

教訓ノート1-2

1. 構造物対策

建築物への影響



GFDRR
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



世界銀行

著者

榎府龍雄：国際協力機構
石渡幹夫：世界銀行

教訓ノート 1-2

1. 構造物対策

建築物への影響

2011年3月の東日本大震災の強力な本震でも、振動による建築物への被害は限定的であった。現行の建築基準に従い設計された建築物や免震建物は、良好な挙動を示した。一方、建物の構造体ではない非構造部材の振動対策は十分ではなく、天井板の崩落などの問題が発生した。東京湾沿岸の埋め立て地や河川沿いでは液状化が発生した。東日本大震災の主な教訓として、耐震設計により建物被害を減らして死傷者の軽減が図れる、耐震性能の低い古い建物の耐震補強は被害の軽減に不可欠である、建築物の非構造部材が深刻な被害を引き起こすことがある、免震構造は有効に機能した、などである。以上の教訓を途上国に適用する場合には、国ごとの技術的・社会経済的条件を考慮に入れる必要がある。

知見

日本の建築基準の歴史

世界初の国の建築基準 日本は、その位置するプレート構造の特性から、大地震が発生しやすい。1923年の関東大震災では、地震により倒壊した建物により発生した火災が東京の大部分を焼き尽くし、10万人以上の人々が死亡し、日本史上最大の災害被害を被った(表1)。この震災から得た教訓に基づき、耐震設計基準が1924年の市街地建築物法に導入され、これが世界で最初の国レベルでの耐震設計基準となった。

地震被災調査に基づく建築基準の更新 大規模地震が発生するたびに、国と学界は建築物被害を詳細に調査し、それに基づき建築基準が改訂されてきた。その提案はその時々で最新の被災の教訓に基づいて行われてきた。1968年の十勝沖地震では、鉄筋コンクリートの建築物に深刻な被害をもたらし、1981年の建築基準の大改訂につながった。それまでの建築基準では横方向に建築物の総重量の20%の応力に対して建物構造は被害を受けないことが要件とされていた。改訂後の建築基準では横方向に総重量の100%の力に対

表1：日本三大震災の比較

震災名	関東大震災	阪神・淡路大震災	東日本大震災・津波
年	1923	1995	2011
マグニチュード	7.9	7.3	9.0
場所	東京および周辺地域	神戸および周辺地域	広範囲。津波が1,000kmの海岸線に被害を及ぼす
死傷者（死者と行方不明者）	105,385	6,437	19,845（2011年9月26日現在）
死亡の主な原因	火災	古い家屋の崩壊	津波（溺死）
条件	正午。住民は昼食をつくるのにコンロを使用していた。強風で火事が広範囲に広がり、3日間燃え続けた。火事から大小の旋風が発生。	夜明け前。就寝中の住民が、自宅の崩壊時に死亡。数は少ないが、電車や高速道路でも死亡者が出た。	午後3時前後。住民は学校または仕事に行っており、その場で避難指示が発令された

し、人命に被害を及ぼさない範囲での損傷に留まることが要件と変更された。

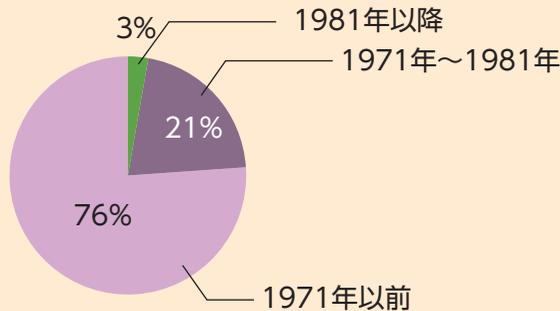
現行の建築基準（1981年） 1981年施行の現行の建築基準の概要は次のとおり。

- 建築物は、耐用年数内に数回発生が想定される地震に対して、構造に損傷を受けないこと。
- 建築物は、倒壊その他の深刻な被害を受けることなく、おおむね500年に1度の再現期間の巨大地震に耐えることができること。

