

## 資料2 計画論的な観点からの設計地震動の定義についての提案

### 1. 2種類の設計対象地震動

設計外力として“設計地震動”を設定する。設計地震動としては大きさの異なる2種類の地震動を想定し、それぞれ“レベル 地震動”、“レベル 地震動”と呼ぶ。

従前より、構造物を設計する際には耐震性が考慮されており、設計地震動を超えない地震動に対してはしかるべき強度を発揮して当該構造物に破壊を生じさせないこととされてきた。この設計地震動が、“レベル 地震動”である。しかし、先の阪神淡路大震災ではこれを遥かに超える強い地震動により、都市がほぼ壊滅してしまうという状況が生じ、同時にこのような強い地震動が襲来する可能性が無視し得ないということも明らかとなった。そこで、耐震設計を行う上でこのような強い地震動をも念頭において、壊滅的な被害を避けることができるようにすべきであるとの考え方が支配的となってきた。これが“レベル 地震動”である。

構造物の損傷の程度は設計外力と耐震性能の両者により規定される。設計外力としていかなるものを想定し、それに耐えるためにどれだけの耐震性能を持たせるべきかは、本来同時決定問題として種々の観点から検討されるべきであると考えが、ここでは耐震性能を決定する方法論を検討するため、設計地震動は先決的に与えられるものとする。以下では、土木構造物の多くが道路やライフラインのようにシステムとして機能を発揮するものであることに鑑み、システム全体としての残存機能に着目してレベル 地震動とレベル 地震動の計画論的位置づけを整理する。

### 2. レベル 地震動

レベル 地震動は“システム構成要素の破壊”を防止すべき地震動の最大値として位置づけられる。“システム構成要素の破壊”は個々の構造物の破壊と考えてよい。したがって、レベル を超えない地震動に対しては構造物の破壊は生じないか生じても軽微であり、一定水準以上の機能低下（構造物単体としての）が生じないものとする。レベル 地震動によって生じた構造物の機能低下は当該システムが提供するサービスの提供水準を部分的に多少低下させるが、システム自体は概ね機能を維持しサービスの提供水準は通常時と同じか若干低い程度に保たれる。これは、レベル 地震動を超えない範囲であれば地震動が生じても通常時のサービスが全ての場所や利用者に対して提供されることを意味する。したがって、全ての構造物がレベル 地震動に対する耐震性能を有しているならば、これによって確保されるサービスの提供水準が全ての国民に対して最低限保障されるサービス水準、すなわちシビルミニマムサービスであ

ると考えることができる。

シビルミニマムの水準をどこに置くかは社会の価値観や財政状況によっても異なり、社会的合意の下で選択されるべきものであるため、これを特定の判断基準とともに導出することは現時点では容易でない。しかし、逆に、その時代時代で社会的に受け入れられている水準を持ってシビルミニマム水準と見なすのもひとつの考え方である。この考え方にに基づき、ここでは現行の設計基準で想定しているレベル 地震動をもってシビルミニマム基準と考える。

### 3. レベル 地震動

レベル 地震動は、“システムの破壊”やそれによる“カタストロフィ”が発生しないような地震動の最大値として位置づけられる。“システムの破壊”とは、構造物の破壊によって当該システムの機能が一定水準以上の機能低下（機能喪失）に陥ることである。冗長性を有するシステムの場合、単一のユニットが破壊しても冗長機能がはたらくため、機能の喪失は当該部分のみに留まりシステムそのものは機能を発揮する。しかし、冗長性を構成するユニットの全てが破壊された場合は、システム全体の機能が喪失する。“カタストロフィ”とは、当該システムが支えていた社会全体が機能不全に陥るとともに、当該システムや被災した他のシステムの修復に多大な支障をもたらされるような状態（自己修復機能の喪失）をいう。

地域社会は、それ自身を維持するための救援・修復機能を保有している。そして住民や施設事故や災害が生じた際にはこの機能を発揮させて救援・修復を行う。この場合、救援・修復システムは健全に機能していることが前提となる。しかし事故や災害の規模が甚大かつ広範囲に及び、救援・修復システムそのものまでもが被災してしまうと救援や修復ができず地域社会を維持することが困難な状況に陥る。このように、地域社会が大きく被災してそれ自身を維持することができなくなる状況を“カタストロフィ”という。

“システム要素の損傷”（部分的に限定されシステムや社会全体に及ぼす影響が無視できる程度の損傷）と“カタストロフィ”（集合的に発生しシステムや社会の全体機能に関わる損傷）の違いのひとつは残存機能の大きさであり、残存部分がある程度の機能（特に救援・修復・安定機能）を発揮しているならば個別要素に生じた機能低下は部分的な機能低下に留まるが、カタストロフィの場合は残存機能の低下により個別要素の機能低下が修復されず、システム全体の機能喪失に至る。

