

## 地震防災の中長期的課題と戦略 —都市空間安全制御の観点から—

### Mid and Long-Term Issues and Strategy for Earthquake Disaster Prevention - From a View Point of Safety Control of Built Environment -

川瀬 博

Hiroshi KAWASE

#### Synopsis

This manuscript describes the important yet remaining issues for earthquake disaster prevention and risk reduction on urban built environment and effective strategies for it under the foreseeable mid or long-term considerations. The fundamental problems in the current seismic safety of buildings are primarily based on the non-rational and quite obsolete code implementation in the Japanese building code. The situation has been proved to be true as pro-side during the Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (the Great Higashi-Nihon Disaster), while as down-side during the Kobe Earthquake (the Great Hanshin-Awaji Disaster). The author summarized what we have to learn from these painful lessons and proposes a new strategy directly derived from the summaries based on the previous experiences without preoccupation.

**キーワード:** 建築基準法, 剛構造論, 強震動予測, やや短周期パルス

**Keywords:** building code, rigid structure concept, strong motion prediction, moderately short-period pulse

#### 1. はじめに

工学の世界では基本的にものをづくりだすことがその使命であるので、如何にものをつくるかを日々研究しているのであるが、実際できあがったものをつくろうと意図したものと必ずしも同じとは限らない。そこに事故や災害の発生する余地(リスク)が存在しており、特に人工環境(built environment)と呼ばれる建築構造物や土木構造物の場合には、その長い寿命の間に様々な自然現象による外力を受け、それに作り出した構造物が耐えられなかった場合には構造物に被害が生じ、そのレベルによっては人的損害も生じることとなる。これら工学の世界における防災研究においては、まず作られたものは設計通りにできているものであるという仮定なしに、虚心坦懐に、あたかも自然にできたものであるかのようにこれを扱い、そこから生じるすべての事象を把握し、

その事故や災害の生成メカニズムを解明する必要がある。設計の世界は、自然現象による外力の絶対値がどのようなものであれ、出来上がった人工物がその最大値に耐えるものであればよい、すなわち「結果オーライ」な世界であるが、防災研究の世界は、将来の自然現象の予測に基づいて実行可能な対策を考える世界なので、外力も構造物も現実的なものである必要がある。

しかし工学の世界において、真実を知らずとも本当に常に「結果オーライ」になるようにものづくりができるのであれば、初めから事故も災害は発生せず、したがって防災研究は不要なのである。そもそも外力を完全に知ることと構造物の性質を完全に知ること人間にはかなわぬことである。したがって我々にできることは、人知のおよぶ範囲で、できるだけもっともらしい外力に対して、できるだけもっともらしい構造物の性質をもって、許容できるコス

トのもとで安全性を確保する手段を講じ、それが破綻するリスクを定量的に評価してそれが許容できるレベルであるかどうかを検証することであろう。

翻って人工環境の世界を見れば、残念ながら「結果オーライ」になるようにそれがつくられていないことは、地震の度に震害が生じていることから明らかである。それは外力がもっともらしいものになっていないことと安全性の評価に用いている構造物の性質も現実的なものとなっていないことの両方に起因する。当然のことながら現在の構造物の震害リスクは定量化されておらず、経験的に評価する以外にこれを検証する方法は未だ十分に確立されていないと言わざるを得ない。

本論文では、これらの人工環境の耐震設計に関係した我々が抱える現状の課題を、東日本大震災と阪神・淡路大震災で我々が目の当たりにした現実に基づいて改めて整理し、それを解決するための防災研究の基本戦略について論じたい。

## 2. 東日本大震災の震害

本章では、まだ記憶に新しい2011年東北地方太平洋沖地震による東日本大震災の際の震害、すなわち地震動による構造物の振動被害について総括する。

東日本大震災の死者・行方不明者合わせて18,550人、および全壊家屋126,467棟(平成25年7月10日警察庁調べ)の大半は津波被害によるものと推定される。実際、河北新報(2013)によれば、地震の揺れを原因とする死者は判別しただけで90人とされ、津波の犠牲者とされている中には震害により死亡した後に津波にのまれたケースもあると想定されることから、震害の犠牲者は90人以上と報じている。しかしこの90人中30人は土砂崩れ・ダム決壊・落石の犠牲者で、構造物や非構造物・家具等の直接的震害によって死亡した人数は40人程度とされている。

上記の調査された126,467棟の全壊家屋中、何棟が震害によるものだったかについては統計結果がないが、一つの指標として応急危険度判定結果が国土交通省(2011)から報告されており、東北地方太平洋沖地震による集計結果では11,699件が危険(いわゆる赤札)とされている。応急危険度判定は必ずしも家屋そのものの危険性を示すとは限らず、後背地のがけ崩れの危険性がある場合や液状化等によって傾いた場合なども立ち入りを一時的に制限するために危険と判定される。しかし死者発生率が全壊家屋に対して0.5%~1%程度であることを考えると、震害による全壊家屋は8000棟~1万棟、それを直接的原因とする死者数は40人~100人という概略の推定が成立する。

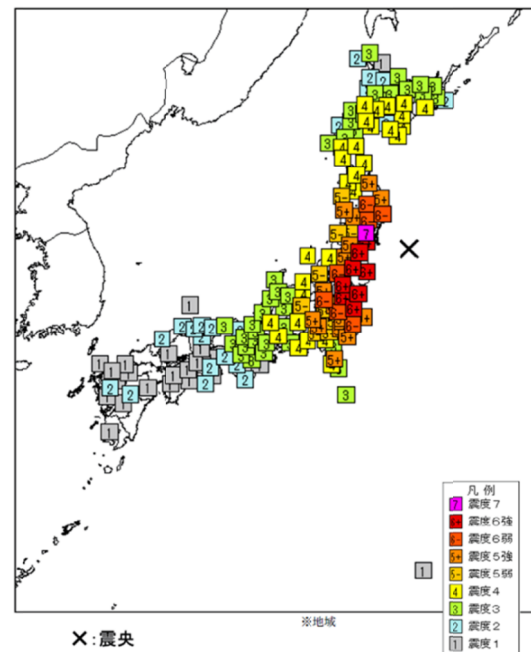


Fig.1 JMA seismic intensity distribution for the main shock of Tohoku earthquake of 2011 (JMA, 2011).

