

神戸の地震・建物被害の概況と 今後の設計用地震荷重

津川 恒久¹⁾・内藤 幸雄²⁾

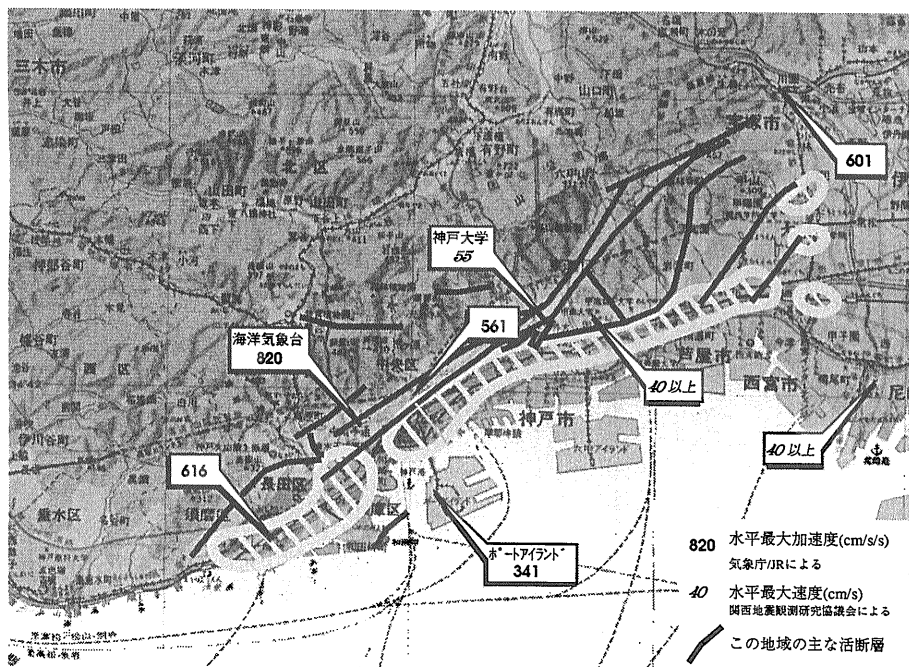
1. はじめに

構造技術者にとって今回の地震の衝撃的であった点は、多数の構造物が実際に壊れたこと、想定したより大きな力(地震荷重)が働いたことにあると考えられる。構造物の種別により被害の程度は異なるが、今回の地震をふまえて設計用地震荷重を今後変更すべきか否かは大きな問題である。本論では、建築構造物を中心とし、被害と地震動の最大値や周期特性の概況と共に、今後、地震荷重に対してどんな考え方があり得るかについて論ずる。

2. 地震動と新耐震

今回の地震では、震度7の地域として第1図の斜線に示す地域が発表された。第1図にはまた、周辺の断層、各地点で観測された加速度の最大値も示した。これを南北方向の模式的な断面で表すと第2図になる。図中には、地域による被害の程度に関連する震度なども示した。

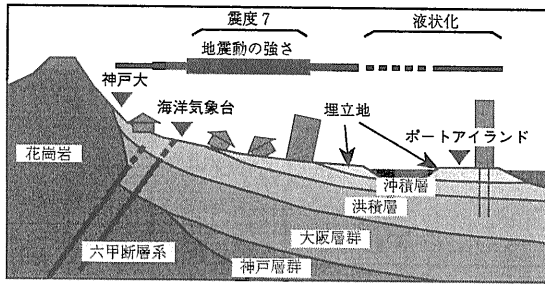
建築基準法(東京都建築行政協会編集, 1993)は1981年に大改正がなされ、耐震規定の部分は以後「新耐震」と呼ばれている。「新耐震」の設計体系で



第1図 阪神地区の震度Ⅶの地域と主な地点の最大加速度。

- 1) 鹿島技術研究所 第三研究部 専門部長 (構造担当)
〒182 東京都調布市飛田給2-19-1
- 2) 鹿島技術研究所 第三研究部 第4研究室 (動的構造)

キーワード: 兵庫県南部地震, 建築基準法, 新耐震, レベル1, レベル2, ハザード曲線, 確率論

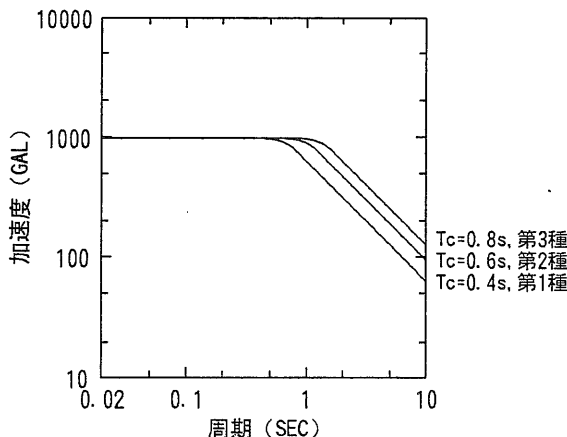


第2図 模式断層図.

