方の常時観測体制を強化して地震発生の前兆現象を捉えること（直前予知）を前提とした**大規模地震対策特別措置法が 1978 年に制定**された。この法律により**地震防災対策強化地域判定会（略称：判定会）**において東海地震の可能性大と判定された場合は、気象庁長官が内閣総理大臣に**地震予知情報**を報告し、内閣総理大臣はただちに閣議を開いて**警戒宣言**を発令する。この場合、東海地方と周辺地域の新幹線 JR、私鉄、東名・中央高速道、東海地方銀行・郵便局・スーパー・デパート・病院外来は運休・閉鎖、学校・オフィスは休校・退社するなど厳しい規制が行われる。実際には、歴史上、東海地震は単独では発生しておらず、予知情報の精度や有効性は現在でも大きな論争がある。このため、現在では**予知情報**のほか、**注意情報**（前兆の可能性あり）、**調査情報**（異常観測あり）も発令される。
- ・ **1978 年宮城県沖地震**：M7.4 のプレート境界地震で、仙台市を中心に大きな被害をもたらした（死者 28 名、全壊約 1 千棟、半壊約 5 千 5 百棟など）。仙台市内を中心に多数の強震記録が観測され（**仙台波**として標準地震波の一つ）、沖積地盤の古い木造住宅や造成宅地による顕著な被害が見られた。RC 造被害の多くは 1971 年以前の基準法改正以前の建物であった。大被害の建築の多くには、**壁の偏在によるねじれ振動**や、**ピロティ階など層剛性の急変**などが原因とされた（図 9）。またマンションなどでは構造体でない**2 次部材（間仕切り壁など）**に顕著な被害があり、ドアが開かなくなるなどの被害が目立った。また**建築設備（屋上水槽、エレベータなど）**の被害が多数発生し、**都市のライフライン**（ガス、水道、電気、交通、通信など）の被害により、都市機能の麻痺も大きな問題として浮かび上がった。さらに**無補強のブロック塀**の転倒により 16 名の死者を出し、屋外ではビルからのガラス片や落下物により多数の負傷者を出した。この地震を契機に、**1981 年に建築基準法が大幅に改定**され、**新耐震設計法（後述）**が導入された。**ブロック塀の補強**が義務化され、**木造住宅**では壁量規定が見直され、構造用合板や石膏ボード等の面材を張った壁などが追加された。



図9 宮城県沖地震によるピロティー建物の被害
(<http://www.kajima.co.jp/tech/seismic/higai/030604.html>)

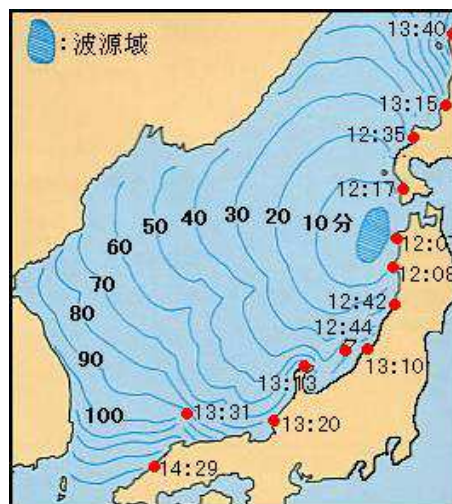


図10 日本海中部地震による津波の到達時間
(http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec5.3.htm)

- ・**1983年日本海中部地震**：秋田県沖に発生した M7.7 のプレート境界地震で、地震発生後、わずか約 10 分後には青森・秋田県を中心に最大 14m にも達する**津波**が到達し、死者・行方不明者 104 人、重軽傷者 1 6 3 人、建物の全半壊 3,049 棟の被害を生じた（図 1 0）。砂地盤の**液状化**の各地で発生し、道路、港湾などに大きな被害を生じ、特に震源から約 250km も離れた新潟県内の多数の**大型石油タンク**では周期約 10 秒の**長周期地震動**による**液状揺動（スロッシング）**が生じ、石油の溢流事故があり注目された。
- ・**1985年メキシコ地震**：メキシコ沖合い太平洋岸のミチョアカンに発生した M8.1 のプレート境界地震。震源地から約 400km も離れたメキシコ盆地に位置するメキシコ市では、周期約 2～3 秒の**長周期地震動**が発生し、多数の中高層建築が倒壊する大被害を生じた（死者・行方不明 6 千～1 万人）。