一方、観測された強震動のレベルでみると、東北地方太平洋沖地震は極めて加速度レベルの大きい地震動を東北地方および北関東地方にもたらしている。Fig.1にはその震度分布(気象庁, 2011)を示したが、震度7となったのは栗原市(K-NET Tsukidate, MYG004)の1地点だけであったが、震度6強を示した観測点は4県40地点に及んでいる。また、この地震によりK-NET/KiK-netだけでも18地点で1,000galを超える強震記録が計測されている(防災科学技術研究所, 2011)。

東北地方で観測された地震波の特徴はその加速度波形が明瞭な2つの波群から構成されていることである。2つの波群のうちの後半の波群の方が前半のそれよりも大きく、その後半の波群の最大値は全継続時間中100秒程度で発生している。Fig.2にMYG004での波形を例として示す。ただし関東地方では総じてこの2つの分離した波群は見られない。これらの特長は強震動生成領域が3つ、4つ、ないしは5つ独立に存在し、断層全体の破壊の進展に伴ってそれらが連続的に破壊したと考えると説明できることが複数の研究者によって示されている(Asano and Iwata, 2012; Kurata and Irikura, 2012; Kawabe et al. 2012)。このことは、今回の地震は、強震動生成能の観点だけでいえば、単独でも破壊可能だった複数セグメントの連続的破壊に過ぎず、M9クラスの破壊に相当するものだったとは言えないということの意味するが、それが本来のM9クラスの地震の本質なのか、今回のイベント固有の様相だったのかは現時点では不明であり、今後の重要な研究テーマである。

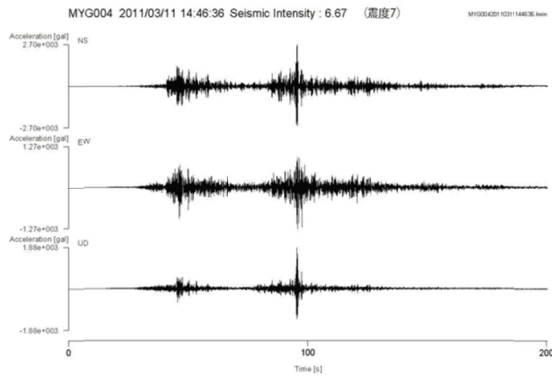


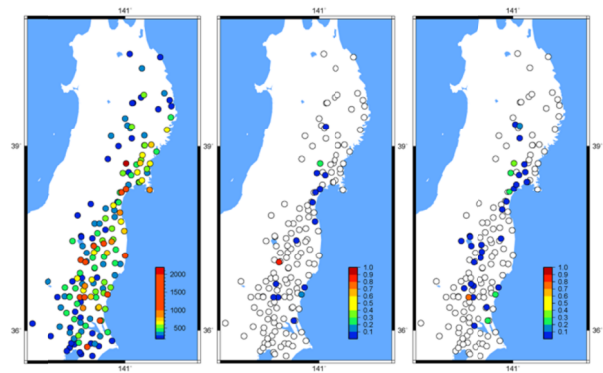
Fig.2 Acceleration time histories of three components of ground motions observed at K-NET Tsukidate, MYG004 (NIED, 2011).



Photo 1 Situation around the K-NET Tsukidate, MYG004 site (Morikawa and Goto, 2011).

いずれにしても、観測された大加速度の割に構造物の震害は極めて軽微であった。例えば土木学会土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団の調査速報会報告(盛川・後藤, 2011)にはPhoto 1に示したMYG004観測点近傍の地震後の状況が報告されているが、2,933Galという過去最大の加速度が観測されたにもかかわらず、近隣の小学校の体育館の天井に被害が生じたり、墓石が多数転倒したりはしているが、構造物に対する大きな震害は見当たらない。同様の調査結果は筑波大学の境教授によってもなされており、震度6強以上のほとんどの観測点で、震度6強で想定されているレベルの震害が生じていないことを報告している(境, 2011)。

著者らは建築学会の報告書において(川瀬ら, 2011)、後述する兵庫県南部地震の神戸市内における大破以上の被害を再現できる構造種別・年代別の非線形被害予測モデル(長戸・川瀬, 2001)、通称「長戸・川瀬モデル」によって構造物被害率を推定した。



最大加速度 RC造9階建(新耐震) S造5階建(新耐震)

Fig.3 Peak ground accelerations and estimated damage ratios of buildings at K-NET and KiK-net sites (Kawase et al., 2011).

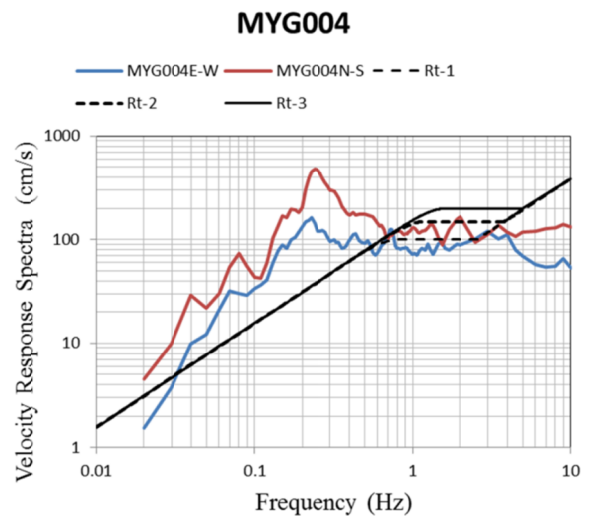


Fig.4 Comparison of observed velocity response spectra at K-NET Tsukidate (MYG004) site and current levels of seismic code requirements for three ground conditions (Kawase et al., 2011).

