

2．使用性照査とは

2.1 国際基準等における使用限界状態

第1章で、現状のレベル1設計が直面する問題をあげて、「従来のレベル1設計で照査していた性能とは何か？」という問題提起をしたが、「レベル1設計は、使用性照査である」という解釈が既に定着している感があるので、これに対する考察を少し異なる観点からおこない、3章以下に続く議論の基礎としたい。

土木に関連する国際標準として、ISOの規定をみてみることにする。多岐にわたる分野の中で、設計（安全性・信頼性・荷重）に関するものは、ISO/TC98の管轄になっており、ISO2394「構造物の信頼性の基本」、ISO3010「構造物への地震作用」、ISO13822「既設構造物の信頼性評価」などが知られている。後の二つは日本が幹事国となって原案を作成しており（それぞれ石山祐二北大教授、三橋博三東北大教授が主査）、三つとも邦訳が作られている¹⁻³⁾。ISO2394では、限界状態を「終局限界状態」と「使用限界状態」に分類しており、ISO3010もこの概念に沿った書き方をしている。またISO13822では、老朽化に伴う構造物の状態変化のみならず、地震等の作用を経た後の状態のチェックも抱合している。終局限界状態とは、「崩壊もしくはそれに類似した構造物の破壊を招く限界状態」であり、これに対して使用限界状態とは「それを超えると構造物または構造要素が使用性に関する要求事項を満足できなくなる限界状態」と定義される。

終局限界状態の定義は、構造物の利用者の生命・財産の保全にかかわる照査として、理解が容易である。当然どのような土木構造物にも必要な要求性能であり、適切な照査規定が与えられている。他方、使用限界状態は、わかりにくい部分がある。これまで、「コンクリートのひび割れ」「過大な振動」「たわみ制限」、あるいは建築物であれば、遮音性や保温性などをこの限界状態に当てて解釈してきた経緯はある。しかし、性能設計への移行、環境負荷や施工性、構造改変性、長寿命など幅広い性能の尺度が求められつつある時代を考えれば、使用性という用語を余り字義通りに狭く解釈するのは賢明ではない。構造物に求められる様々な性能の要求の中で、終局限界状態を除くすべてのものが使用限界状態に包括されると理解していくことが、国際化対応と、設計への時代の要請を矛盾なく整合させることにつながるであろう。

その意味で、本報告書の基本となる使用限界状態への一つの解釈；「経済性にかかわる性能」という理解がクローズアップされる。もっとも、土木構造物はすべてが「経済装置」としてと見られることもできるわけで、そう考えれば、その限界状態は、（構造安全性の問題も含めて）すべて経済問題となる。しかし人命にもかかわる問題を貨幣価値換算して評価尺度にすることには現時点で国民的合意が得られているとは言い難く、当面は終局限界状態を経済性から見る議論は避けるのが無難と考えられる。

また、地震時を想定した設計は、やや特殊な側面がある（極めて低頻度ながら、大被害＜＝個々の構造物の被害が大きいのみならず、「同時多発性」による社会的インパクトも＞が予想される状況への特段の配慮は、一般のリスクの専門家の間でも議論のあるところである）。ISO2394の起案にかかわったヨ

ヨーロッパでは、地震時の状況は例外的である。このため、通常時使用性と地震時使用性の差異についても一定の考慮が必要である。これは 2.3 に節を設けて論ずることとしたい。

2.2 歴史的背景

(1) 震度法はもともと安全性照査でだった

1923 年関東大震災を契機にわが国の耐震設計の考え方が整備されてきたのは周知の事実である。当初は静的震度法で水平設計震度 0.1 を考慮することが基本とされ、後年に至りこの基本値は 0.2 にとられるようになってくる。これを他の一般的な荷重と同様に構造物に作用させ、許容応力度法によって安全性の照査を行うことが、最も基本的な設計スキームとして半世紀余も定着してきたわけである。