さらに1981年以前の建築基準のもとで建設された既存の鉄筋コンクリートの建築物の耐震診断・耐震改修の技術的指針が作成された。

1995年阪神・淡路大震災後の耐震改修を促進する施策 1995年の阪神・淡路大震災は、死傷者6,437名、経済被害が推計1200億ドル以上という深刻な被害を引き起こした。倒壊した建築物のうち、97%は1981年以前に建設されたものである（図1）。この知見に基づき、政府は1995年に古い建物の耐震改修を促進する新法を施行した。

図1：建築の時期別の1995年兵庫県南部地震による倒壊建築物の割合



建築物の耐震改修の促進に関する法律（1995年）の規定により、国と地方自治体は、民間住宅の所有者に対して、以下に示すような奨励策を提供している。

- 耐震診断に対する補助金
- 改修費用に対する補助金
- 所得税・固定資産税の減税
- 改修費用に対する低利貸付

2011年4月の時点で、80%の自治体が耐震診断を促進するための助成制度を、64%の自治体が改修工事を補助する制度を設けている。2020年までに耐震建築物の割合を95%まで増加させることが、政府の目標である。2008年時点で耐震建築物の割合は79%であり、1050万戸の住宅が改修が必要であった。こうした施策にもかかわらず、2003年から2008年までの期間で、わずか300,000戸しか改修がなされなかった。住宅の所有者に補強工事を行う意欲を持たせるのは困難であることを示している。

東日本大震災による建築物への被害

大きな揺れに対しても被害は小規模 表2は今回の震災にて建築物に生じた被害の概要を示している。倒壊した住宅用家屋の多くは、地震ではなく津波に押し流されたり破壊されたりしたものである。地震の揺れによる死亡者数は200名未満と推計されている。

地震により非常に広範囲に激しい揺れが発生した。2,933ガルという最大加速度のピーク値は、宮城県築館町で観測され、6県の計18カ所の観測所で1,000ガルを上回る加速度が観測された。加速度が大きかったにもかかわらず、揺れによる被害は最小限にとど

表2：東日本大震災後による建築物被害

分類	軒数
住宅用家屋	
全壊	107,779
一部倒壊	117,019
焼失	263
一部破損	434,327
非住宅建物	32,445

出所：国土技術政策総合研究所及び建築研究所（2012）

図2：津波に押し流される家屋や車両



出所：山田町

図3 (上) : 津波が鉄骨構造の外壁を破壊

図4 (下) : 浸水を受けても津波に持ちこたえた鉄筋コンクリートの建築物。
車両が屋根の上にあるのに注意



出所：建築研究所および国総研

まっており、これは地盤振動の特性（卓越振動数が比較的高い）によるところもある。1981年建築基準やそれ以降の基準に従い建設された建築物への被害は限定的であり、基準の想定範囲内であった。

津波による深刻な被害 家屋被害の主な原因は、地震に続いて発生した津波であった。浸水高さの大きい地域の木造住宅の大部分は、押し流されたかまたは全壊した（図2）。鉄骨構造物の多くは深刻な被害を受けた（図3）。対照的に鉄筋コンクリート構造は、津波に対しては良好に機能し、多くの建築物は完全に浸水しても、構造的な被害は受けなかった（図4）。鉄筋コンクリートの建築物のうちで損傷を受けたものは、小型で杭基礎がない場合が多い（図5および6）。図7は損傷を受けた建築物だが、損傷の原因として考えられるのは、杭とフーチングの接合部が脆弱であったこと、津波の水圧が強力であったこと、液状化という要因の複合がある。

図5 (上) : 浮力により横転した鉄筋コンクリートの建築物

図6 (中) : 津波の洗掘による損傷を受けた鉄筋コンクリートの建築物

図7 (下) : 杭基礎を用いた鉄筋コンクリートの建築物の転倒



出所：建築研究所および国総研

建築物への地震対策の有効性

免震装置が良好に機能 建築研究所は、宮城県内の16棟の建築物すべての免震装置が良好に機能し¹、横揺れを40－60%低減させたと報告している。構造物または建築物内の機械・電気設備には損傷が見られなかった。また、備品や調度品で落下したのものもなかった。ダンパーや免震部分と非免震部分との間のスリットにかかったカバーは損傷を受けたが、これは想定範囲である。