その結果、Fig.3に示したように、9階建ての鉄筋コンクリート造構造物にも5階建ての鉄骨構造物にもほとんど重大な被害は生じないという推定結果となった。

これらは現実の構造物は短周期レベルに如何に大きなエネルギーが含まれている地震入力を受けようとも(平均的には)びくともしないことを示している。Fig.4には栗原市のK-NET Tsukidate(MYG004)における観測加速度記録の応答スペクトルを現行の建築基準法上の規定の2次設計レベルと比較して示すが、一般構造物の周期帯域である0.05秒から0.5秒の周期帯では2次設計レベルを大きく上回るパワーがあるが、その周期帯の構造物(一般的な階数10階以下の構造物は木造家屋も含めすべてこの周期帯に含

まれる)に大きな被害が出たわけでは全くない。

### 3. 阪神・淡路大震災の震害

一方、今から18年前の1995年の兵庫県南部地震では、いわゆる阪神・淡路大震災が引き起こされ、6500人近い人的被害と10万棟の全壊家屋が生じ、長年に渡り苦渋の復旧・復興活動を余儀なくされた。この地震は、気象庁マグニチュードは7.3とされているが、その物理的震源特性を最もよく反映するといわれているモーメントマグニチュードは6.9に過ぎず、巨大地震とは言えない地震であった。

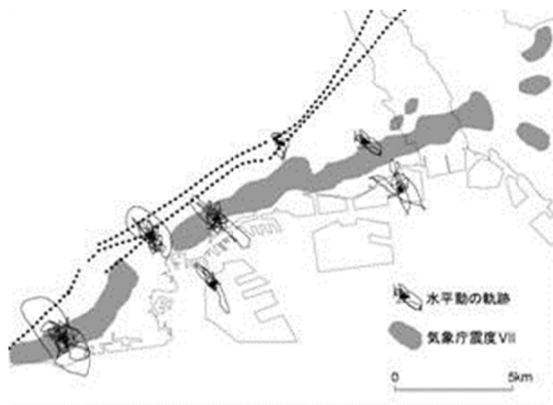


Fig.5 Trajectories of velocity seismograms at the observation sites and the JMA seismic intensity 7 areas in Kobe during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (Matsushima and Kawase, 2009).

兵庫県南部地震で構造物被害があればほど大きくなった理由は単純に言うと3つある。

その第一は震源特性であるが、それは単純に内陸直下型地震だったので震源が近かったというような話ではなく(もちろんそれは重要であるが)、震源破壊過程の不均質なすべり量分布(そのすべり量の大きい領域をアスペリティと呼ぶ)により生じた「アスペリティパルス」がやや短周期域(その周期範囲は後述)に特に集中的にエネルギーを有していたからである。震源近傍の地震動に特徴的なこのパルスを「ディレクティビティパルス」と呼ぶ人もいるが、破壊の伝播が波動の伝播と相まってエネルギーがある方位に集中するディレクティビティ効果はもちろんパルス生成の必要な要素ではあるが、そもそも震源近傍の地震動がやや短周期パルスとなるのは、サイズが有限のアスペリティがあるからなので、パルスという言葉はアスペリティと結ばれるべきなのである。Fig.5には神戸市内における観測波形のオービットを震度7の領域とともに示したが、いずれも震源

メカニズムから推定される通り、断層直交成分の卓越したパルス状のオービットを示している。Fig.6にはこれら震源域での観測波形が再現できるようにチューニングした松島・川瀬(2008)の5アスペリティモデルを示す。

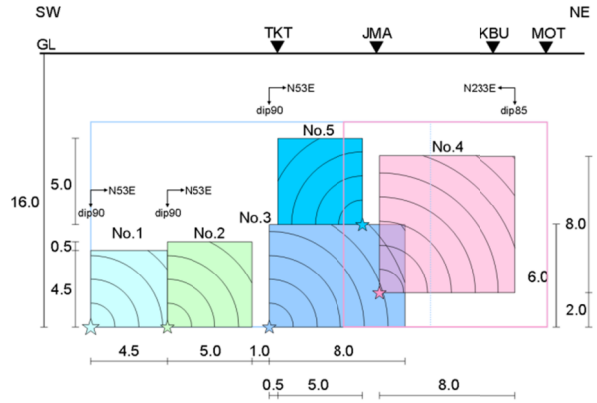


Fig.6 Distinctive five asperity model proposed by Matsushima and Kawase (2009) for the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. Three initials are observation sites.

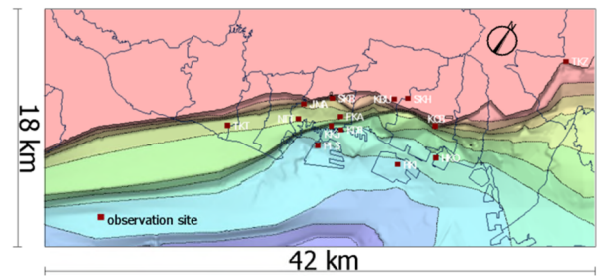


Fig.7 Three dimensional basin structure used by Matsushima and Kawase (2009) for the strong motion simulation of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. Red squares are observation sites.

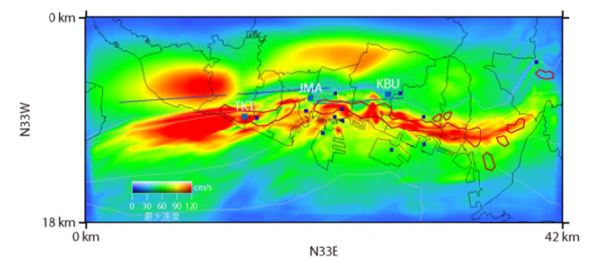


Fig.8 Peak ground velocity distribution of simulated ground motions on the engineering bedrock calculated from the five asperity model and the 3D basin structure (Matsushima and Kawase, 2009).

