

南海地震を前にして、性能設計における耐震設計とは

元高松港湾空港技術調査事務所

前任建設管理官 下元 幸夫

1. はじめに

港湾の技術基準が平成19年4月より、従来の仕様規定から国際標準となる性能規定化への移行を柱として改訂されました。改訂では性能規定化とも相俟って地震動の考え方も変更され、連動したかたちで耐震設計も様変わりし、今次改訂の目玉ともなっています。改訂によって性能規定化と耐震設計との関係がどのようなになったのか、切迫する南海地震を前にして耐震設計法をひもとくことは今日的意義があると思いますので、本題のところに焦点をあて、本稿で考えてみたいと思います。



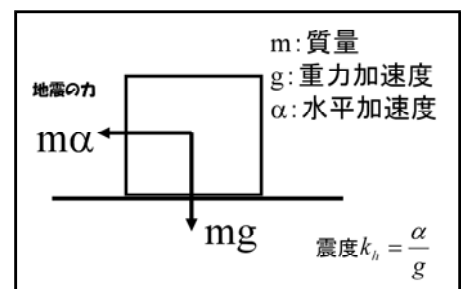
2. 耐震設計の意義とその流れ

まず、耐震設計とはなにか、常時と対比して地震という作用に対して設計することと言えます。一般的な設計では、最初に常時の作用に対して設計を行い、それから耐震設計を行います。港湾の構造物では、防波堤は波浪が大きいため地震時で断面が決定されることは希ですが、土圧が支配的な作用となる岸壁などでは地震時によって断面が決まります。日本は地震国であるため、港湾のみならず土木・建築の構造物は地震時によって断面が決まることも多く、地震被害を受けるたびに地震力の考え方や耐震設計法が変わってきました。

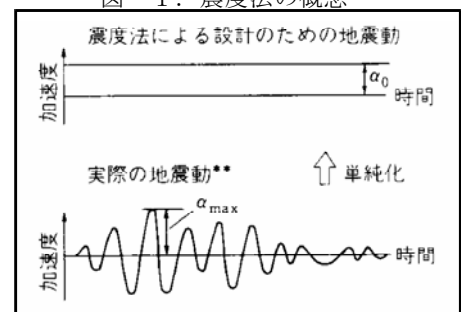
変遷を遂げてきた耐震設計法ですが、考え方として地震力という作用に対して構造物の耐震性をどのように確保するのか、地震力と構造物の耐力の関係という点では変わりません。つまり、耐震設計の意義は、地震力という作用の大きさに対して施設の耐震性をどのレベルにするのか、市民生活を守るために不可欠な施設の機能を維持するための水準を設定することと考えられます。水準の設定に際しては、地震後に保有する施設の性能に対して、人命を守るための観点や経済性の観点から検討されます。

耐震設計が行われ始めたのは、関東大震災が契機となってからですが阪神大震災前までは構造物の供用期間中に数回発生するような中規模地震（レベル1地震動と言う）に対して行われてきました。

手法としても震度法（図－1参照）が基本で、地震を慣性力として静的に構造物に作用させる方法が主流でした。この震度法は、地盤の揺れに対して構造物の揺れが増幅しない場合に適用されており、例えば直接基礎の地上構造物のような剛な構造物、港湾で言えば重力式構造物に使っています。また、地震動の表現も実際は図－2に示すような地震波形を最大値の加速度で単純化しています。地震作用と構造物の動的挙動の研究が進むにつれ、構造物が受ける慣性力はこのような単純な図式ではなく地震波形や地盤特性、構造物のもつ固有周期との関係によ



図－1. 震度法概念



図－2. 震度法の地震動

って慣性力が異なることが分かり、この点を修正したのが修正震度法です。この他にも修正震度法の一種である保有水平耐力法や応答変位法があり構造物の特性に応じて使い分けています。保有水平耐力法は、作用する慣性力に対して構造物が保有する水平耐力が上回るように設計するもので、構造物の非線形応答を考慮しているのに特徴を持っています。応答変位法は、自己振動を発生させることなく地盤の変形に追従するような回りに比べて余り剛性のない地中構造物に適用されるなど、対象構造物の特性に応じて耐震設計法が進化してきました。

3. 耐震設計法の画期となった阪神大震災

そして、1995年に耐震設計法の一大転機となった阪神大震災が発生しました。地震による被害によって、あらゆるインフラ施設が壊滅的打撃を受け、それまでの日本の耐震基準は全て見直されて構造物の耐震設計手法に2段階設計法が採用され、動的解析法が脚光を浴びていくこととなります。

1999年改訂時の港湾基準においても、2段階設計法が取り入れられました。2段階設計法とは、対象とする構造物に対して1、2回遭遇するかもしれない地震に対して損傷しないように設計する第1段階と何百年に1度のほとんど遭遇する可能性が低いとしても極めて大きな地震に対して致命的な被害を受けないように設計する第2段階からなっています。

