

○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（980gal）。
- ・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340gal（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。

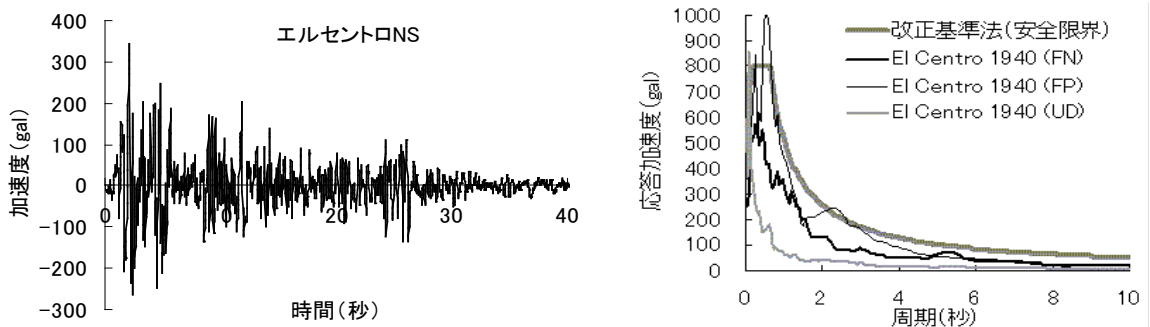


図1 エルセントロ波と加速度応答スペクトル（5%減衰・1質点系の地震応答スペクトル）

- ・1944年東南海地震：M7.9のプレート境界地震で、名古屋市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。
- ・1948年福井地震：福井市直下で発生したM7.1の伏在断層による地震。火災も多発し、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厚い沖積層等により全壊率は100%近くにも達する地域があり、気象庁震度階に震度Ⅶを新設した。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（許容応力度設計法。設計震度を0.2以上としたが、安全率は1/2となり、旧法と実質同等レベル。建築物の守るべき最低限の基準であることに注意）。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。地震による堤防沈下は、1ヶ月後の九頭竜川豪雨水害を生じるなどの複合災害を誘発した。

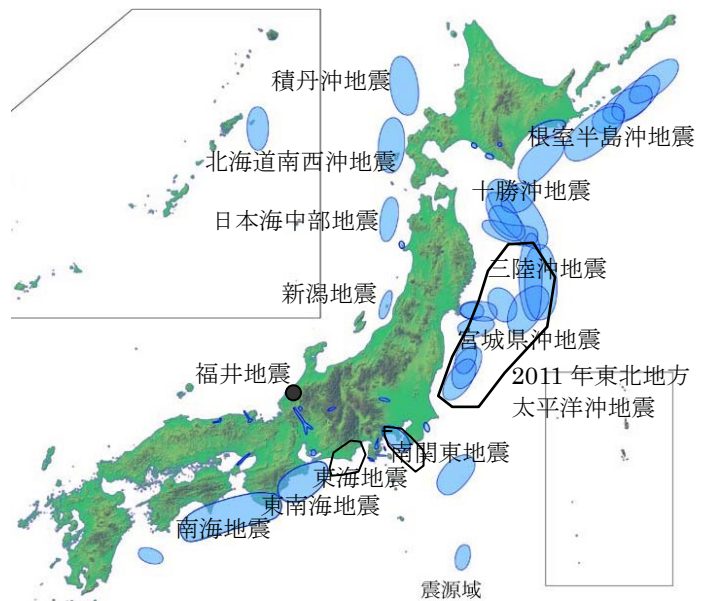


図2 主要なプレート境界地震
(<http://www.hp1039.jishin.go.jp/ecqchr/2-1.htm>に加筆)

- ・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20m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

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、強い振動をうけると、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/ssj/naifuru/pdf/nf-vol9.pdf>)