第二の理由は地盤増幅、それも深部地盤の増幅である。Fig.7には松島・川瀬(2008)が用いた三次元地盤構造モデルを示すが、神戸の地盤は六甲断層系に

よって大きな段差構造となっており、山地境界において600mから1,000m程度の段差が生じていた。この段差構造により、震源から上昇し盆地内を伝播して地表に達する直達S波と、岩盤側に先に到達してまだ波動の到達していない盆地側に水平に射出される盆地生成回折波と表面波が、盆地端部から少し離れた場所で強め合い増幅する現象が生じたことが明らかにされている。これこそが神戸側に10km以上に渡って生じた被害集中帯、いわゆる「震災の帯」の生成原因であり、この盆地端部特有の増幅効果を我々は「エッジ効果」と名付けた。このエッジ効果により、震源で生じた周期約1秒のアスペリティパルスは岩盤では50cm/s程度であったのに、盆地側1km地点では120~150cm/s以上に達したものと推定された。Fig.8には松島・川瀬が5アスペリティモデルと三次元地盤構造により再現した工学的基盤上での最大速度分布の推定値を示す。

さて第三にして最大の理由である。すなわち震源と地盤の影響により、周期1秒前後の大振幅速度パルスとなった地表面の地震動が構造物に入射したことで、巨大なエネルギーが構造物に流入することとなった、これこそが構造物被害の最大の原因である。すなわち「やや短周期パルスの構造物破壊能こそが最強だ」ということなのである。その理由を詳しく解説しよう。

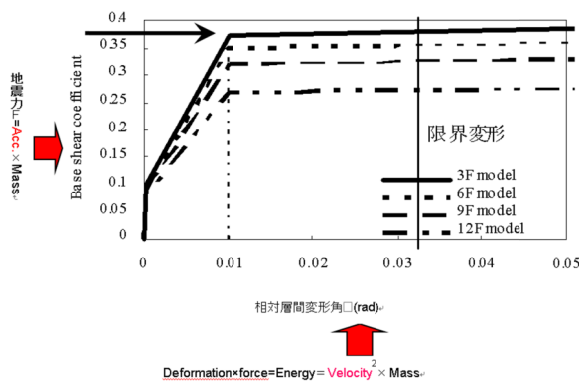


Fig.9 Nonlinear hysteresis curve (three connected lines) for ordinary Reinforced Concrete buildings (Nagato and Kawase, 2001). The maximum value in the base shear coefficient is the yield strength and the maximum value in the relative deformation angle is the deformation limit, which is assumed to be 1/30.

Fig.9には現在の鉄筋コンクリート構造物の非線形履歴特性の概略の形（骨格曲線）が書かれている。横軸はある層の水平変形量を高さで割ったせん断変形角で、縦軸はある層より上部に慣性力として生じる水平力（層せん断力という）である。この曲線（図

では3本の折れ線で表現されている）の上をたどって慣性力が大きくなるにつれて変形も大きくなる。ある限界に達すると力はそれ以上増えず（この力の限界値を降伏耐力と呼ぶ）、変形だけが進行する。限界に達してから変形がある量になったときに慣性力の向きが逆転すると、第二の折れ線の傾きでもって変形と力が減少し、さらにマイナスになると今度はマイナス側でも同じ上限値に達して変形だけが進むことになる。これを地震動が継続する間、繰り返しているのが構造物の応答である。

ここで注目すべきは横軸の限界である。一度縦軸が限界値に達すると変形は、ほぼ水平となっている降伏耐力レベルの線上を横に異動するのであつという間にその上限値、すなわち限界変形に達してしまうように思える。限界変形（鉄筋コンクリート造・鉄骨造で1/30、木造で1/10と我々は仮定している）に達するという事は、主要構造部材（壁や柱）に大きなひび割れが生じ、重力を支えきれなくなってもとに戻すことができない大被害が生じること＝大破することを意味する。従って慣性力だけを考えると、それが大きくなるとすぐにでも構造物は壊れるように思えてくる。縦軸の慣性力は、ニュートンの力学第二法則により、構造物の質量とそれに生じる水平加速度の積に比例する。従って水平加速度の大きな地震動ほど縦軸のレベルは大きくなる。であれば構造物の大被害は加速度だけで決まってもいいような気がする。しかし現実にはそうっていない。

実は構造物に生じる力が降伏耐力に達して変形が進んでいく際の変形量を決めるのは速度なのである。なぜならFig.9の履歴特性で、曲線より下の部分の面積は力×変形でエネルギーに相当し、変形が進むにつれて構造物はその運動を履歴エネルギーとして部材に蓄えるのである。地震動のエネルギーを構造物が吸収する際に履歴特性の下部の面積に相当するエネルギーを蓄えるので、入力するエネルギーが大きければ大きいほど変形が大きくなる。入力するエネルギーは地震動の最大速度の二乗に比例すると第一次近似的に考えられるので、破壊に直結する構造物の変形量は地震動の最大速度に比例するのである。この構造物の破壊は構造物が吸収できるエネルギーで決まることを世界で最初に見出したのは京都大学工学部建築学科の若き棚橋諒先生であり、1935年のことである(棚橋, 1935)。超高層の時刻歴応答解析から新耐震設計法、限界耐力計算法も含め、今日の耐震計算法はすべからくこのエネルギー原理に基づいているといつてよい。

ともかく、概略Fig.9の縦軸が最大加速度、横軸が最大速度で規定されているとすれば、大破に至るような大変形が生じるためには、地震動は最大加速度

も最大速度も大きなものである必要がある。Fig.10には最大加速度—等価卓越振動数ダイアグラムを示す。

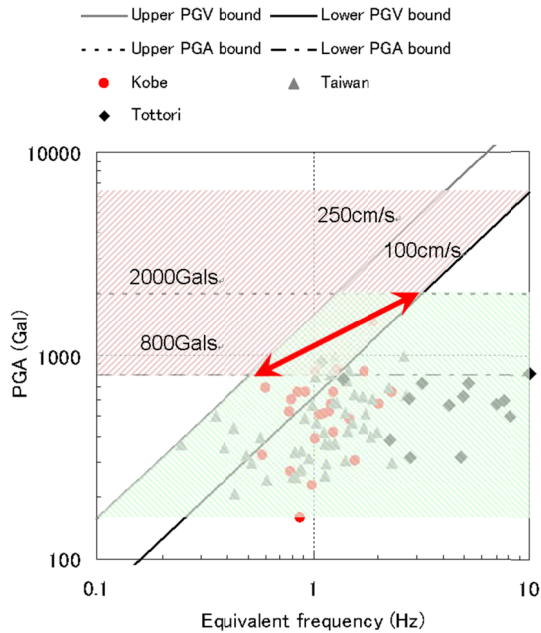


Fig.10 Peak ground acceleration versus equivalent frequency (PGA/2π PGV) diagram. Equi-velocity lines would be lines from lower left to upper right (PGV=100cm/s and 250cm/s). The red shaded zone corresponds to the heavy damage possibility limit while the green shaded zone corresponds to the physical possibility limit.