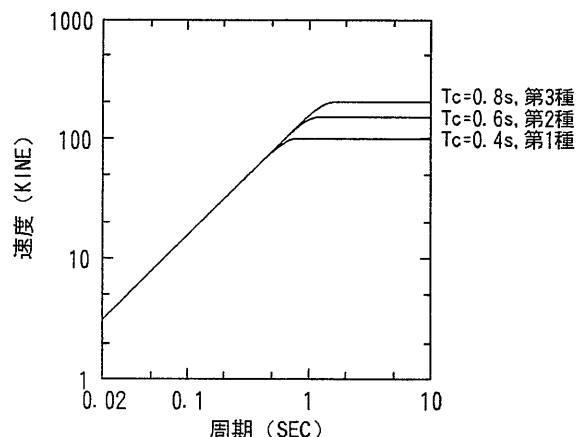
は、地動の最大加速度を100 gal程度に想定した1次設計とこれより大きな地動を想定する2次設計に分かれ、2次設計では地動加速度としては300 gal~400 galが想定されている。建築物は地震動を受けると各部に各種の力やひずみが生ずるが、この力やひずみを地震動と言う入力に対する応答と言い、2次設計では応答として980 gal(重力加速度1gと同じ)が想定されている。すなわち、980 galの加速度が建物の各部に加わるとして設計荷重をまず算定する訳である。ここでは、地震動の加速度最大値により、また980 galの建物応答と比較できる応答スペクトルにより、「新耐震」2次設計の想定を超えた地震動であったことを見よう。

第1図に示した地動加速度最大値ではいくつかのものが400 gal以上であり、上記の2次設計の想定を超える地震動が働いたと言える。次に、構造物の応答として2次設計で想定されている980 galについてはどうかと言うと、観測された地震動による建物の応答の加速度が980 galを超えるか否かを見

れば、2次設計で想定された以上の荷重が働いたか否かが検討できる。「新耐震」ではすべての構造物に対し980 galの応答をそのまま考えるわけではなく、減衰の大きい構造物やねばりのある構造物はこれらを考慮するDs値(東京都建築行政協会編集, 1993)により応答の980 galを低減している。このDs値は1以下の係数であり、構造の性状・形式に応じた値が示されている。またこれらの理由は、地震と言う振動的な荷重を受けた場合、ねばりのある構造物はねばりが少なく耐力の大きい構造物と同等の安全性を有すると言う考えや、減衰の大きい構造物では300~400 galの地震動に対して980 galまでの応答を考える必要はない、と言ったものである。さらに「新耐震」では、地盤の固有周期より長周期側では建物を共振させる成分が少ないことが過去の地震記録の分析から言えることを考慮し、地盤の種類と構造物の固有周期に応じ、構造物の減衰定数やねばりに係わらず一律に、長周期側で荷重を低減させている。第3図は「新耐震」の規定を基に、横軸の構造物の固有周期に対し縦軸を構造物の応答として加速度を表示したもので、図中のパラメータは地盤種別である。これを、縦軸を速度として書き直すと第4図になる。第3図で言えば0.4, 0.6, 0.8秒から低減が始まり、0.8, 1.2, 1.6秒以降は直線の関係となっている。なお、「新耐震」の建設省告示による地盤の種別の定義を第1表に示す。これらはすなわち、建築構造物の設計では、地盤の種別と構造物の固有周期の関係を考慮し、地震荷重を決めている、と言える。



第3図 新耐震の規定による建物の応答加速度.



第4図 速度で表した建物の応答(第3図×T/2π).