では歴史的に、この照査の内容は、終局限界状態として認識されてきたのであろうか、あるいは使用限界状態だったのだろうか？ 答えは明らかであって、前者としての位置付けが一貫して与えられてきたのである。昭和の時代の技術者が、静的震度法と許容応力度法によって行ってきた設計の目的を、構造物の安全性、ひいては利用者の生命財産の安全性と認識していたことには、疑う余地がない。

一方で、今日的観点からすれば、0.1 から 0.2 といった水平震度は、想定最大加速度には遠く及ばないし、構造物の設計供用期間に対応して十分な再現期間を有する大きさともいえない。また、従来の許容応力度でカバーされている構造物や部材の耐力が、終局限界を十分に表現しきれているともいえない。関東大震災当時に推定された最大加速度は 0.3G から 0.4G といったところであると思われるが、この値を昭和の技術者が知らなかったかということ、これも当たらない。許容応力度、あるいは弾性限界が、地震に対して想定すべき耐力の表現として十分でないことの認識はもたれていたが、正確に耐力を表現できるだけの理論とデータが不足し、また最大加速度ベースで設計地震力を表現するだけの理論とデータも不足していたのが実情である。当時の理論とデータの枠内で、過大な地震の際に構造物の利用者の人命と財産の安全を、十分な信頼度で守ることを目的として、当時の技術者が規定を考えていたと認識すべきであろう。これを後付けで地震時の使用性能照査をしていたように解釈し、二段階設計理論や国際標準の枠組みに無理やりすり合わせることは、ミスリードといわざるを得ない。

(2) 構造力学から見た弾塑性設計

そもそも「地震による構造物の被害の側面から」のみで設計論を解釈し、「許容応力度法=弾性計算=使用限界(or 非終局限界)という解釈」にとられること自体が、視点の偏りである。構造力学の発達史、あるいは土木における構造力学教育のあり方などを概観すれば、より広い視点から、耐震設計を相対化することができる。

構造力学そのものに土木と建築の差異があるわけでもないが、現実土木と建築の構造力学教育の重点のおき方は大変異なる。土木のように、静定あるいは低次の不静定構造に対し、内部の応力分布までを詳細に追わせ、かつ断面の合理化をはかる教育をする（建築ではこういう教育はしない。センスとしては機械系の材料力学に近い）のは、明らかに橋梁上部構造の設計の予備としての位置付けである。弾性構造力学に続いて、「(弾)塑性解析・塑性設計」という項目を教育するカリキュラムをもつ大学も多いが、その立場に立って整理すると、

- ・ 鋼構造部材にコンパクト／ノンコンパクト断面という分類があることにみられるように，全塑性モーメントと弾性限界モーメントの差（両者の比を形状係数という）は，断面形によって大きく異なる【形状係数は，丸棒で約 1.7，長方形断面で 1.5 であるのに対し，薄肉円筒で約 1.27，建築鉄骨の H 形鋼で約 1.15，プレートガーダー等の組立 I 形断面で 1.1 以下である．】
- ・ さらに，構造システムの不静定次数によっても，系全体の初期降伏→終局状態の間の余裕は著しく異なる．

以上の説明を前提として，「『余裕がある』のはいいことか？」という質問を試みた場合，立脚点によって回答は 180 度異なる．

- ・ 基本的に（少なくとも断面レベルでは），形状係数が大きいことは「弾性挙動時に，ぜい肉となる（応力の小さい）部分＜＝図心近傍＞をたくさん保持している」わけだから，力学的に無駄が多いことは明らか．よって
 - 自重が軽いことが設計の合理化上重要な意味をもち（例えば橋桁）
 - 耐えるべき荷重の上限水準が比較的明確（例えば鉄道橋）
 といった条件が揃っていれば，「断面をスリム化して形状係数を 1 に近づけ，不静定次数を減らし，小数の大断面の主部材によって力を支点に伝達する」ような設計をするのがよいという結論になろう（執筆者は，個人的に，「大黒柱設計」と呼んでいる）．