この図は横軸に最大加速度を $2\pi \cdot$ 最大速度で割った等価卓越振動数を取り、縦軸に最大加速度を取ったもので、観測値の最大速度と最大加速度が分かれば1点がプロットできるものである。図には兵庫県南部地震や1999年台湾集集地震、2000年鳥取県西部地震のデータがプロットされている。この図で等速度線は斜め45°のラインで示される。神戸や1994年ノースリッジ地震などの記録と大被害の対応などから、大破する構造物が生じる最低限界の最大加速度を800Gal、最大速度を100cm/sとすると、図の2つのラインより上のピンク色に塗った領域に落ちる地震動の地点では大被害が生じる可能性があるということになる。このままではその卓越振動数に制限はなく、どのような振動数が卓越していたとしても2つの条件は満足されることになる。しかし最大加速度と最大速度に物理的な上限があるとすると状況は異なってくる。実際に上限があるかどうか、そして上限値はいくつかについては簡単に決めることは困難であるが、ここでは簡便のため観測の上限として、最大速度で250cm/s、最大加速度で2,000Galを考えて線を引いている。後者に関しては築館の記録で破られて

しまっているので3,000Galで引き直してもかまわない。いずれにしても上限があるなら生じ得る領域は緑の斜線をつけた領域の下側に限られることになる。よって大被害が生じる卓越振動数範囲は0.5Hz~2Hz (3,000Galにすれば0.5Hz~4Hz) に限定されることになる。これが先に示した構造物破壊能が最大となる0.5秒~2秒の「やや短周期域」なのである。

整理すると、構造物の大被害は最大加速度も最大速度も大きい地動で生じ、そのような地動は最大値に上限があるなら「やや短周期域」だけで達成可能である。そして実際に過去の地動をこの最大加速度—等価卓越振動数ダイアグラムにプロットすると、大被害が出ている地域の観測地動は必ずこの危険な平行四辺形の領域に落ちているのである。

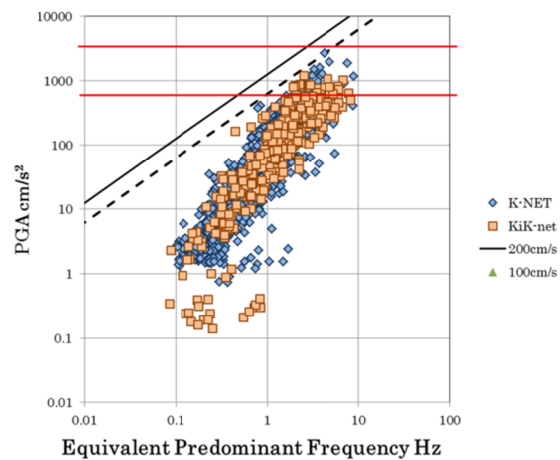


Fig.11 The same peak ground acceleration versus equivalent frequency (PGA/2π PGV) diagram but with the observed values during the 2011 Tohoku earthquake.

Fig.11には東北地方太平洋沖地震の観測地動データを最大加速度—等価卓越振動数ダイアグラムに表示した。図から危険な平行四辺形に入っているデータは最大加速度の上限を3,000Galにした場合のK-NET築館(MYG004)1点だけであって(その最大速度は約100cm/s)、0.5秒~2秒の「やや短周期域」に卓越振動数を持ち、最大速度が100cm/sを超える記録は1つもない。

やや短周期パルスの特長とする震源域の強震動がその周期帯域と構造物の弾性時固有周期との乖離にも関わらず、実際に構造物を破壊することができることは、長戸・川瀬(2001)による構造物の非線形応答解析モデルによる検討で証明されている。彼らは例えば鉄筋コンクリート構造物については、神戸市灘・東灘区で震災後に調査された階数別・建築年代別被害率を再現するように、標準的な設計モデルを基準にしてそれに対する降伏耐力レベルの倍率を求めた。

その際各町丁目別の地震入力としては松島・川瀬(2000)の再現地震動を用いた。その結果、得られた降伏耐力レベルをFig.12に示す。

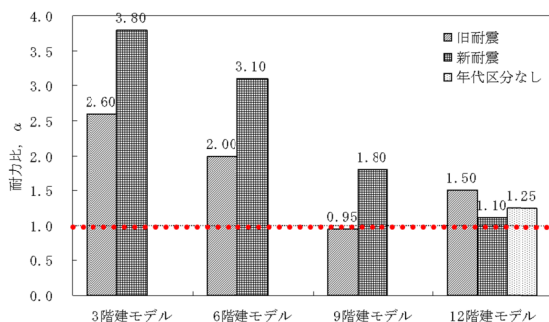


Fig.12 Average yield strength ratios of RC buildings derived from the damage statistics and the simulated strong motions during the 1955 Hyogo-ken Nanbu earthquake (Nagato and Kawase, 2001).