耐震設計の向上と交通インフラの改修 1995年に起きた阪神・淡路大震災の後、橋梁等の主要インフラの大規模補強を、高速道路会社や鉄道会社、さらに政府機関が行った。結果として、東日本大震災では深刻な構造物の崩壊は回避された。JR東日本は新幹線の17,000本以上の橋脚を補強し、国は東北地方の490本の橋を改修した。同地方の国道にかかる約1500本の橋が深刻な損傷を免れた。ただ、5本の橋が津波により崩落した。損傷は全体としては限定的だったので、被災地の主要な高速道路や一般道路は地震から1週間以内に利用可能となった。しかし、津波被害を受けた沿岸地域の深刻な損傷については、復旧にさらに長期間を要した。東北新幹線は49日後に再開した(KN4-1)が、これは阪神・淡路大震災では、道路の復旧に18カ月以上を要し、新幹線の復旧に82日かかった状況に比べて大幅に改善された。

改善すべき点

建築物の非構造部材の被害 東日本大震災では、天井板、非構造部材である壁、仕上げ材等のついで多くの被害を生じた(図8)。これまで非構造部材に使用される多種多様な材料や設計・施工法を網羅する指針または基準は存在していなかった。また、日本にはこの問題に取り組んできた研究者は限られていた。

液状化 広範囲にわたる埋め立て地や河川沿い敷地で、液状化が発生した。地盤改良を行っていない敷地に杭基礎を用いずに建設された多くの戸建て住宅が被害を受けた(図9)。現行の建築基準法は鉄筋コンクリート等の構造基準において液状化を考慮しているが、大部分の住民が所有する戸建ての木造住宅の対策については考慮がされていない。国土交通省は、現在、上記の課題に対する指針を検討している。地方自治体の中には、建築物の所有者に対策を講じるよう促すべく、液状化ハザードマップを公開している。

造成宅地の崩壊による建物被害 仙台市では4000戸もの家屋が、強力な揺れによる宅地造成のための擁壁崩壊に起因する被害を受けた(図10)。1961年から、市役所は宅地造成等規制法により、丘陵地帯への住宅建設を規制していた。東日本大震災後による造成宅地の崩壊の多くは、この法律の前に造成されていた。2000年以降発生した地震によっ

1 免震構造物は、水平方向の変動を伝えないようにすることで、地震の振動の効果を減衰する。免震システムは、高品質ゴムパッドを備えた積層鋼板や、他のエネルギー吸収材料でつくられる。

図8 (上) : 落下した学校の体育館の天井板

図9 (下) : 液状化による家屋沈下



出所：建築研究所および国総研

て引き起こされた被害に対し、2009年に国が補助制度を整備し、自治体が危険度の高い地域での大規模宅地開発にて対策工事を行うことになった。しかし、仙台では2011年3月の震災時点では、調査は進んでいたものの、対策工事は開始されていなかった。

超高層ビルへの長周期地振動の影響 長周期地振動による、超高層ビルおよび免震建築物への潜在的な破壊的な影響が近年認識されてきている。近年では超高層ビルは長周期振動を考慮に入れ建設されている。いくつかの超高層ビルは、変形を抑えるかまたはエネルギーを吸収する装置を設置する改修がなされている。3月11日の地震に伴う長周期地振動は、東京（震源から約400km）、さらには大阪（同800km）まで達し、これら二つの大都市圏の超高層ビルに影響を与えた。長周期地振動によるリスクの重大性を認識して、政府は現在、構造物の設計手順、家具や備品の固定、詳細検査を必要とする超高層ビルの

図10：宅地擁壁の被害による損傷を受けた家屋



選別方法を内容とする技術的指針の改訂案を発表した。

教訓

旧基準による古い建築物の耐震改修の重要性 旧基準による建築物の耐震補強の重要性は、今回の震災からも明らかである。つまり、1981年建築基準法に従い設計された建築物や補強された建築物が良好な挙動を示した一方、損傷を受けた建築物の大部分が、1981年以前に建設され補強がなされていなかった。安全に対する投資する余裕がないか、または（高齢者の場合のように）投資する意欲のない所有者に対して、今まで以上に魅力的な奨励策の提供など、今後も補強に向けた努力が必要となる。さらに手の届きやすい改修方法が開発される必要がある。一部補強、安全スペース、安全ベッドが考えられる対策の例である。