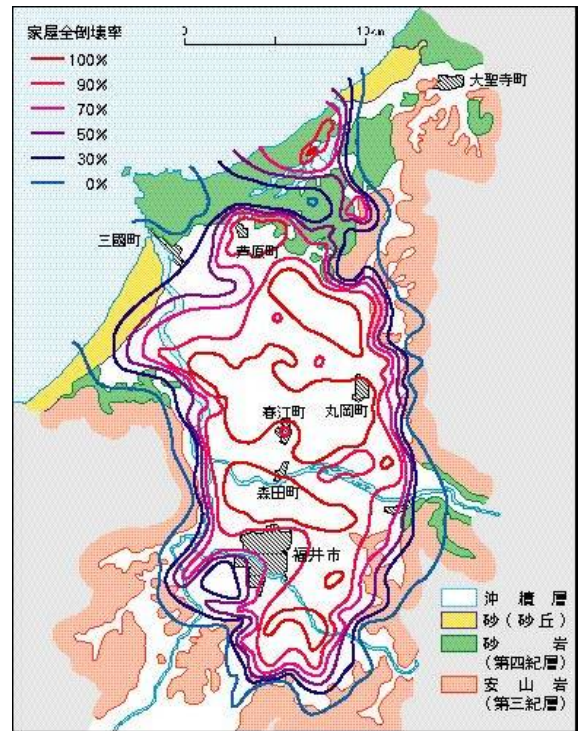
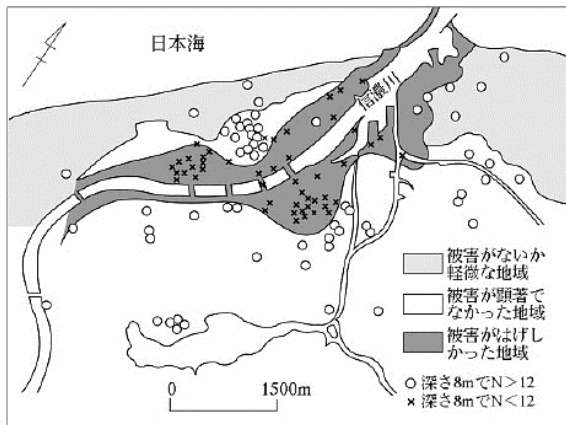


図 4 福井地震による家屋全倒壊率
(<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/f6-21.htm>)



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>)

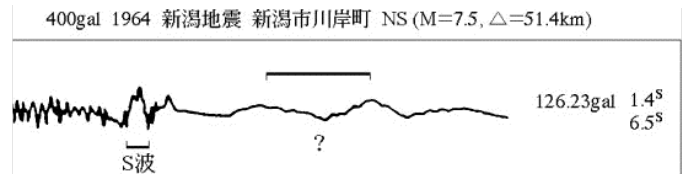


図 6 新潟市川岸町アパートの加速度記録と被害
(http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/ekijouka_map/q&a.html)

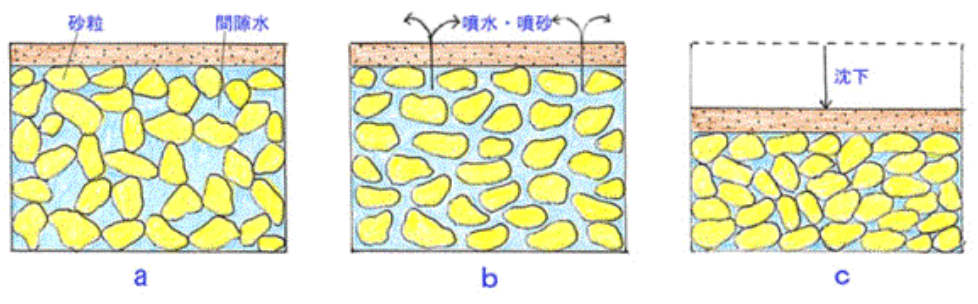


図 7 地震による飽和砂質土地盤の液状化現象
(<http://www.bosai.go.jp/library/bousai/manabou/index.htm>)