○地震工学・耐震工学の基礎

- ・**耐震設計（建築基準法）の原則**：現在の耐震設計は以下のような考え方を原則としている。

- 1) 建物の耐用年数内に数度は経験するであろう地震（一般には**中小地震**、**設計震度 0.2 程度**）に対しては弾性限度内で設計し（**許容応力度設計**、**1次設計**）、**非耐震要素**（間仕切り壁など）には多少の損傷があっても、**構造要素**（柱、梁、耐震壁）は、ほぼ無被害とする。
- 2) 対象とする地域で極めて稀に発生する可能性のある地震（一般には M8 クラスの**巨大地震**、または**活断層**などによる**直下の地震**、**設計震度 1.0 程度**）には、建物（構造体）は多少の損傷を許容するが崩壊はさせず、人命は守る（建物の弾塑性解析を行い、安全性を確認する。**保有水平耐力**を確認、**2次設計**）。
- 3) 震災時に重要な建築（病院、学校、警察・消防などの公官庁、放送・通信などの建物）は、震災後にも機能を維持できるように特別な配慮を行う。

→ 換言すると中小地震には**強さ**で対抗するが、大地震にはある程度の破壊を許容し、**強さとねばり**で対処する。これは現在の**建築基準法**は上記の考え方が基礎（**最低限の基準の仕様規定**）となっているが、大地震時に建物が壊れ、機能維持が不可能となることが前提となっていることが一般には周知されていないため、阪神淡路大震災など震災の度に大きな議論となっている（その後、**性能設計**の考え方が浸透）。

- ・**強さと粘り**：図 1 1 に示すように**耐震壁**のように剛性が大きくて変形せず、大きな地震力が作用しないと壊れない性質を**強さ**という。一方、**鉄骨柱**のように地震時に大きな変形が生じてもなかなか壊れない性質を**粘り（延性）**という。**無補強レンガ造**や**RC 短注**のように地震時に粘り無く破壊してしまう性質を**脆性**と言う。木造建物などの小規模な低層建物は一般に耐震壁などによる**強さ**で地震力に対抗する（**壁量計算**や**1次設計**）。しかしながら、強い建物は一般に大きな応答加速度が生じ、さらに高層になると 1 階に大きな壁や柱断面が必要となるため、強さだけでは耐震設計が成り立たなくなる。そこで、ある程度は構造体の損傷を許容し、**強さと粘り**で地震力に対抗するのが理想とされる（**保有水平耐力**を確認、**2次設計**）。
- ・**設計用地震力**：対象地域の**地震危険度**（地震ハザード）、**表層地盤の影響**（沖積・洪積など）、**建物の振動特性**（地盤との相互作用、固有周期、高さ方向の振動分布など）、**建物の重要度**などを考慮して決められる。
- ・**設計震度**：ある部分（建物の各層やペントハウス、設備機器など）に作用する**地震応答加速度**（通常は水平加速度）を重力加速度（980 gal）で基準化した値を**設計震度**という（図 1 2）。**設計用地震力**は対象部分の重量を設計震度に乘じれば求め

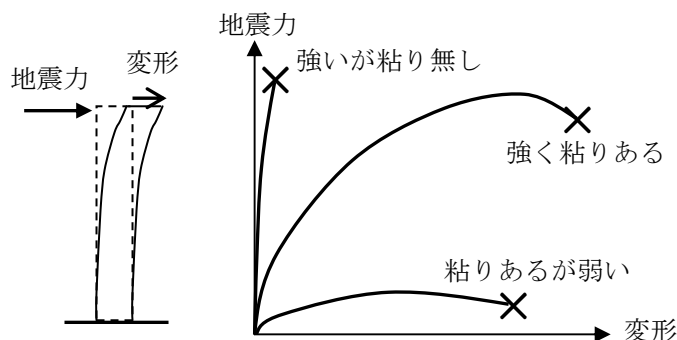
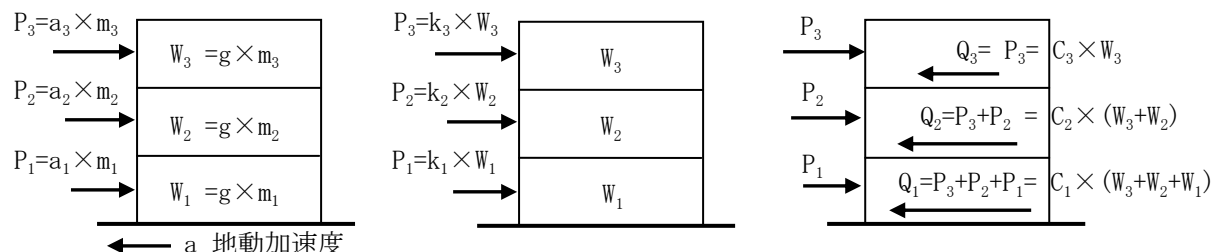