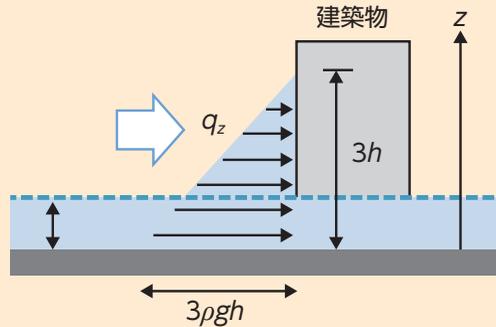
図 11：新旧の津波波圧の算定法

2005年版指針

設計波圧

$$q_z = \rho g(3h - z)$$

設計波高： h



2011年版指針

$$q_z = \rho g(\alpha h - z)$$

$$\alpha \rho gh \quad (\alpha = 1.5-3.0)$$

建築物の非構造部材の安全 東日本大震災により地震に対する非構造部材の安全性を確保する重要性が明らかになった。非構造部材の材料、設計および施工方法は多種多様である。この非構造部材の耐震性を確保するために、技術的指針が必要である。

建築物の構造上の安全及び機能の確保 構造体が地盤振動を持ちこたえ、居住者の生命を守ったとしても、壁や扉が変形すると居住の継続が困難となる。非構造部材の壁面に大きいクラックが生じたため、居住者が住むのは危険だと見なされた事例があった。構造上の安全に加えて、できる限り日常生活が継続できるようにする努力が求められる。

液状化と地すべり 液状化と地すべりに対する対策を強化していくことが求められる。東日本大震災後に、政府は液状化リスクの評価方法を見直した。さらに効果が高く実施しやすい対策工法が必要となる。政府は、液状化によるリスクについて、住宅購買者に周知する方策を検討している。また、住宅の近隣の急傾斜地の対策工事に補助金を提供している。

巨大地震への対応 東日本大震災の経験により、三つの大規模地震（東海地震、東南海地震、南海地震）が連続して発生して巨大地震となりうる可能性が懸念されている。このような一連の地震は、強力な長周期地振動を発生させる可能性が高い。既存建築物の改修が新たな指針に従って実施され、揺れの拡大の防止、建築物のエネルギー吸収や構造体の変形の抑制による揺れの拡大を防止することにより、長周期地振動によるリスクを低減させる必要がある。

免震建築物 免震建築物は、東日本大震災時に良好な挙動を示し、地震後も建築物を使用することができた。

途上国への提言

建築物の耐震性が最も効果の高いリスク軽減対策に 地震によるリスクを軽減するために、もっとも基本的でもっとも効果の高い対策は、地振動に強い建築物を建設することにある。途上国の多くの建築物は、地震の揺れに対して極めて脆弱である（図12）。

途上国にふさわしい技術の利用 世界中で、さまざまな耐震設計指針が策定されているが、先進国の指針を途上国に直接適用するのは、その費用、大工の限られた知識や技能、建築現場の限定された工具や設備の面から適切ではない。必要なのは現地の条件に適合しつつも建築物の耐震性を向上させることができる耐震設計指針である。

知見と教訓を、地元の条件に適応させる インドネシアでは、自国の技術的能力などに合わせて簡略化した技術的指針が、国際協力機構（JICA）からの支援を受けて策定され、普及活動が続いている（Box 1）。現地での詳細な調査に基づく知見と、技術者、作業員、政府職員、建築物所有者の意欲により、建物の安全性は向上し得る。緊急活動拠点、消防署、病院、または避難場所といった重要な建築物に耐震性を持たせながら、実地研修を通じて技術者の知識と技能を高めるパイロットプロジェクトは効果的なアプローチとなり得る。

建築基準の施行 もう一つの問題は、建築基準を適正に施行し、その状況をモニタリングすることである。法令には、建築許可の発給、現場検査、基準の遵守に関する規定が含まれなければならない。建築基準の施行には、訓練された十分な知見と技術情報へのアクセスを有する多くの行政官と検査員が必要となる。