第1表 建設省告示による地盤種別

第1種地盤	岩盤、硬質砂れき層その他主として第三紀以前の地層によって構成されているもの又は地盤周期等についての調査若しくは研究の結果に基づき、これと同程度の地盤周期を有すると認められるもの
第2種地盤	第1種地盤及び第3種地盤以外のもの
第3種地盤	腐植土、泥土その他これらに類するもので大部分が構成されている沖積層（盛土がある場合においてはこれを含む。）で、その深さがおおむね30m以上のもの、沼沢、泥海等を埋め立てた地盤の深さがおおむね3m以上であり、かつ、これらで埋め立てられてからおおむね30年経過していないもの又は地盤周期等についての調査若しくは研究の結果に基づき、これらと同程度の地盤周期を有すると認められるもの

東京都建築行政協会編集（1993）による。

第5図には、第1図にその位置を、また第2図に模式的に位置を示した神戸大学（関西地震観測研究協議会より公開）、神戸海洋気象台（気象協会より頒布）、ポートアイランド（関西地震観測研究協議会より公開）GLの、3地点の、縦軸を速度とした応答スペクトルを、地盤種別に応じた「新耐震」の2次設計用の値と共に示した。応答スペクトルとは地震動を入力として、1質点の振動系の応答（加速度、速度、変位あるいは力）を数値計算で求め、振動系の周期を横軸にとって表示したものである。図の縦軸は速度であるが、右上がりの直線に沿えば加速度一定、右下がりの直線に沿えば変位一定になる。ここでは、振動系の減衰は5%としている。神戸大学と海洋気象台の地盤は、それぞれ花崗岩と大阪層群であるが、地盤種別は現時点で断定しないで第1種または第2種として扱い、第5図中には2つの値を併記した。第5図中の神戸海洋気象台が周期0.2秒～1あるいは2秒の領域において「新耐震」の値を超えているのがわかる。

3. 地震動と地震応答解析

一方、高さ60mを超える超高層ビルや原子力発電所では、設計した建物を数学的なモデルに置き換え、地震動を与えて実際に運動方程式（振動方程式）を解く地震応答解析を行い、地震時の建物各部の応力や変形を求めている。この際に超高層ビルで想定する地震動としては「レベル1」と「レベル2」の2段階の大きさの地震動が用いられ、その定義は以下である（高層建築物構造評定委員会、1986）。

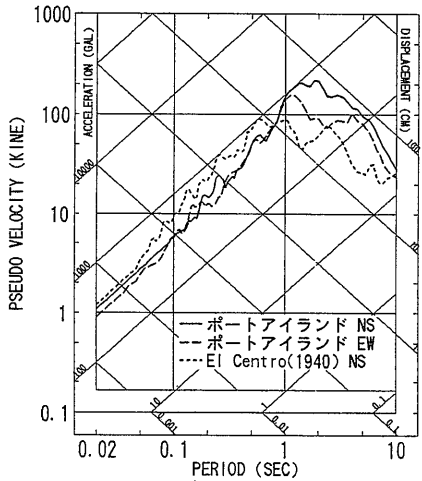
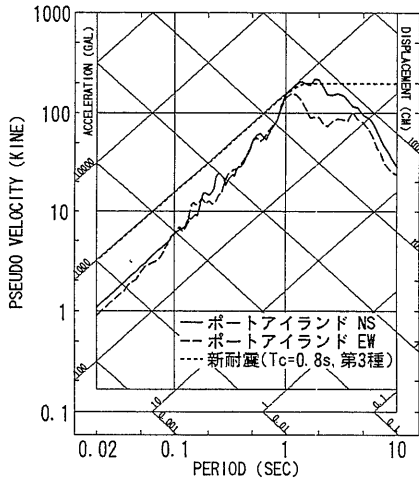
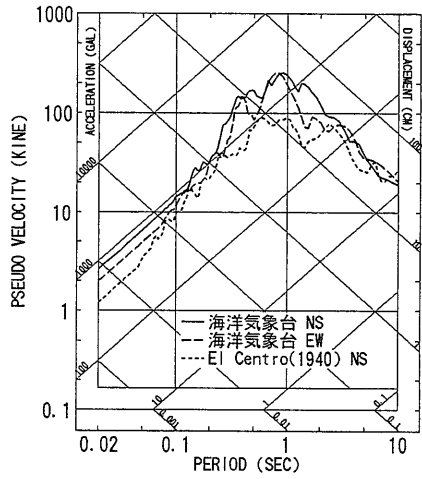
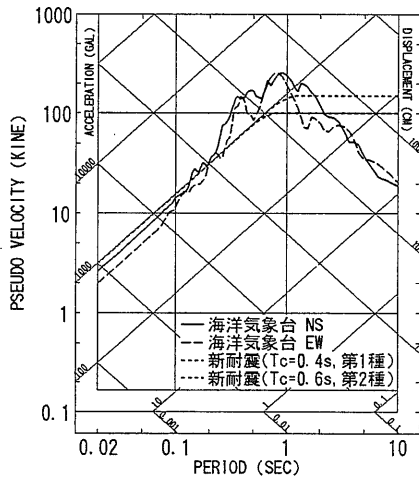
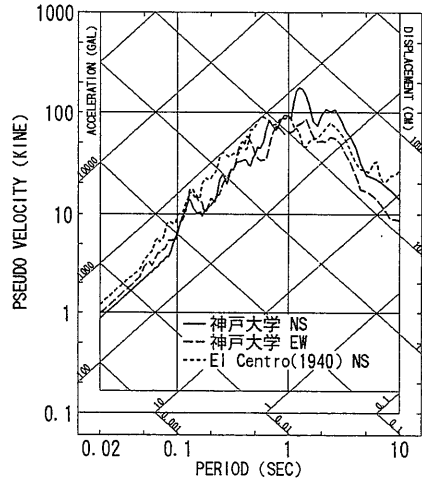
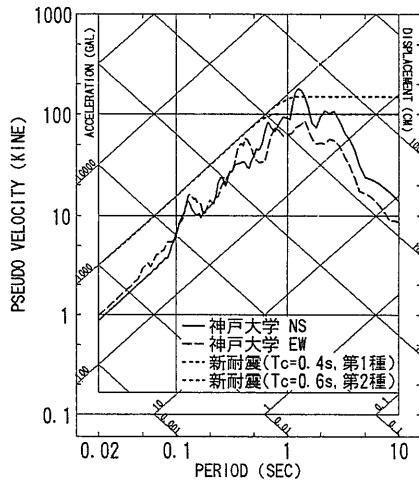
レベル1：当該建築物の敷地において当該建築物の耐用年数中に一度以上受ける可能性が大きい地震動に対して、当該建築物は損傷を受けることなく、主要構造体は概ね弾性的な挙動で応答することを目標とする。このような強さを有する地震動をレベル1の地震動と呼ぶ。