- ・**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。

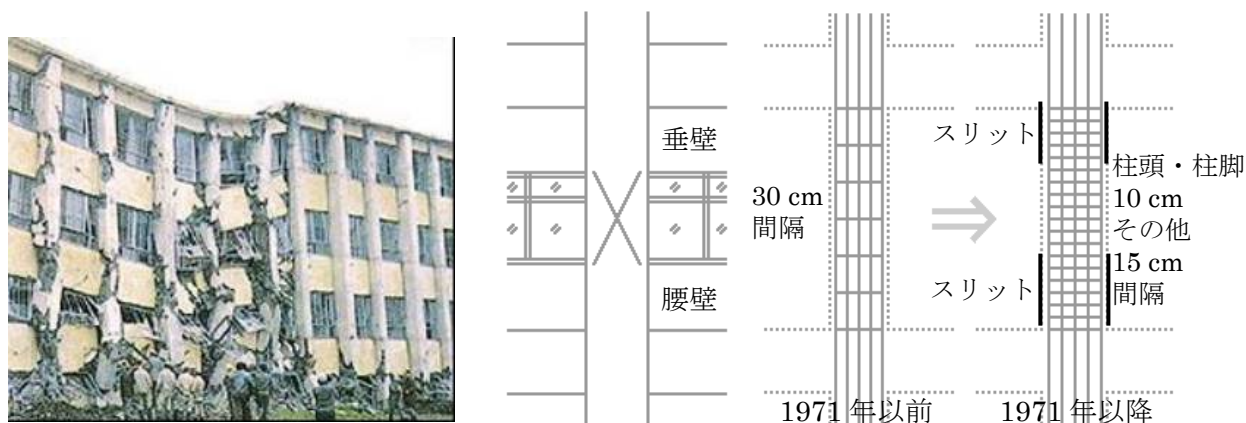


図8 十勝沖地震による函館大学の被害（左 <http://www.kajima.co.jp/tech/seismic/higai/030604.html>）と基準法改正によるRC柱せん断補強筋の強化（中、右 http://www.jsca.or.jp/vol2/15tec_terms/200403/20040320-2.html）

- ・**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**オリーブビュー病院**（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9km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營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。
- 2017年11月より従来の「東海地震に関連する情報」から「南海トラフ地震に関連する情報」へ移行
- ・**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、**ピロティ一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>)

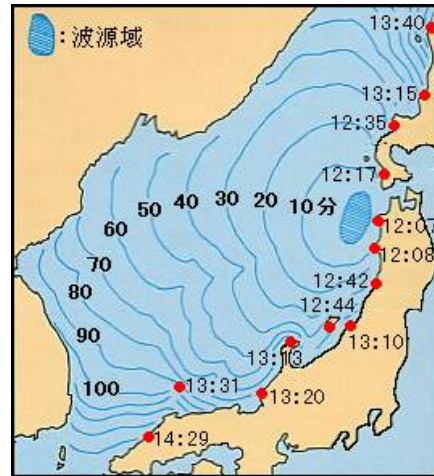


図10 日本海中部地震による津波の到達時間
(http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec5.3.htm)

- ・ **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 163 人、建物の全半壊 3,049 棟の被害を生じた (図 10)。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)。
- ・ **1989年ロマブリエータ地震**：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質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)。



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/>

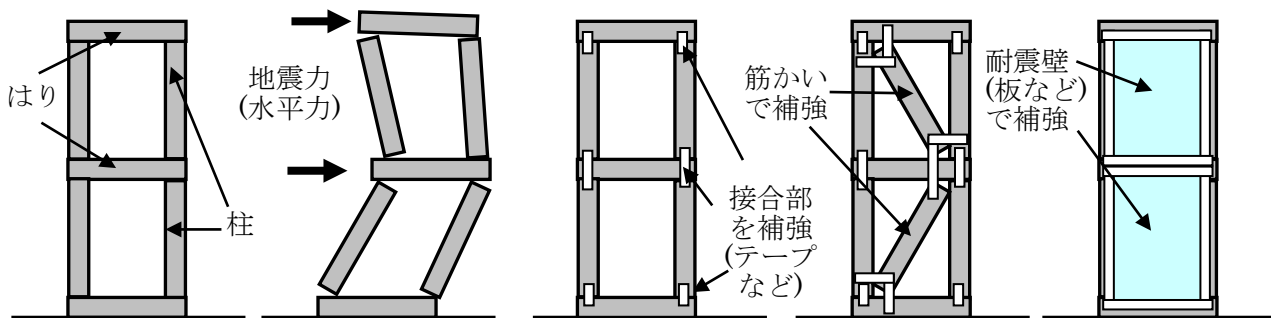
- ・ **1993年北海道南西沖地震**：北海道奥尻島の北約 80 km を震源とする M=7.8 のプレート境界型地震で、北海道・青森県の日本海側で震度 5 を記録した。津波被害が大きく、死者・行方不明者合わせて 229 名となった。特に、奥尻島では地震後 5 分程度で津波警報とほぼ同時に津波に襲われた。藻内地区で遡上高が 29m にも達し、島南端の青苗地区は火災もあって壊滅状態となった。1983 年日本海中部地震と併せて津波対策が大きな課題となった。このため、気象庁は、1999 年から津波データベースをもとにした新しい予報システムを導入し、津波災害の発生が予想される場合、地震発生後約 3 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さの公表は 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**オーリーブュー病院**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。