日本では、建築基準法は、図13に示した実施体制を規定している。自治体の行政官（建築主事）（または「指定確認検査機関」）は、建設前、建設中、および建設後にチェックを行う。建築基準に準拠していることが確認されれば、建築主事（または「指定確認検査機関」）は建築確認証を交付する。中間検査は、一定の構造または用途の建築物に対して行われる。集合住宅、複数階の建築物および公共の建築物は、通常この検査を受ける。

歴史的建築物の改修 脆弱な歴史的建築物を数多く抱えた国では、補強は大きな問題である。費用と効果のバランス、そして、所有者、行政と政治家のモチベーションのバランスを取って、補強が検討される必要がある。

非構造部材の安全の確保 非構造部材の安全性は、問題となる部材は異なるが、途上国との共通の問題である。非構造部材である壁、屋根材料、破風や看板等装飾部材は、被災

図 12：倒壊した校舎。
棚は倒れていない（ジョグジャカルタ特別州年ジワ島中部地震後）



地域の現地調査で見られる問題部材である。この問題を複雑化させているのは、材料と設計の種類が多いことと、専門とする技術者の不足がある。建築物の外壁の非耐力壁は、歩行者にもたらすリスクを考慮すれば、最初に規制が加えられるべきである。この問題に対応するためには、屋根材料の場合、製造メーカーと技術者とが、工法と材料の改良に取り組む必要がある。また、建設作業員に対する訓練も必要である。

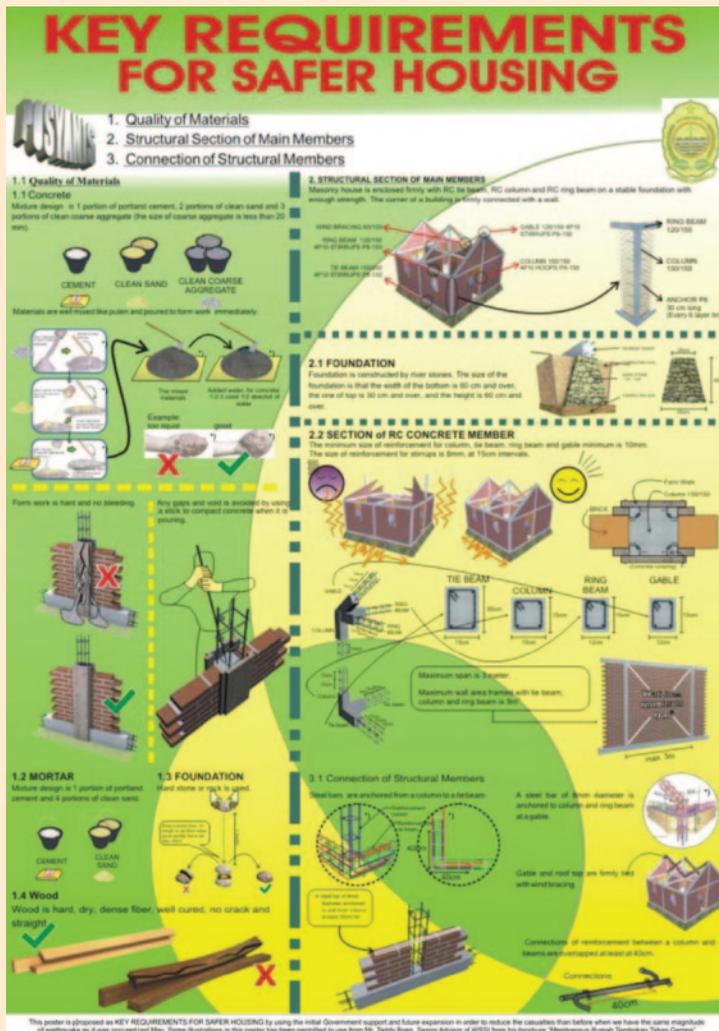
構造物の過大な変形の防止 日本の専門家は、構造物の過大な変形を抑える方法についての検討を重ねている。これは、耐震設計基準で日本よりも大きな変形を許容している国にとっても有益な検討である。