得られた降伏耐力倍率は3階建ての旧耐震建築(1981年以前の建物)で設計上の耐力の2.6倍, 新耐震建築では3.8倍であった。一方9階建ての場合にはそれぞれ0.95倍と1.8倍となった。このように, 兵庫県南部地震は同じ設計上の要請が課せられていながら実際に確保されている耐力には大きな違いがあることを教えてくれている。なお, この倍率は対数正規分布の平均値(最頻値)であって, カテゴリごとに標準偏差0.26の対数正規分布でばらついているものと仮定されている。このばらつきは実構造物の耐震性能評価の統計解析で妥当なばらつき値であることが明らかにされている。

#### 4. 2つの地震から学ぶべき教訓

以上のように2つの地震は構造物に与えた震害としては全く両極端な結果をもたらしたが, その意味しているところは同じである。一般構造物について言えば, 東北地方太平洋沖地震は, 現在の日本の構造物は遠距離(~100km)の巨大地震に対しては, たとえその短周期地震動レベルが設計値レベルを大きく上回っていたとしても, 生き残ることができることを示している。一方, 兵庫県南部地震は, 内陸地震の「やや短周期パルス」に対して生き残れるかどうかは保証の限りでないことを示している。実際に10万棟が倒壊したのは決して弱い建物のみが壊れたわけではない。もちろん生き残れるものもあることは間違いないが, 現行の設計値は内陸地震の震源域の地震動特性を考慮していないので, 実際問題としてそれに対する安全性は何も担保されていない。幸いFig.12に示したように, 構造物によっては耐震設計で

確保することが要請されているレベルよりもはるかに大きな耐震性能が確保されている場合もある。それだからこそ兵庫県南部地震以降に発生した内陸直下型地震においても, やや短周期パルスはほとんどあまねく観測されているが, 兵庫県南部地震ほど大規模な震災は発生していないのである。しかしそれが発生していないことはかえってこの現実と設計の乖離の問題を覆い隠す役目を果たしてしまっている。

耐震設計の目的は耐震安全性を有する構造物を建設することであって, それが達成されるのであれば設計に用いる地震入力は観測される最強の地震動である必要はないという議論がある。設計という行為を直接担う構造設計者が, 観測記録が得られるたびに変わるような最強地震動に対して設計することを潔しとしないことはよく理解できる。しかし一方で観測事実とは対応しない地震動あるいは地震荷重で設計し続けることによる弊害も大きい。

まず第一に現行の耐震設計がどのような地震動レベルに対応したものかを説明できない。地震が起って被害が出るたびに気象庁震度との関係が問題視されるが, それは気象庁震度が構造物の被災度と必ずしも対応していないという問題もあるが, 実地震動のスペクトル特性と設計に用いている地震荷重の周波数特性に大きな違いがあることにも原因がある。

第二に設計荷重が現実的なものでないのであればいつまでも真の性能設計に移行出来ない。性能設計とは目標として性能を確保していることを保証する設計手法である。そこでは外力のレベルと性能のレベルが両方とも定量的に把握されている必要がある。現状のように現実と乖離した外力レベルで設計し, そのレベルに対応しない性能が確保されていることによって結果オーライとなっている状況では, どれだけ設計外力を増大させればどれだけ性能が向上するかについて定量的な情報を得ることは不可能である。また現状のままでは耐震設計法を根本的に改めることもそのレベルを変更することもできない。理由はどうあれ結果としてOKということしか理解できていないからである。

第三に現実と乖離した設計を続ける限り, 確保した耐力であっても想定を超える外力によって破壊される構造物が必ず発生する。特に内陸直下型地震では不可避である。従って, 設計と現実の乖離を放置したままだと被害が発生する度に設計レベルの増大, あるいは施工法の改良を継続しつづけることになる。

第四に地震調査研究推進本部や中央防災会議が行っている強震動予測や確率論的地震動予測地図で予測されている地震動を用いた被害予測において, 被害が出るという予測がされているのに対して, 設計

的な対応をする方法がない。なぜなら現行の構造物は何故か設計値よりも丈夫であって現実にそれほど被害は出ないのに、計算上こうした予測強震動を用いると多大な被害が出ることになっているからである。地震学的アプローチによって予測された地震動は現実の地震動に近いものが計算されているのに、それに対応した設計モデルが作られていないので折角の情報も活用しようがないのである。

この設計と現実の乖離はなぜ生じてしまったのであろうか。それは結局、1915年当時東京大学工学部の佐野利器助教授が発案した今日の耐震設計の根幹をなしている「設計震度法」に帰着される。これは1923年関東大震災の後の復興に際して1924年に施行された市街地建築物法に初めて耐震構造規程として導入されたもので、要は地動加速度のレベルに対応した水平荷重係数を考慮するという方法であり、それによって水平剛性を確保することを求めたものである。従ってこの震度法は必然的に剛構造を指向することになる。

その後、その静的外力の等価性と剛構造指向の物理的妥当性に対する根本的な疑問が真島健三郎氏より1924年に提起され(真島, 1924), 約10年間に渡り継続される柔剛論争の火ぶたが切って落とされる。しかしそれも前述のように、1935年棚橋先生によるポテンシャル・エネルギー仮説(棚橋, 1935)によって、理想の耐震構造は単純に剛か柔かという問題ではなく、破壊に至るまでのエネルギー吸収能力こそが耐震性能の根幹であることが示されるのであるが、日本の耐震設計法は1981年の新耐震設計法の実施等これまで様々な改良が施されては来ているものの、構造物を剛にすることが善であるという基本パラダイムは一度も揺らいだことはないのが現状であり、それが東日本大震災で効を奏したこともまた事実である。一方、それを金科玉条として死守し続ける限り、最も重要な変形を制御する能力を手にするには永遠にできない。

## 5. 西日本大震災への正しい備えとは

ではこれら二つの大震災を踏まえて、近い将来、いつかはわからないが発生することが確実視されている南海トラフ沿いの巨大地震がもたらすかもしれない西日本大震災に向けて、我々がしなければならない正しい備えとはどのようなものであろうか。

まず第一に、南海トラフ沿いの巨大地震の発生に如何に備えるかについて考察する。我々は東北地方太平洋沖地震が発生する以前から東南海・南海地震の想定強震動の時刻歴波形を観測記録に基づいて推定し、さらにそれを兵庫県南部地震の被害率を再現

するように求めた被害予測モデル(長戸・川瀬モデル)に入力して被害量を推定してきている(Baoyintu et al., 2011)。さらに最近それらを組み合わせて最もありそうなシナリオでの連動破壊ケースについても計算結果を求めた。