○地震工学・耐震工学の基礎 1

- ・ **建物に作用する地震力と耐震設計の基礎**：建物には常時1g (0.98 m/s²)の重力加速度が作用しており、上下に作用する加速度や荷重には強い。一方、地震動の主要動(S波)は水平方向に揺れ、建物には水平方向に大きな加速度と力(慣性力)が作用する。従って、耐震設計の基本は水平力に強い建物をつくることにある。例えば、積木の建物はかなり高く積上げることではできるが、水平に押すと簡単に壊れてしまう(図14)。水平力に強くするためには、接合部の補強や筋かい・耐震壁による補強(同図(b)-(c))が効果的である。但し、柱やはりの部材が非常に丈夫であることが前提である(木材や鉄骨部材など)。

- ・ **なぜ自重のみ考慮した建物(組石造など)は地震で危険か**：図15に示すように、レンガ・石造・日干し煉瓦(アドベ)などの組石造は原則として自重のみに耐えるよう造られている。従って地震のような何度も繰り返し作用する水平力を受けると一たまりもなく崩れてしまう。特に屋根も組石造の場合、重い落下物で多数の死傷者を生じる。またRC造(鉄筋コンクリート)でも自重のみ考慮し、細長い断面の柱を使用した場合、水平力で簡単に倒壊してしまう。図15の(a)、(b)は2003年イラン・バム地震のアドベとレンガ造の被害。M6.6の中地震だったが、バム市旧市街の80%以上の建物が倒壊し、死者26,271人から43,200人。図15の(c)は2001年インド・グジャラート地震(M7.7、死者約2万人)のブジ市の石造建物の被害。図15(d)は震源から約300km離れたアーメダバード市の倒壊した建物とほぼ同じ設計の高層マンション。



(a)積木建物と地震力による崩壊 (b)補強例1(接合部補強) (c)例2(筋かい補強) (d)例3(耐震壁補強)
図14 積木の建物と耐震補強例のイメージ



(a) アドベの地震被害(イラン・バム市) (b) レンガ造建物の被害(同バム市) (c) 石積建物の被害(インド・ブジ市)



(d) 一階の柱が細長い断面の高層マンション(インド・アーメダバード)

図15 自重のみ考慮した建物の地震被害例

○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の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11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：一般に対象地域の**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12）。**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12）。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12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12）。
- ・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、これを層高さ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。

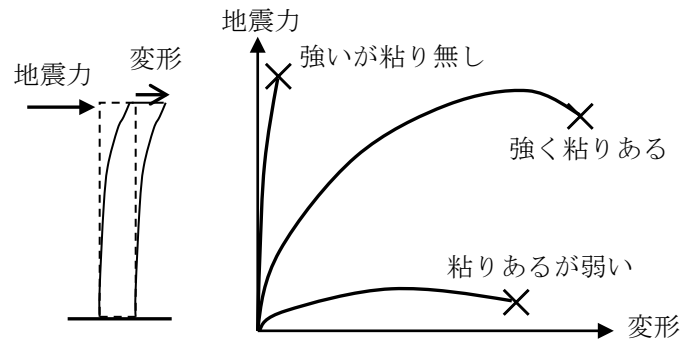
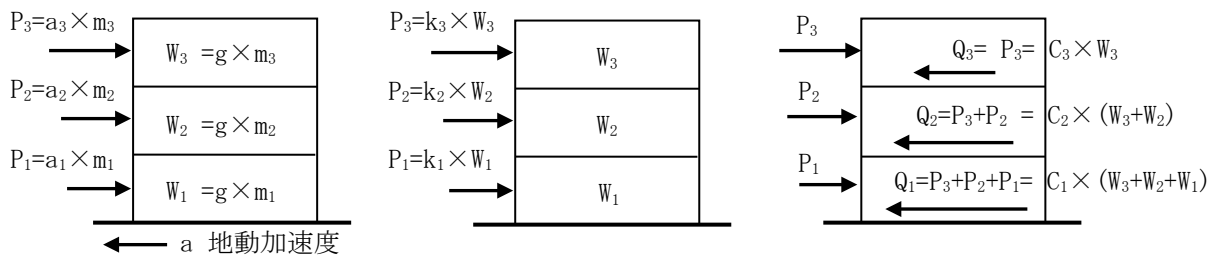


図11 強さと粘り



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12 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)

参考文献

- ・柴田明德、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>
- ・地震調査研究推進本部、相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）について、2014 http://www.jishin.go.jp/main/chousa/14apr_sagami/index.htm
- ・中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/kyoukun/index.html>