2段階設計法では地震動をレベル1、レベル2と作用する力を区分しただけでなく、それぞれの作用に対してどのような性能を確保するのか、性能という考え方も一定導入されました。レベル1では、壊れる壊れないで判定する一方、レベル2では使えればいいという機能の保持を基準として設定します。このような考え方に至らざるを得なかったのは、レベル2の地震に対して損傷しないように設計すると多大な費用を要するといった経済的な制約からでした。

レベル2の地震に対する設計というのは、機能の保持が基準ですから、どこまでの壊れ方を許すのかという問題に通じます。壊れる壊れないの2者択一でなく、どのような壊れ方をするか、つまり変形量を算定することが求められます。このような要請から、耐震設計法も動的解析法が主役の座にすわるようになってきました。

動的解析法は、図-3のように構造物や地盤を有限な要素に分割してモデル化し、地震動によって有限要素にかかる慣性力を時間ごとに作用させて運動方程式を解き、時間ごとの応答値を算出する手法で、理論的には最も優れた解析法と言えます。

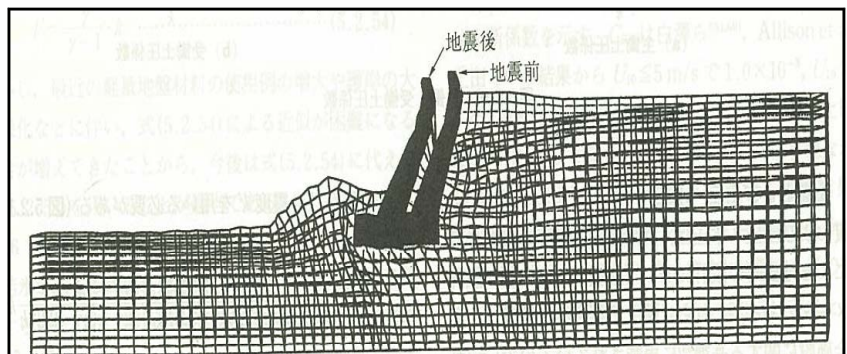


図-3 動的解析法による護岸の変形計算例（海岸便覧より）

4. 性能規定と2段階設計法

今日では港湾基準の改訂のように、構造物設計に対して性能規定型設計が取り入れはじめています。性能規定型設計とは、構造物に要求された機能さえ満足すれば、どのような手法や材料でもよい

という設計手法です。従来の2段階設計法も入力地震動や計算法を指定した仕様規定型であったため、港湾の基準改訂でも手法そのものに対する縛りがなくなり、地震工学の進歩もあって大きく変わりました。性能規定型に移行するに当たっては、レベル1やレベル2の作用に対して照査していた性能を明確にすることが求められるため、構造物に対する使用性や安全性といった要求性能を定めています。それ以外は自由というのが考え方です。従来でも地震に対する構造物としての性能を定めるという考え方自体はあったわけですから、それほどの大転換と言ったわけではありません。

港湾の基準で大きく変わったのは、地震動の考え方です。地震動強度は、図-4に示すように震源特性、伝播経路特性、サイト特性に依存するとともに、構造物への地震応答は地震動の振幅（加速度）だけでなく周期成分にも左右されるため、構造物の対象地点毎に地震動強度を設定することとしたことです。従来の地震動の表し方はレベル1は震度、レベル2は時刻歴波形で表現していましたが、両方とも時刻歴波形とし、レベル1では再現期間が75年となるような一様ハザードスペクトルとしています。

どのように港湾基準が変わったのかの説明をしましたが、非常に難しく感じられると思います。肝心な点は構造物対象地点で対象となる地震による地震動を各々つくるということです。

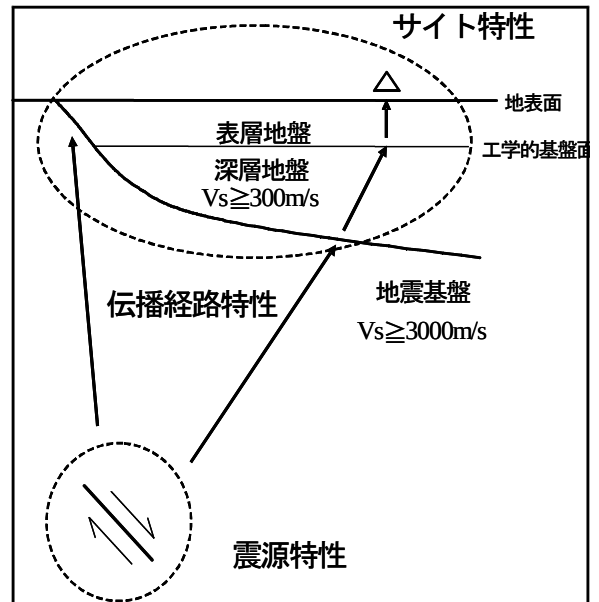


図-4 地震動の考え方

こうした地震動を考えるうえで、しっかりと押さえておかなければならないのはレベル1あるいはレベル2というのはどういう地震かという点です。土木学会でもこの点は今だ重要な論点になっています。レベル1地震は供用期間中に1～2回発生する地震ということで「発生頻度」を問題にしてきました。一方、レベル2は希でも壊滅的打撃を被る地震ということで「大きさ」を問題にしています。ところが、この50年間に発生する確率が80%とされる南海地震はどちらなのか、地域によってはこの考え方が成り立たない場合がでてきています。南海地震の他にも東南海や宮城沖地震もそうです。