図 1 1 強さと粘り

られる。旧建築基準法（1981 年以前）では設計震度が規定されていた。

- ・**層せん断力・層せん断力係数**：地震力の作用によって、各層に作用するせん断力を**層せん断力**という（図 1 2）。層せん断力を、その層より上の建物重量で基準化した値を**層せん断力係数**という。特に 1 階における層せん断力係数は**ベースシア係数**と呼ばれる（図 1 2 の Q_1 ）。現在の建築基準法（1981 年新耐震設計法）では、設計震度ではなく、層せん断力係数が規定されている（図 1 2）。
- ・**層間変形・層間変形角**：地震力の作用によって、上層と下層の水平変位の差を層間変位（変形）と言い、これを層高で基準化した値を層間変形角と言う。現在の建築基準法ではある規模以上の建物には、層間変形角の検討が義務付けられている。



- 1) 層応答加速度 a_i と層地震力 P_i 2) 設計震度 k_i と層地震力 P_i 3) 層地震力 P_i と層せん断力 Q_i

図 1 2 設計震度、層せん断力、層せん断力係数の説明図

(a : 加速度、 m : 質量、 $W=mg$: 重量、 P : 地震荷重、 k : 設計震度、 Q : 層せん断力、 C : 層せん断力係数)

- ・**1989 年ロサンゼルス地震**：震央はサンフランシスコの南東約 100km のサンアンドレアス断層沿いで生じた $M=7.1$ の内陸活断層地震。震源域から離れたサンフランシスコやオークランドの**軟弱地盤**を中心に地震動の増幅と**液状化**が生じ、木造アパートやレンガ造建物の倒壊・火災などで死者 64 名の多大な被害を生じた（硬質地盤サイトでは無被害）。特にサンフランシスコ湾を渡る Bay Bridge や 880 号**高速道路高架橋の倒壊**で多数（38 名）が死亡したほか、**都市機能が麻痺**するなどの被害を生じた（写真 1）。
- ・**1993 年北海道南西沖地震**：北海道奥尻島の北約 80 km を震源とする $M=7.8$ のプレート境界型地震で、北海道・青森県の日本海側で震度 5 を記録した。**津波被害**が大きく、死者・行方不明者合わせて 229 名となった。特に、奥尻島では地震後 5 分程度で津波警報とほぼ同時に津波に襲われた。藻内地区で遡上高が 29m にも達し、島南端の青苗地区は火災もあって壊滅状態となった。1983 年日本海中部地震と併せて**津波対策**が大きな課題となった。このため、気象庁は、1999 年から津波データベースをもとにした新しい予報システムを導入し、津波災害の発生が予想される場合、地震発生後約 3 分で津波警報（予測津波高さが 1m を超える）・注意報（同 20cm 以上 1m 以下）の発表をすることにした（但し、即時による低い津波予測高の公表は 2011 年東日本大震災で大きな問題となった）。一方、奥尻町では復興事業費や義援金など約 1,000 億円で、約 14 km の防潮堤や高さ 8m の人工地盤など復興事業が行われた。但し、現在の人口は地震前から 4 割近く減るなど高齢化・過疎化に歯止めがかからず、ハード対策中心の復興事業に問題点が指摘されている（例えば、朝日新聞、<http://www.asahi.com/national/update/0711/TKY201307110327.html>、など）。
- ・**1994 年ノースリッジ地震**：ロサンゼルス市の北西約 40km、サンフェルナンドバレーの直下で生じた $M=6.7$ の内陸活断層地震。震源域のサンフェルナンドバレーやロサンゼルスにて、木造アパートや**高速道路高架橋の倒壊**などで死者 61 名の多大な被害を生じた。（写真 2）。特にプレキャストコンクリート柱・梁の駐車場の倒壊や**鉄骨造の接合部**の被害が目立ち、**ライフライン施設**の被害による都市機能が麻痺した。1971 年サンフェルナンド地震で倒壊した**オリーブビュー病院**は壁式剛構造として再建されたが、地震の際、構造的には無被害ながら内部の医療機器に被害を生じて医療施設としては機能せず、**機能維持**の対策が課題となった。