橋梁は自重が軽いことが重要な設計上の要求であり，鋼構造とコンクリート構造のシェア競争などにも影響が大きい．近年鋼橋においてみられる，大断面・小数桁構造への移行は，こうした条件を反映したものである．

18 世紀以来の橋梁（鋼橋）の設計は，明らかにこのような周辺条件のもとで発展してきた．これが「土木構造力学」の基本的パラダイムである（建築構造力学とは一線を画する）．こういう設計のもとでは，「前提条件が狂って」弾性限界を超過すると，局所的な剛性の低下が構造システム全体に様々な悪影響をもたらす．連鎖反動的にダメージが拡大し，（一種のドミノ現象）鉄道橋であれば走行の危険度の増加にもつながる．よって「弾性限界を超える・超えない」は，ほとんど終局限界に近いニュアンスをもつものとなる．ただし，荷重として支配的なのは死荷重と活荷重であり，ほとんどが制御可能なものと考えられてきた．

逆に，先の問いに対して

- 自重軽減がさほど重要な設計上の要求項目でなく，（他により優先すべきことがある等；例えば建築のデザイン・設備の付加価値や，室内利用上の構造物占拠空間の制約等がこれに当たる）
- 耐えるべき荷重の上限水準には一応の目安があるものの，超過の可能性も無視できない（例えば地震）

という条件下でものを考えるなら，「ぜい肉がつく」ことを忌避する強い理由はなくなり，場合によってはあった方がよい，という結論もあるだろう．橋でいわゆる二次部材といわれる横構や対傾構（座屈安定のための分岐制御としては有効に機能するが）に，降伏後の応力再分配まで機能要求するのには無理があるが，建築物の壁は，平常時（弾性挙動時）の力の伝達のハイアラーキーではごく低位にあるものの，弾塑性挙動の制御には有効に活用しうる「遊び」の部分である．この場合，ごく稀に生じる極大荷

重値への危機管理として、ある程度の損傷を許容しても、耐荷能力だけは確保しようと考えことになる。よって、弾性限界は、残留変形等、損傷の有無という分別の意味はあるかも知れないが、余り本質的な問題にはなりそうもない。

PC, RC 構造であれば、鉄筋・PC 鋼棒とコンクリートの役割分担があるため、スリム化された断面でも、降伏 終局限界というわけではないが、これが土木構造力学の基本パラダイムになっているとまではいえない。

地震時の要求性能に関しては、これまでいろいろな立場からの発言があつて、その中には上記の歴史的（学術文化的）背景を踏まえて「弾性限界」を重んじる立場もあったかとは思われる。歴史的に、弾性限界 終局限界というニュアンスをもたせていた時期があつたというのは前述のとおりである。「現在レベル 1 と呼んでいる地震」を、「終局限界を照査すべき地震の水準」と見なしていた時期の分水嶺は、建築基準法で新耐震設計法が取入れられた 1980 年頃と思われる。繰返すが、「レベル 1 に対応する性能が弾性限界」というコメントは、20 余年前の技術水準における「終局強度照査」であつて、当時それを「残そうとした」のは、技術が進歩する過程において、「急激に、不連続に照査項目が変更される」ことを防ぐため、「本来過渡的な措置として」行われた行為のはずである。ある時期が過ぎれば舞台を去るべき規程なのである。リレーに例えれば、「終局強度照査」チームのランナーである「レベル 1 に対して弾性限界を照査」が走り終え、バトンを「レベル 2 に対して終局限界（損傷許容的、人命財産の確保の要求性能）を照査」に渡して、速やかにコースを外れるべきところ、他チーム（使用限界照査チーム？）の、次の出走順の選手のような顔をして、渡したバトンを離さずにノロノロ追走して「足を引張って」いるような構図であろう。