レベル2：当該建築物の敷地において過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられるもの、及び将来において受けることが考えられる最強の地震動に対して、当該建築物は、倒壊あるいは外壁の脱落等の人命に損傷を与える可能性のある破損を生じないことを目標とする。このような強さを有する地震動をレベル2の地震動と呼ぶ。

原子力発電所の耐震設計では「レベル1」と「レベル2」という定義の代わりに「 S_1 地震動」と「 S_2 地震動」を定義している（社団法人日本電気協会電気技術基準調査委員会、1987）。

S_1 ：基準地震動 S_1 は、敷地周辺の過去の地震または活動度の高い活断層による地震、すなわち設計用最強地震により敷地の開放基盤表面に想定する。

S_2 ：基準地震動 S_2 は、活動度が低くても起こり得ると考えるのが妥当な活断層や地震地体構造から想定される地震、及び直下地震（マグニチュード6.5）による地震、すなわち設計用限界地



第5図 地震記録と新耐震。上は神戸大学，中は海洋気象台，下はポートアイランドの記録と比較。

第6図 地震記録と40 kine エルセントロ NS，上は神戸大学，中は海洋気象台，下はポートアイランドの記録と比較。

第2表 建築物の被害要因.

要 因	分 類	
構造種別	大規模	鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート、鉄骨
	戸建住宅	在来木造、2×4、プレハブ、その他
年代・基準	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> 1970年改正 → 1971年施行 (建築基準法施行令改正) </div> <div style="text-align: center;"> 1980年改正 ← 1981年施行 (同左、「新耐震」) </div> </div>	
地域による震度	震度7、震度6、震度5以下	

震により敷地の開放基盤表面に想定する。

第5図に示した今回の地震と、この地方の超高層ビルの耐震設計でレベル2の地震波として多く用いられた40 kine の El Centro 波との比較を、応答スペクトルの形で第6図に示す。なお kine とは速度の単位で cm/秒であり、もとの地震波形を係数倍して最大速度がちょうど40 kine になるようにした El Centro 波を40 kine の El Centro 波と呼んでいる。第6図のかんりの周期範囲において今回の地震の方が大きいことがわかる。特に海洋気象台の記録がそのことを明示している。これら以外にも各種の記録があり、また他の地震波も耐震設計で用いられてきたとは言え、それらを大きく上回る応答スペクトル(破壊力)を有する地震波が今回多数観測されたことは否定し得ない。