地震動からだけ見れば、このような定義区分が実際の設計に際しては混乱をうむため、構造物に対する耐震性能との関係で考えていくことが必要になっています。レベル1、2に対する地震に対する要求性能としての限界状態を定義し、構造物の性能を規定していく、まさに性能規定型の考え方が要求されようになってきています。

5. 南海地震を前に、どのような耐震設計をすべきか

耐震設計を性能規定的に考えていく場合、2段階設計法は合理的と言えます。しかし、四国における施設の耐震評価や設計を行っている今日、これらの施設は必ずや供用期間中に南海地震を被ることは確実です。（図-5）供用期間中に必ず被ると言うことから言えば、南海地震はレベル1であろうが、レベル2であろうが南海地震に対して、構造物はそれに対する求められる機能は果たさなければなりません。

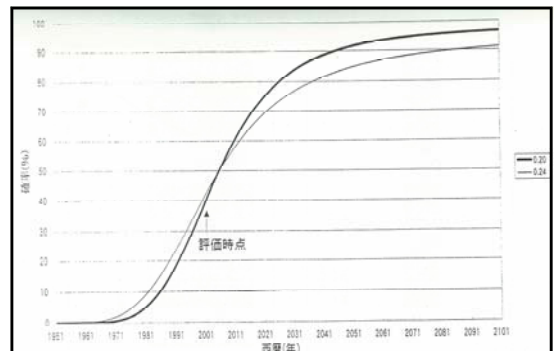


図-5 30年後までに発生する確率の時間推移

耐震設計の役割が、人命を守ったり経済活動を保証すると言った社会的意義を背景にしているならば、地震の切迫度を考慮した耐震設計という考え方もあり得るのではないかと思います。地震は地殻のひずみエネルギーを放出して発生するわけで、一度放出すれば次の発生までは相当な期間を要し、地震直後につくられる構造物の供用期間中には遭遇しないために、そのような地震を対象とした設計は不要との考え方が出来ます。逆に言えば、1946年に発生し間近に迫っている南海地震に対しては、南海地震を対象に耐震設計をすべきではないのでしょうか。もちろん、全ての施設に同様の機能を持たせることは、経済的に困難であり、施設の重要度を鑑みた性能規定を設定することは当然です。実際に南海地震を前にして、耐震設計を考えた場合には2段階設計法が妥当かどうかの議論の余地があるのではないのでしょうか。

もう一つ、性能規定化での耐震設計を考える場合に、基準類の範疇だけでなく要求性能を社会的に設定することも必要です。一般的な設計という枠組みでの性能規定は、施設の部材毎に対して設定されます。しかし、その施設が本当に機能するのか、設計の枠組みだけでなくインフラ全体のなかで位置づけていくことも重要な観点です。

具体的事例で言いますと、阪神大震災において、写真－2のように地震がきても大丈夫なようにつくられた耐震強化岸壁は実際にも壊れなかったのですが、アクセスである橋が落橋して使えませんでした。要求性能的に言えば地震に対する使用性が欠如したわけです。一方、通常の岸壁でも写真－3のように壊れていても実際には使われ使用性を発揮しました。この事例が示すように、性能規定というものの考え方をする場合には、避難所に緊急物資を運ぶということが要求されているわけですから、アクセスも含めて個々の施設だけでなく全体の施設を見渡して、目的が達成されてこそ性能規定化における耐震設計が出来ていると言うように考えていかなければなりません。こうしたマクロに見る視点こそ、性能規定化の設計に対して最も求められるものだと思います。



写真－2 無傷だったが落橋で使えなかった岸壁



写真－3 壊れていても使われた岸壁

6. さいごに

耐震設計のながれや役割を振り返りながら追っかけてきましたが、その変遷は時代背景を受けた社会性を帯びて変わってきています。しかし、どんな時代においても「何のために耐震設計をするのか」この問いかけが、耐震設計法の進化の原動力だったと思います。耐震設計を考えるうえでは、この問いかけをすることこそが最も重要なことかもしれません。

改訂された港湾の基準においても、2つの問いかけの観点でつくられており、ひとつは社会的安全性の観点、2つ目は必要に応じた経済性の観点です。人命や市民生活を守るために耐震設計は行うべきものではあるが、経済的な限界もあり合理性を欠かさないようにということだと理解しています。

切迫する南海地震を前に、「何のために」という問いかけを常にしつつ、2つの観点で今後の設計に望んでいきたいと考えています。