写真 1 Marina District の木造アパートの被害（左：1 階のせん断耐力不足）と Interstate Highway 880 の高架橋の被害（右：支持柱の耐力不足） <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-29/>

○1995 年兵庫県南部地震と阪神淡路大震災

- ・ **震災前の神戸市の地震防災対策**：神戸市では、阪神大震災前の地震防災のための想定地震としては山崎断層と有馬－高槻断層帯（M7 クラス）や南海地震（M8 クラス）など、神戸から離れた地震を想定し、想定最大震度はⅤであった（過去の最大震度がⅤであることが理由とされている）。このため広域火災は想定していたが、建物やライフラインの被害は想定外であった。また一般にも「関西には地震が無い」という俗説が浸透していた（実際は慶長地震など活動期には多数の地震があった）。
- ・ **活断層と震源**：1995 年 1 月 17 日午前 5 時 46 分 52 秒に明石海峡の深さ 14km で発生した Mj7.3（Mw6.8）の活断層による地震で、**兵庫県南部地震**と命名された。断層破壊は南東の淡路側（野島断層）と北西の神戸側（六甲断層系）に伝播し、右横ずれを生じた（図 1）。野島断層では 1～2 m の地表すべりが見られたが、神戸側の六甲断層系は地表断層の現れない伏在断層の地震となり、神戸市に破壊的な被害を生じさせた。
- ・ **最大震度と震災の帯**：神戸市の三宮など、西宮市、芦屋市、宝塚市、淡路島の北淡町・一宮町・津名町（現・淡路市）の一部で**震度 7**を観測した（図 1）。特に神戸市側の震度 7 の地域は大阪湾に平行する幅 2 km 程度の帯状となって分布しているため、**震災の帯**と呼ばれた（但し、当初の発表は震度 6）。
- ・ **主な地震被害**：**死者 6433 人**（9 割以上が家屋の倒壊による**圧死・窒息死**）、負傷者は約 43,800 人、全壊家屋約 10 万棟、半壊家屋約 15 万棟で、被害建物の多数は**旧基準の建物**であった。大阪湾に沿った埋立地、海岸平野部で多数の**液状化**し、港湾施設に大きな被害が発生した。建物以外の主要な被害は、道路 10,069 箇所、橋梁 320 箇所、河川 430 箇所、崖崩れ 378 箇所、新幹線橋脚の落下 8 箇所、JR・私鉄などの高架の落下 12 箇所、高速道路の倒壊・落下 5 箇所などである。**ライフライン施設**では停電や通信ケーブルの損傷、電話回線の輻輳などで通信機能が著しく低下したほか、水道（地震直後の断水戸数）95 万 4000 戸、ガス（地震直後の供給停止）86 万戸、電気（地震直後に停電になった戸数）260 万戸の被害を生じた。**火災は 285 件発生**したが、道路の閉塞、ライフラインの寸断、交通渋滞などで消火活動に支障をきたし、住家全焼 6,148 棟、全焼損（非住家・住家共）の 7,483 棟の**2 次災害**が発生した。また多くの病院が被災または設備が破損し、救急活動に支障を生じた。避難者数は最大 32 万人におよび、**被害総額は 10 兆円**規模となった（現在の国家予算は約 80 兆円）。