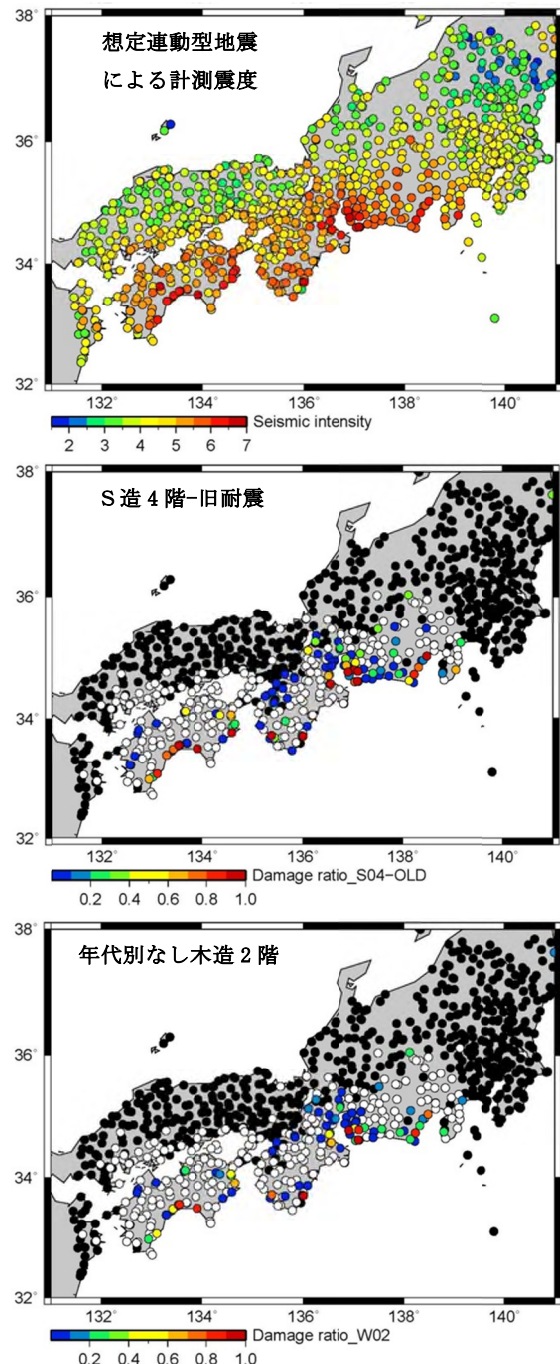


Fig.13 JMA seismic intensity of the predicted strong motions for the three segment simultaneous rupture scenario of the hypothesized Nankai Trough earthquake of M8.7 and building damage estimates (Baoyintu, 2013) derived from the damage prediction model proposed by Nagato and Kawase (2001).



Fig.13にはその結果の一例(Baoyintu, 2013)を示すが、震度分布では震源に近い沿岸域を中心に広範囲にわたって高い震度が求められているが、被害率でみるとそれが高い場所は極めて限定的で、単純な震源断層までの距離で被害が決定されているわけではないことがわかる。

このことは、震源と地盤構造で決まる地震動特性と種別や階数・建設年代で決まる建物特性との関係によって複雑に被害が多く発生する地域が変動することを意味している。従ってその地震動特性と構造物特性を考慮に入れない対策は極めて効率が悪いことになる。

実際、この被害発生を低減することを目的として、耐震補強を進めたり、現行の地域係数を上昇させたりすることによってどの程度の被害低下効果が得られるかについても我々は検討しているが、例えば被害総量を半分にするために全域の地域係数を上昇させたとすると、それによって必要となるコストや資材量の増加分は、その上昇によって減少する被害建物の損失コストや資材量を大きく上回るという結果が推計されている。もちろんこの計算は直接的な物質的被害（とその低減に要するもの）だけを考慮しており、被災により事業継続が困難になる影響や人的被害の影響は考慮していないので、それを考慮すればこの費用対効果の比は改善されるだろうが、被害発生地域が限られているのに全域に補強を施すことが効率的施策でないことは誰の目にも明らかであろう。

次に、南海トラフ沿いの巨大地震の発生までの西南日本の置かれているテクニクな状況について考察する。兵庫県南部地震が発生する以前から、いずれ西南日本は地震活動期に入ると言われていたが、兵庫県南部地震の発生までは誰も耳を傾けなかった。兵庫県南部地震とその5年後の鳥取県西部地震により、西南日本が活動期に入ったことは確かな現実と認識されるようになった。しかし、2005年福岡県西方沖地震の発生以降西南日本ではM6クラスの内陸地震が発生してきておらず、今後の発生が大いに危惧されている。前回の南海地震の前までの活動期のM6以上の内陸地震の発生頻度は年平均0.5回であったので、今後南海地震の発生まであと30年あるとすればM6以上が15回、グーテンベルグ・リヒターのマグニチュード-頻度関係を考えればM7以上が1~2回発生することが予測され、その発生場所によっては兵庫県南部地震クラスの大災害となる可能性が否定できない。

すでに見てきたように、内陸直下型地震の「やや短周期」パルスに対しては現行の耐震設計法では対応が取れず、現行の新耐震なみにということを目指

に剛構造化しようとしている現行の耐震補強スキームも有効かどうかさえ定かでない。しかし「やや短周期」パルスが発生するのは震源近傍に限られ、しかもそれが地盤構造によって大災害を引き起こすほど増幅するのは厚い堆積盆地上に限られるので、M7クラスの内陸地震が過去大地震を引き起こした明確な活断層で発生してくれる限り、その危険性のある場所は事前に特定することが可能であり、その波形を予測することも、被害を予測することも、対策を立てることも可能である。ただし、その前提として、そういう地域における被害想定と対策においては、現行の耐震設計法の枠から解き放たれ、謙虚に自然、そして我々の製造物の現実に向き合う必要がある。先人たちがその時代の背景を背負って未知の世界を切り開いてきたその歴史的産物にすがって、それを守ることに汲々としていたのでは対応はおぼつかない。

## 6. 都市空間安全制御の観点からの研究戦略

防災研究所では文部科学省から求められたミッションの再定義と京都大学から改革案の議論のための熟議に向けて求められた部局としての「10年後の将来構想」として以下の4点の活動を中心に据えることを打ち出している。

- 東日本大震災を受けた西日本大震災対策研究に最大の貢献を果たす。
- 気候変動による極端気象下での大気・水災害研究に最大の貢献を果たす。
- 総合防災学研究における強みを活かして実装に向けた包括的研究をさらに推進する。
- グローバル人材の育成に積極的に取り組み自然科学・工学・社会科学にまたがる広範な学術研究を展開する世界レベルの防災研究拠点になる。