4. 建物被害を左右した要因

次に第2表には、今回の地震における被害の程度を決めたと考えられる要因を列挙した。構造種別、設計・施工された年代の差による基準の差、地域の差による地震動の差、等により被害状況は複雑な様相を呈する。現在、これらの要因別の定量的分析が終了している訳ではないが、部分的には定量的に分析されている(例えば日本建築学会, 1995)他、すべての構造被害調査においてこれらの要因は意識されていると考えられる。今後を考えた場合これらのうちで特に、現在の基準・設計法で作られた構造物の被害状況が最も重要となる。現段階では、これらの建物に関しては被害は少ないと言われている。ただし、地震後何か月もたってから構造体鉄骨にクラックが多数発見された1994年米国ノースリッジ

地震の例もあり、今後も注視は必要である。なお、被害状況に関し詳しくは、例えば文献(鹿島, 1995a,b, 日本建築学会, 1995)等を参照されたい。

5. 今後の地震荷重の可能性

今回の地震で想定を超えた大きさの地震動が観測され、またともかく種々の構造物で大きな被害があったことを前提とすれば、今後の地震荷重に対する考え方の可能性として、以下の3つが考えられる。

- (1) 今回大きな地震動の観測された地域だけ、今後大きな地震荷重を想定して設計する。
- (2) 上記の大きな荷重を全国的に用いる。
- (3) 今後も現在の地震荷重により設計する。

(1)は、地域を限定している。日本がほぼ全国的に地震の巣である状況を考えれば、あり得ない選択肢であろう。

(2)は、現在の耐震基準で作られた構造物でも被害が大きすぎたと言う立場に立つ場合である。どれだけ大きくするかと言う点については、例えば今回の地震の最も大きいものと同程度かあるいはそれを少し上回る程度とするとか、絶対これ以上はないと見なし得るレベルまで大きくすることが考えられよう。(確率論的立場からすれば、絶対ないと言い得るためには相当長い期間における発生確率をもとに、例えば2g以上などの大きな加速度最大値の地震動を検討しなければならない。)

(3)は、現在の基準によるものの大部分は無被害あるいは被害軽微であるという立場から見た場合で、実際には、地震荷重はそのままあるいは微修正とし、要すれば他の部分の微修正と合わせ、対応することになると考えられる。最終的な結論にはまだ慎

重な検討を要するにしろ、筆者らとしては建築関係については(3)が妥当な選択と考えている。この場合、現行基準によるものの大部分が無被害あるいは被害軽微(設計時の要求事項がその地震荷重に対して倒れなければ良いと言うことであれば、この場合倒れなかったことが被害軽微を意味する)であることが、詳細な調査から結論されることが必要であるのはもちろんである。

また今後の問題として、2次設計用の地震荷重やレベル2の地震動の位置づけは、「これ以上は絶対に来ない」と言うことではなく、「この程度の荷重を考えて適切に設計されたものは△△大地震でも被害軽微だったから妥当な設計法である」と言うことになるはずであり、この点に社会的認知を求めることになろう。

この、「・・・で被害軽微だったから妥当な設計法である」の論理は、仮定された荷重すなわちそれ以上はあり得ないわけではない荷重と、安全上の余裕度、の二者によって組み立てられている。更に厳密には、余裕度を超えた荷重がかかれば壊れることもあり得る、と言う論理を含んでいると考えられる。こうした論理が日本で公然と受容されるには、

しかしながら案外大きな意識上の変革を必要とするかもしれない。

謝辞：本原稿の作成にあたり、助言、ご支援をいただいた鹿島技術研究所の丹羽正徳博士、石田 寛、佐々木透の各氏に感謝いたします。

文 献

- 鹿島(1995a)：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書(第1報),186p.
鹿島(1995b)：平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書(第2報), 209p.
高層建築物構造評定委員会(1986)：高層建築物の動的解析用地震動について。ビルディングレター1986.6, 日本建築センター, 49-50.
(注)日本電気協会電気技術基準調査委員会(1987)：原子力発電所耐震設計技術指針, 3-4.
日本建築学会(1995)：1995年兵庫県南部地震災害調査速報
東京都建築行政協会編集(1993)：建築基準法関係法令集(1994年版)。光和堂, 210, 221-222, 770-781.

TSUGAWA Tsunehisa and NAITO Yukio (1995): Damage and outline of the Kobe earthquake and seismic load after the earthquake for structural design.

〈受付/受理：1995年5月1日/5月17日〉