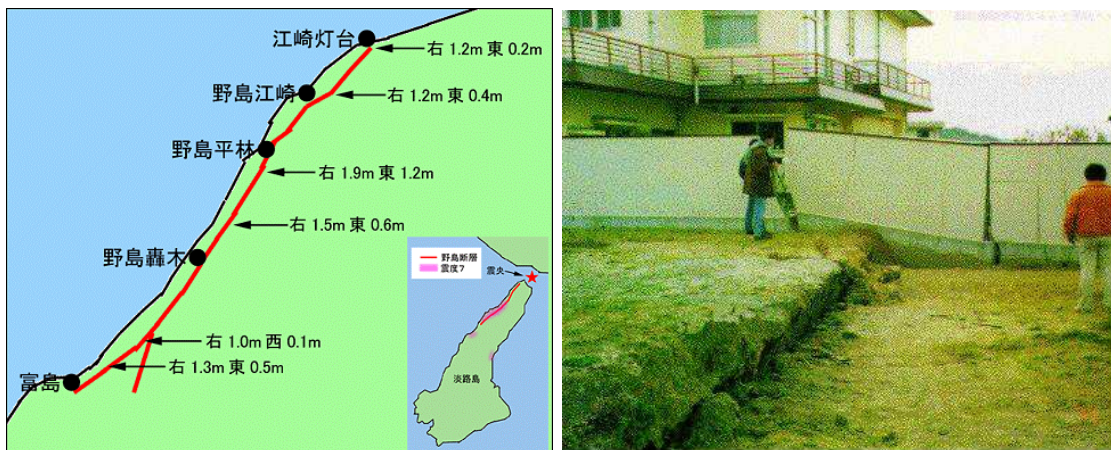


図 1 野島断層のずれ（左 <http://www.rcp.dpri.kyoto-u.ac.jp/main/hyogoken-nanbu/hyogoken-nanbuJ.html>
右 <http://www.rcp.dpri.kyoto-u.ac.jp/main/hyogoken-nanbu/hyogoken-nanbuJ.html>）

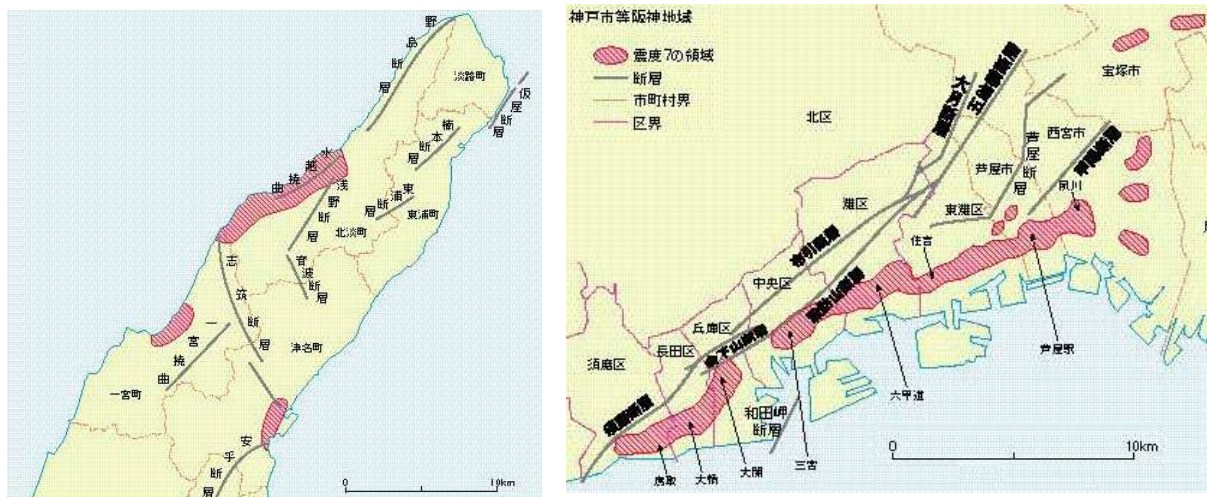


図 2 震度 7 の地域と震災の帯 <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>

- ・ **震源近傍の地震動**：神戸市では地震の際、多数の強震記録が得られた。図は山側の岩盤サイトである神戸大学の**強震記録**である。図でFNは断層面に直交する水平成分、FPは断層面に平行する水平成分である。図より**断層面に直交する成分**に周期1秒程度のパルス波が観測され、建築基準法のレベルより大きな地震動となっている。このパルス波は震源断層面の**アスペリティー** (asperity; 強い地震動を発生する部分) から生じ、断層破壊が進行する側で、断層面の直交成分に現れることが明らかになっている。これは震源近傍での特徴的な強震動特性で、**指向性パルス波** (directivity pulse) と呼ばれている。図に見られるように、木造家屋の大多数は断層面に直行する向きに、なぎ倒されるように倒壊・傾斜した。
- ・ **震災の帯の原因**：大被害を発生した震度7の地域は大阪湾に平行するJR沿いの幅2 km程度の帯状となった**震災の帯**が現れ、それよりも山側と海側では被害は小さかった。この原因はJR沿いに**古い建物**が集中したことに加え、大阪盆地の**洪積地盤**における**地震動の増幅** (堆積層厚は約1 km)、**沖積地盤**による地震動の増幅 (より軟弱地盤の海側では液状化など**地盤の非線形破壊**を生じ、強い地震動を吸収した)、などが複合した現象と解釈されている。