(3) 過去におこなわれた類似の議論

類似の歴史をたどれば、この種の議論は、かつて（1980 年代後半から 90 年代初頭にかけて）耐震グループとは独立に、尾坂芳夫教授を委員長にして、土木学会構造工学委員会に「鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会」が創設され、鋼構造グループ（代表格は西野文雄教授）とコンクリートグループ（同：岡村甫教授）の間で盛ん交わされた⁴⁾。

道路橋示方書 コンクリート橋編が RC 編と PC 編の合体で成立したのは 1978 年のことであり、この際、「許容応力度法による断面照査」と「係数倍された設計荷重（当時の AASHO 流の、 $1.3D + 2.5(L+I)$ and $1.7(D+L+I)$ and $1.3(D+E)$ など）に対して終局強度の照査」という規定が並存することとなった。この段階では、各々の「役割分担」についての明確な説明は解説文の中でもなされていない。その後コンクリートのグループは「コンクリート耐力は局所的な応力挙動では決まらない」「許容応力度法で問題にしている局所的な応力挙動で処理できるのは、ひび割れなど、使用限界に対応するものである」といった説明を加え、なし崩し的に「許容応力度法 = 弾性計算 = 使用限界（or 非終局限界）」という解釈が定着した。鋼構造での解釈「剛性急低下 = 不安定挙動 = 終局限界 許容応力度法 = 終局限界」とこれは一致せず、上記論争の争点の一つとなった。

もともと鋼構造の耐力算定における関心の対象は、部材の座屈挙動に向いており、非弾性挙動をも包含する耐力曲線を実験・解析から求めてきた研究の歴史がある。これを許容応力度設計体系の中で表現してきたことを踏まえて、「許容応力度法＝弾性計算＝使用限界（or 非終局限界）」という解釈に異を唱えたものであった。ただその一方で、「管理可能な荷重の条件のもとで、構造物の軽量化、長大化を追及する」という技術史上のパラダイムの発想から抜けられず、耐震で有効とされる「変形によるエネルギー吸収を保证する」といった思想への対応は遅れがちであったことも事実だろう。

一方、1986 年のコンクリート標準示方書設計編の改訂に際し、樋口芳郎教授（故人、改訂時のコンクリート委員長）は学会誌上で、「コンクリートの許容応力度法もかつては終局限界照査であった」「その役割は変質しつつあるとはいえ、歴史的経緯にも十分な注意をはらうべき」という趣旨のことを述べている。このように、耐震レベル 1、2 の議論以前にも、「異なった荷重水準、異なった耐力評価」による終局限界照査の混在がみられたわけであるし、その認識をもつ専門家は多数とはいえないまでも、存在していた。

今日なすべきことは、こうした歴史の混乱を教訓としつつ、弾性限界という固定観念から自由になって、地震時の使用性として相応しい限界状態を定義することであろう。

2.3 通常時使用性と地震時使用性

ここまで述べてきたことを踏まえ、どのような限界状態が妥当であるのか考えるのが、この報告書本来の目的に適ったことである。これは次の3章で主に記述されるが、橋渡しの意味でいくつか挙げてみることにしよう。