津波に対する準備 日本の津波避難ビルに関する知識と経験は、インドネシア等津波にさらされている他の国にとっても有益である。バンダ・アチェの津波避難ビルは、日本の技術協力の一例である（Box 2）。

免震の活用の促進 免震機能を備えた建築物は、東日本大震災でも被害が非常に小さかった。さらに多くの主要な公共施設、特に、救助や緊急対応に使用される施設、すなわち避難所や消防署は、免震を用いて建設される必要がある。容易で手の届きやすい免震の技術が、途上国での活用のため開発される必要がある。

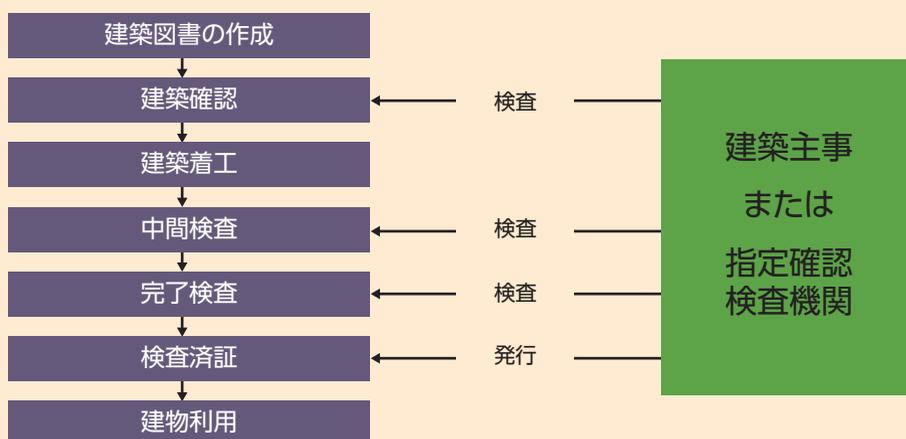
Box 1 : インドネシアのシンプルな技術的指針と、その建築許可を通じた普及

2006年ジャワ島中部地震は甚大な被害を出し、多くの家屋の倒壊により、約6,000名の命を奪った。住宅の復興に際し、州政府は小規模平屋建ての住宅の技術的指針を策定した。この指針は、1枚のポスターに示すことができるほどシンプルなもので、住民に十分に受け入れられている。中央政府は、建築許可制度を通じ全国に適用することを決定した。



出所：国際協力機構（JICA）

図 13：日本の建築許可の過程の流れ



Box 2：日本の技術的指針を適用した津波避難所

バンダ・アチェは、2004年のインド洋津波で大きな被害を受けた。津波により壊滅的打撃が発生したにもかかわらず、地元住民は、生活が海と密接に結びついているため、沿岸地域に戻ってきた。沿岸部には適切な避難場所がなかったため、避難ビルの建設が進められている。JICAが日本の技術指針に基づいた鉛直方向に避難できる避難ビルの建設を支援している。この避難ビルは、2012年に供用開始された。



出所：JICA.

著者

榎府龍雄：国際協力機構

石渡幹夫：世界銀行

主要参考文献

Architectural Institute of Japan. 2011. *Preliminary Reconnaissance Report of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyo-Oki Earthquake*, MLIT (In Japanese).

<http://www.mlit.go.jp/>

BRI (Building Research Institute).

<http://www.kenken.go.jp/english/index.html>

Cabinet Office of Japan. <http://www.bousai.go.jp/>

Japan Meteorological Agency. <http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>

Narafu T., et al. 2008. "Basic Study for Bridge between Engineering and Construction Practice of Non-engineered Houses". In *Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

<http://www.bosai.go.jp/e/>

NILIM (National Institute for Land and Infrastructure Management), and BRI. 2012. *Summary of Field Survey and Research on the 2011 Earthquake off the Pacific Coast of Tohoku*.

NILIM. <http://www.nilim.go.jp/english/eindex.htm>

水谷武司 (2012) 「2011年東北地方太平洋沖地震の津波による人的被害と避難対応」『防災科学研究所主要災害調査』(48) 防災科学技術研究所