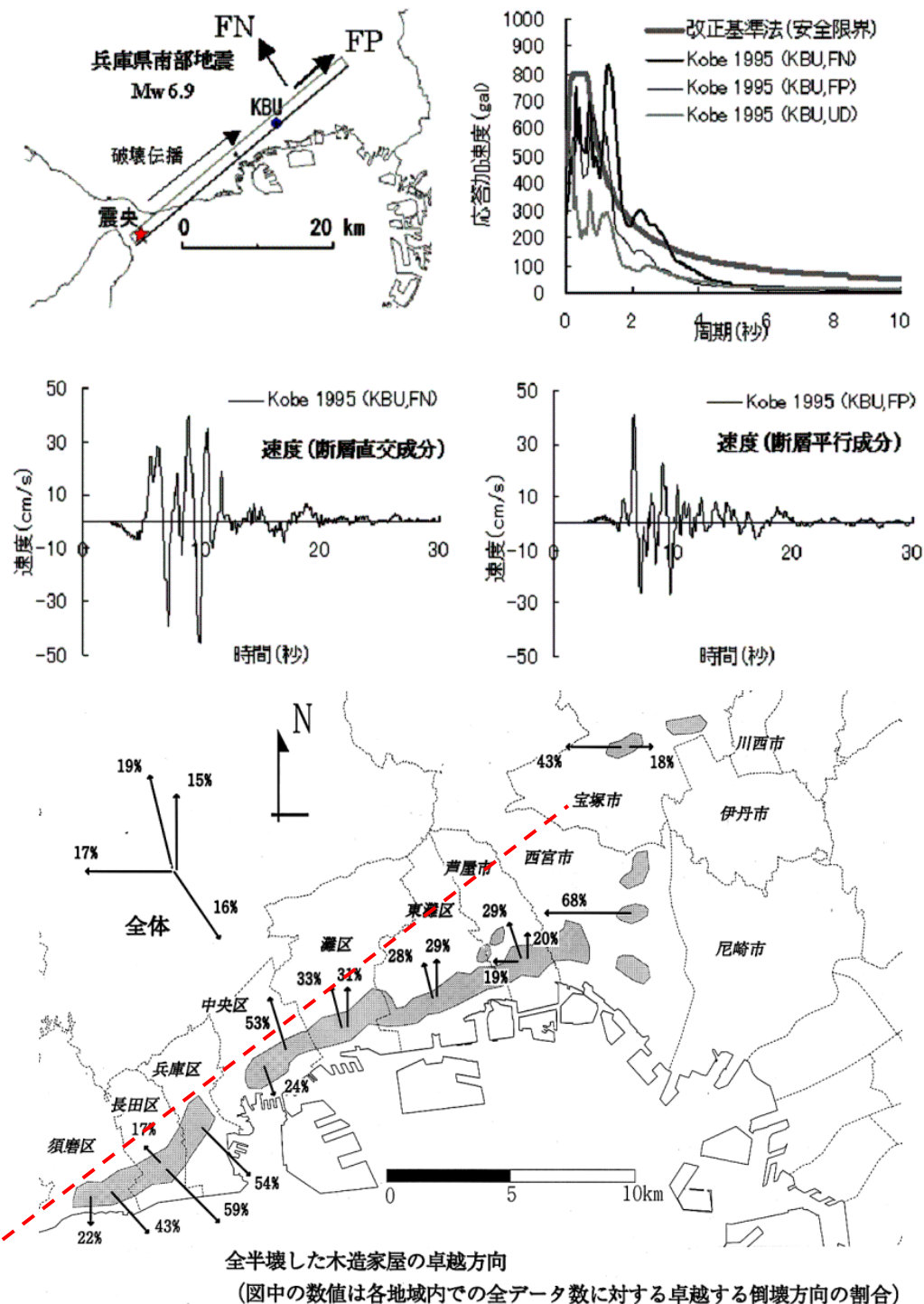


図3 神戸大学で観測された地震動 (上) と全半壊した木造家屋の倒壊方向 (下: 久田, 1998)

・**特徴的な建物被害**：図4に示すように強い地震動により阪神高速神戸線が倒壊し、「崩壊した安全神話」のシンボルとなった。強い地震動により古く老朽化した家屋の多くは倒壊したが、**新耐震基準（1981）**でしっかりと設計施工された家屋は軽微な被害であった。1階の壁不足による木造家屋の被害（図5）や、旧基準（1981年以前）のRC造建物の柱のせん断破壊や中間層の被害が目立った（図6）。