地域社会が被災しても、それ自身を維持することが可能な状態である限りいずれは復興することができる。しかし、カタストロフィが生起すると地域社会そのものが崩壊するという非可逆的な過程をたどる。したがって、われわれがまず回避すべきもの

はカタストロフィの生起であり，できうるならばどのような地震動に対してもカタストロフィが生じない程度の損傷に留まるような耐震性を構造物に付与することが理想的である．しかし，耐震性には限度があり無限大の地震動に対応することは現実的でないため，何らかの限界値を設定せざるを得ない．これがレベル 地震動の概念である．

以上の考え方は次のような計画問題として整理することができる．ある地域に強度Fの地震が生じた場合に，当該地域が被る損害を $D=D(F)$ とする．この地域は外部に地震保険を引き受けてもらうことができるが，その上限（引き受け可能限度額） $D_0$ が存在し，したがって強度Fの地震が生じた際，この地域は  $H(F)$

$$H(F)=D(F)-D_0$$

を自己負担しなければならない．

この地域は保有している富  $I$  を，合成財  $I_1$ ，耐震投資  $I_2$ ，地震保険料  $C_1$  に分割して消費する．

$$I_1+I_2+C_1=I$$

$I_1$ は社会を維持する（地震が生じない場合にもカタストロフが生じない；シビルミニマム水準を下回らない状態を維持する）ために最低限必要なコスト  $I_0$  を下回ってはいけ  
ないから，

$$I_1 \geq I_0$$

である．一方，強度Fの地震が生じた際に地域が自己負担しなければならない損失Hは，地震強度Fと耐震投資 $I_2$ の関数，

$$H=H(F, I_2)$$

であり，強度Fの地震が生じた場合においても

$$I - I_2 - C_1 - H(F, I_2) \geq I_0$$

でなければならない．

これより，耐震投資 $I_2$ の下でこの地域がカタストロフィに陥ることなく耐えることができる地震の最大強度 $F_s$ は，

$$H(F_s, I_2) = I - I_2 - C_1 - I_0$$

となる  $F_s$ ,

$$F_s = F_s(I_2) = H^{-1}(I - I_2 - C_1 - I_0, I_2)$$

である。したがって、なるべく強い地震に耐えうるしかるべき耐震投資  $I_2^*$  を選ぶことにより、この地域が耐えうる最大の地震強度  $F_s^*$  は、

$$F_s^* = F_s(I_2^*)$$

$$I_2^* = \arg \max F_s(I_2)$$

実際には、人々は現在の消費をシビルミニマム水準に落としてまで耐震投資をしようとは考えない。そこで、カタストロフィをもたらす強度  $F_s$  以上の地震が生起する確率、

$$P(F_s) = \text{Prob}[F > F_s]$$

を考慮した  $I_1$  と  $I_2$  の配分を考えよう。この地域社会の効用関数を  $U(w)$ 、地域社会が有している富を  $w$ 、

$$w = I - I_2 - C_1$$

とすると、期待効用  $EU$  は、

$$EU = \{1 - P(F_s(I_2))\} \cdot U(I - I_2 - C_1)$$

これより、期待効用  $EU$  を最大化する耐震投資  $I_2^*$ 、

$$I_2^* = \arg \max EU$$

が最適耐震投資として選ばれ、それに対応する地震強度  $F_s(I_2^*)$  がカタストロフィを発生させない最大の地震強度となる。これが目標として設定すべきレベル 地震動である。

しかし現時点では、 $H(F, I_2)$ 、 $U(w)$ 、さらには  $I_0$  も明確になっておらず、人々は経験

的に知っているいくつかの地震強度 $F$ とそれにより生じた損失 $H(F, I_2^0)$ を思い描きカタストロフィの発生を避けたい地震強度の上限に関するイメージを有しているに過ぎない。この中の最大のものは阪神淡路大震災のそれである。そこで、現段階では、阪神淡路大震災あるいはそれを経験することにより高い蓋然性を有すると認識するに至った地震強度をレベル 地震動として選定することが適当であると考えられる。

今後は、上記の考え方に沿ってレベル 地震動をより適切に選定できるよう、耐震投資 $I_2$ とその下でカタストロフィが生じない地震強度の最大値 $F_s$ との関係、カタストロフィの回避に関する地域住民の効用関数、シビルミニマムの水準（カタストロフィの回避に必要な合成財の消費額）等に関する知見を蓄積しする必要があり、このための研究を推進する必要がある。

喜田秀行（鳥取大学）