この防災研究所の今後の重点的取組を部局の基本方針として見据え、さらにここでこれまで示してきた建築分野の地震災害発生メカニズムに関する現状認識を踏まえ、都市空間安全制御の観点から見た研究課題と将来の研究戦略について考察する。

まず、現在の耐震設計の基本スキームを世界に誇れるものに変えていくための研究を推進し、それを展開していくことが急務である。その具体的中身として主なものを列挙すれば

1. 強度性能から変形性能への基本思想変換
2. 表層地盤のみの考慮から盆地構造も考慮したスペクトル特性評価
3. 活断層係数の導入

である。いずれも兵庫県南部地震で課題であること

が明らかにされながら現実には何も対応が取られないまま今日に至っている根源的な課題である。これらの研究の進展と社会への実装によって、先に問題であると指摘した課題の大半が解決されることになる。

さらに、これらの成果に対応して、より有意義な耐震補強のための研究を推進する必要がある。現行の耐震補強はあまりにも剛性補強一辺倒となっており、実効性に疑問がある。新耐震並みの補強を目指しておきながら、新耐震建物を診断するとその80%が不合格になる基準はどう考えても合理性に欠ける。

また、防災研の目標の4番目に対応して、これら世界に誇れる合理的耐震設計のスキームを構築できたなら、それを発展途上国の地震危険度評価や耐震設計法整備へ繋げていく国際貢献を果たすべきである。現状の日本の慣習に守られた結果オーライの耐震設計法では合理鉄説明が困難でグローバルスタンダードにするすべがなく、よってこれを技術移転することができない。

最後に、これまでの繰り返しになるが、設計値は設計値として事実とは関係なく設定されるのではなく、あくまでも事実即ち揺れや被害の予測と対策へと設計・施工の世界をシフトしていくことが最終目標である。そのためには現状よりもはるかに多くの建物においてその特性を観測し、それを設計思想とパラメータ設定にフィードバックする必要がある。我々が「自分たちの作った建物のことはよくわかっている」と言った途端にその動的挙動を詳細に観測する必要はなくなってしまふ。しかし日本全国に10,000点近い地震計が置かれながら、その大半は地盤上もしくは地盤内にあって、建物内の観測点は高々1,000点程度というのはあまりにもバランスがおかしい。そして不幸にして被害が出るたびに壊れた残骸からそれは何故だったのかを推測することを繰り返しているのは高度に情報化された社会にあまりにもふさわしくないとわざとを言わない。

## 7. おわりに

十分な執筆時間がなく、論述の根拠資料をすべて示すことができなかつたので、多分に我田引水、妄言虚言のたぐいに思われかねないような報告となつてしまった面もあるが、ここに提示した考え方のほとんどは物理的なあるいは観測的な根拠のあるものであつて、決して机上の空論ではないことをご理解いただきたい。現状を放置することは第二・第三の阪神・淡路大震災の発生に向けて着実に準備することに等しく、そこで再び今度はその時点で既に現役だった我々専門家の責任が問われることになる。

「我々はもっと謙虚になるべきだ」と言われたのは最近定年退職された構造分野の大御所の先生であるが、全くその通りだと思う。佐野利器先生が今生きておられたらどう言われたらうか。

## 謝 辞

本稿執筆の機会を与えていただいた防災研究所の平石教授に感謝する。

## 参考文献

- 河北新報(2013) : [http://www.kahoku.co.jp/spe/pe\\_sys1115/20130517\\_01.htm](http://www.kahoku.co.jp/spe/pe_sys1115/20130517_01.htm).
- 川瀬博・松島信一・宝音図(2011):地震・地震動,2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報,2章(分担執筆),日本建築学会.
- 気象庁(2011):平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 震度分布図, [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011\\_03\\_11\\_tohoku/201103111446\\_smap.png](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/201103111446_smap.png)
- 国土交通省(2011) : <http://www.mlit.go.jp/common/000142182.pdf>.
- 境有紀(2011):2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と被害調査速報, <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113.htm>.
- 佐野利器(1915):家屋耐震構造論,東京大学博士論文.
- 棚橋諒(1935):地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見,建築雑誌昭和10年5月号,578-587.
- 長戸健一郎・川瀬博(2001):建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル,日本建築学会構造系論文集,544,31-37.
- 宝音図(2013):京都大学博士論文(執筆中).
- 防災科学技術研究所(NIED)(2011): [http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo\\_20110311/nied\\_kyoshin2j.pdf](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/nied_kyoshin2j.pdf).
- 真島健三郎(1924):耐震家屋構造の選択について,土木学会誌,第10巻,第2号,297-312.
- 松島信一・川瀬博(2000):1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション,日本建築学会構造系論文集,534,33-40.
- 松島信一・川瀬博(2009):1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動木造建物被害の再評価,構造工学論文集B,Vol.55,537-543.
- 盛川仁・後藤浩之(2011):土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団 調査速報会(2011.4.8)資料,1.2 地震動と地震動による被害の全般的特徴, [http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/1\\_2\\_0.pdf](http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/1_2_0.pdf).
- Asano, K. and T. Iwata (2011): Strong ground motion

generation during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, AGU 2011 Fall Meeting, U42A-03, December 2011, also at <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/pdf/jpgu2011.pdf>.

Baoyintu, Kawase, H., and Matsushima, S. (2011): Broadband Strong Ground Motion Prediction for Hypothetical Tonankai Earthquake Using Statistical Green's Functions Method and Subsequent Building Damage Evaluation, Proc. of the 4th IASPEI/IAEE International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 23–26, 2011, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, USA.

Kawabe, H., K. Kamae and H. Uebayashi (2011): Source model of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyō-Oki earthquake, Seismological Society of Japan Fall meeting, B22–05, 2011, also at <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/>.

Kurihashi, S. and K. Irikura (2011): Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, Earth Planets Space, Special Issue, 63, 571-576.

(論文受理日 : 2013年7月5日)