図4 倒壊した阪神高速神戸線（左：<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>）、倒壊した木造家屋（手前）と無被害な家屋（右：阪神大震災全記録、毎日ムックより）



図5 1階の壁不足による木造家屋の被害



図6 旧基準のRC造建物の柱のせん断破壊（左）と中間層破壊（上）

また新基準の RC 造建物ではピロティー階の被害が顕著であった（図7）。このほか、埋立て地盤では液状化による被害が目立ち、倒壊した家屋が道路を塞ぎ、救助や消火活動に支障をきたした（図8）。



図7 旧基準の RC 造建物のピロティー層の被害



図8 液状化被害（左、ポートアイランド）と倒壊家屋による道路閉塞（右）

- ・ **災害情報と危機管理**：図9は公的な発表による震災後の公的な死者・行方不明者、傷害者、被害家屋数の累計である。地震直後、被災地の通信網は麻痺状態となり、国も自治体も正確な被害状況の把握は不可能となった。地元自治体（兵庫県、神戸市）では職員自らが被災者となり参集できず、警察や消防署も目前の対応に追われ、全体像は把握できなかった。自衛隊は自治体と連絡不能なまま待機状態であった。
- ・ **早期被害情報推定システム**：震災後、国や各自治体で速やかな初動体制を確立するため、強震計を用いた様々な **早期被害情報推定システム** が導入された。但し、平常時の利用法とその維持管理が課題となっている。

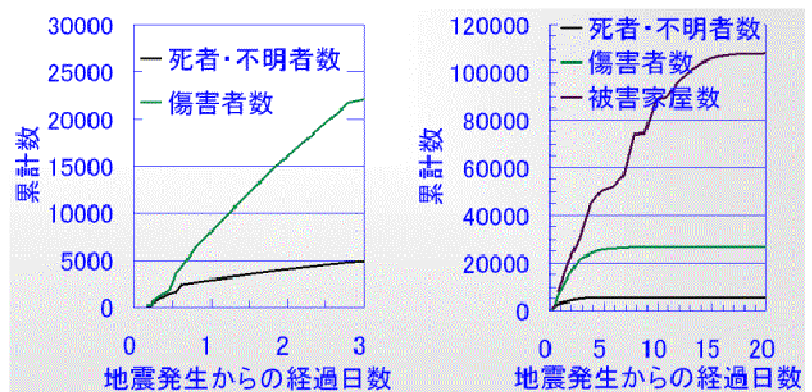


図9 公的な死者・行方不明者、傷害者、被害家屋数の累計

- ・**計測震度**：兵庫県南部地震までの震度は気象官の体感（震度Ⅴ以下）と建物の倒壊率（震度Ⅵ以上）で決定していた。このため建物調査が終了しない限り震度Ⅵ以上を公表できなかった。このため1996年から強震計による**計測震度**が導入され、震度の即時公表が可能になった。しかしながら、計測震度と実際の倒壊率が定義どおりに対応するのかが、新たな課題となっている。
- ・**地震調査研究推進本部**：兵庫県南部地震までの国の地震防災対策の基本は**耐震構造**と**地震予知**だと考えられていた。しかしながら兵庫県南部地震によって殆どの地震では地震予知が困難であることが明らかとなった。このため1995年に国の総合的な地震防災対策を推進するため、**地震防災対策特別措置法**が制定され、行政施策に直結する地震に関する調査研究に推進するため、**地震調査研究推進本部**が総理府に設置（現・文部科学省に設置）された。地震調査研究推進本部によって**活断層調査**、**地震の長期評価**、**地盤構造の調査**、**強震動評価**などを行い、その成果を総合した**全国を概観した地震動予測地図**、**リアルタイムによる地震情報の伝達**などの事業を行っている。
- ・**既存不適格建築**：被災した建物の大多数は1981年の建築基準法改正以前の古い建物であった（図10参照）。このため、1995年に**建築物の耐震改修の促進に関する法律**が制定され、公共建築・学校建築、大規模建築の耐震診断と補強が促進された。一方、一般の民間建築、特に木造住宅の耐震補強は殆ど進んでいない。
- ・**仕様設計と性能設計**：従来の建築基準法では建物各部の仕様が規定され、建物の総合的な性能（耐震性能など）が評価できず、建物オーナーへの**説明責任**も果たせなかった（**仕様設計**）。このため建物の持つべき性能を定め、それを目標とした設計法（**性能設計法**）の必要性が高まった。
- ・**建築基準法改正と限界耐力計算**：2000年に建築基準法が改正され、従来の耐震設計法（1981）に加え、**限界耐力計算法**が導入された。限界耐力計算法では、**稀に発生する地震動**（50年に1回程度）には**損傷限界耐力**（修復可能な耐力）を、**極めて稀に発生する地震動**（500年に1回程度）に**安全限界耐力**（倒壊しない耐力）を、それぞれ建物が保有することを確認する。その際、地震動は**工学的地盤**で与えられ、**地盤増幅率**、**地盤・建物の動的相互作用**、**建物の動的応答**を簡便な手法ながら計算することになる。一方、政令に定める基準に従った構造計算は性能規定化の基準法改正の主旨に逆行する、地震動に**震源近傍の強震動特性**や堆積盆地での**長周期地震動**が反映されていない、理解が困難で建築主事が従来の耐震設計法を要求する、などの問題点が指摘され、実際に使用されている例もまだあまり多くは無い。