- ・ 「修復限界状態」：国土交通省が2002年10月に発表した「土木建築にかかる設計の基本」にこの概念が示されている⁵⁾。終局限界状態と、無損傷（弾性限界）の間に、もう一つ限定的損傷を記述する力学的な設計上の目安を置いた方がよい（場合が多い）という認識は、土木建築双方の耐震設計研究者の間に広く定着していると考えてよいであろう。上記「設計の基本」は、IS02394やEurocode-0に対応する日本版として、耐震設計の重要性を強調する意味もあって、終局限界・使用限界と並立して示している。しかしまた、2.1で述べたような、使用限界状態の広範な解釈に従うなら、修復性の階層的な位置付けを、使用限界状態に含まれる一概念（特殊な地震時使用性）として理解することも十分可能である。議論を尽くしていくことが望まれる。なお、上記「設計の基本」の議論の過程では、「橋：軽微な応急処置で緊急車両の通行を可能にするレベルのダメージ」という運用上の理解に対し、「建築：軽微な補修で住み続けられるor財産性の保持」というような齟齬は存在した。しかし、個々の使われ方（やマーケット）の相違を反映した、ある種の経済性の観点から理解しうる損傷指標（としての要求性能）という解釈が十分可能であったという理解を付記しておく。
- ・ 一方で、純粋に字義通り、使い勝手というような意味で「使用限界状態」に該当するものがあるかどうか、考えてみる価値はあるだろう。地震時の揺れに対して不快を感じない、という程度のことなら、余り意味があるとは思えない。しかし建築ならば、例えば最先端のインテリジェント・オフィスビルに高い賃料を払って入居するような条件の元では、「ビジネスが止まらない」「メモリの消失などが起こらない」といったニーズはあるであろう。免震・制振性能への要求と理解すべきかも知れない。
- ・ 発送電施設における「停電」、鉄道における「遅延」をもたらす応答も、使用限界になるのだろうか？
- ・ 跨線橋などからの物体の落下は？（落下したもののそのものの安全というより、下の部分の安全）
- ・ 「耐久性限界状態」：修復に近いかも知れないが、使用というニュアンスもなくはない。地震荷重作用時に、構造物にそれとわかるダメージが出るでもなく、ユーザに支障をきたすようなことがない場合でも、無傷とは限らず、長期的に老朽化の進行を促進するような状態が発生しているかも知れない。（次節に、前川委員による耐久設計と耐震設計の一元化の議論を載せる）
- ・ 上記のうち、修復限界については、本格復旧までの所要時間ということも重要な経済パラメータであろう。

2段階設計（レベル1，レベル2）という枠組みにすらとらわれずに論ずるならば、例えば「地震発生」というイベントを発端とする、イベントツリーを想定してもいいだろう。様々なレベルの地震動超過の有無（レベル1.5があってもよいし、もっと細かく分けてもよい）の分岐に続いて、構造物の設計内容（あるいはフラジリティ曲線）による分岐があり、修復期間や使用性に影響される間接被害なども枝分かれに含まれ、経済的な被害想定が最後が続くというイメージである（ただし2.1に述べたように、人

命にかかわる被害想定を経済尺度で述べるのは穏当でない意味がある)。このイベントツリーは、「いくらかけて」「どこをどう直せば」そのツリーの内容をどう改善できます、というような使い方もできる。その内容を、被害金額を横軸、超過確率を縦軸にして示せば、リスクカーブになる(リスクカーブの詳細については 6.1 節を参照のこと)。

誤解のないように述べると、ここに挙げた使用限界状態は、どんな設計においても照査が義務付けられる「標準」を意図したものではない。構造物の状況と、発注者の希望に応じて適宜選択すればよいのである。設計の手間と、現実のライフサイクル・リスク/コストのバランスから判断すればよい。このように考えることは、本質的には設計計算を、「リスクマネジメントのための、特定条件のもとでのシミュレーション」としてとらえるものであって、確定論的に「計算で OK と出たから絶対大丈夫」というものではない。こういう発想が「常識」に近づいているとまではいえないだろうが、徐々に受け入れられつつあるのが、今日的な設計の状況と理解してよいであろう。

参考文献 (2.1 ~ 2.3)

- 1) 日本規格協会：ISO2394 General principles on reliability for structures, (構造物の信頼性に関する一般原則 英和对訳版) 1998.6.
- 2) 日本規格協会：ISO3010 Basis for design of structures – Seismic actions on structures, (構造物の設計の基本 - 構造物への地震作用 英和对訳版) 2001.12.
- 3) 日本規格協会：ISO13822 Basis for design of structures – Assessment of existing structures, (構造物の設計の基本 - 既存構造物の性能評価 英和对訳版) 2001.12.
- 4) 土木学会構造工学委員会鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：【委員会報告】鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則，土木学会論文集，No.450/I-20, pp.13-20, 1992.7
- 5) 国土交通省：土木建築にかかる設計の基本，2002.10.
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021_.html