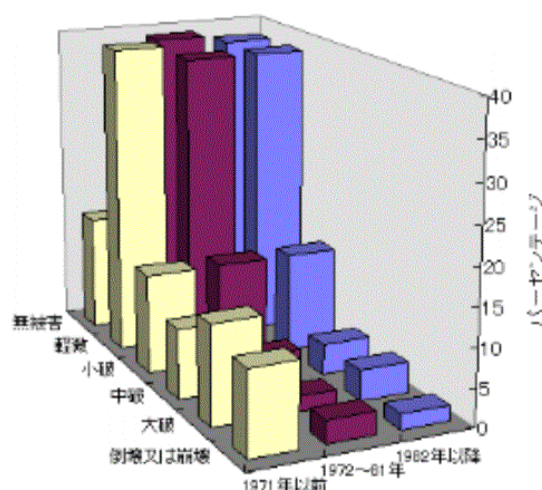


図10 阪神大震災のRC造建物の建築年別の被害

(<http://www.aij.or.jp/jpn/seismj/rc/rc2.htm>)

○その後の主な地震災害

- ・**1999年台湾・集集地震**：台湾中部の内陸活断層が破壊したM7.3の地震で、最大10mの断層すべりが地表に現れた（死者2440名）。地表断層すべりにより橋桁の落下、ダムの決壊などの被害が生じた。地表断層の近くで**断層すべりによる長周期強震動（fling step）**が観測されたが、短周期成分は小さく、振動による地震被害も軽微であった（図11）。
- ・**2003年十勝沖地震**：襟裳沖約80kmの沖合いで発生したM8.0プレート境界地震。津波により2名の行方不明者が出たが、地震規模の割に被害は軽微であった。**長周期地震動**による苫小牧市の**石油タンク**が炎上した。
- ・**2003年イラン・バム地震**：イラン南西部のMs=6.5の地震。多くの家屋は非耐震の日干し煉瓦・組石造であり、バム市とその周辺の人口約12万人の1/3（約4万人）が死亡した。歴史的建造物である**アルゲ・バム**も破壊され、歴史的建造物の保存・補修が課題となった。
- ・**2004年新潟県中越地震**：新潟県中越地方で起きたM6.8の内陸活断層による地震。大規模な**地すべり被害**を生じ、川口町で兵庫県南部地震以降初めての震度7を記録したが、被害の大半は古い木造建物であった。死者は40名であるが、大半（約30名）は地震後の疲労や**エコノミー症候群**などで死亡した。
- ・**2004年スマトラ島沖地震津波**：インドネシアのスマトラ島沖で発生したM8.7のプレート境界の巨大地震。津波によりインドネシア、タイ、スリランカ、インドなどインド洋沿岸で死者・行方不明者は約23万명에及ぶ大災害となった。



図11 台湾集集地震で出現した地表断層と傾斜したRC建物（軽微な被害）

参考文献

柴田明徳、最新耐震構造解析、森北出版、1981年

防災科学技術研究所、日本の地震活動 <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>

阪神・淡路大震災記念協会、阪神・淡路大震災教訓情報資料集 <http://www.hanshin-awaji.or.jp/kyoukun/>