

PC 港湾構造物への限界状態設計法の 適用に関する検討

大 即 信 明*

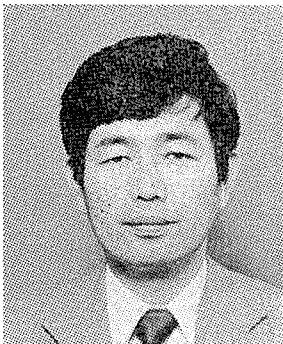
1. はじめに

我が国において、プレストレストコンクリート（以下 PC と略記する）が各種の構造物に一般的に使われるようになって 35 年程度経過した。

港湾構造物の分野においても、主としてさん橋の上部工などに PC が用いられてきた。しかし、港湾構造物は自重によって、波力や土圧などの外力に抵抗する形式のものが多いこと、腐食に対する環境条件が厳しいことなどから、PC を使用した構造物の割合は小さかった。すなわち、従来の港湾構造物は、鉄筋コンクリートあるいは鋼杭、鋼矢板などの鋼材を用いた形式で対処でき、PC 特長を十分に発揮できる形式のものは少なかった。

しかし、港湾構造物の建設された地点が、たとえば、大水深で波浪の大きい地点、軟弱地盤が厚く堆積している地点など更に自然条件の厳しいところが次第に多くなってきた。このようなところに建設される港湾構造物には、厳しい条件に対処できる構造形式であること、当然のことながら高くなる建設費をおさえるようにすることが要求される。また、構造物の機能も、たとえば、単に波浪を防御すればよいといったことに加えて、反射波を低減させるなどの消波機能を合わせもつこと、あるいは海水の流通をよくするなどの海域環境に及ぼす影響を考慮するなど多様化してきた。

このような港湾構造物をめぐる環境の変化に対応するため、従来の構造形式にとどまることなく、それらの改良、あるいは新しい構造形式の開発などの努力がなされるようになった。



* Nobuaki OTSUKI
運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官

プレストレストコンクリートも、このような背景の中で、海外では、大型の海底貯油タンクに用いられていることなどからみても、従来の限られた用途から広く港湾構造物全般にわたって、更には海洋構造物に対して、あらためて、その適用がはかられないか検討されてきた。

その成果の一つとして、曲面スリットケーソン式防波堤が実現するなど、PC の港湾構造物への適用がはかられるようになった。

しかし、PC を用いた港湾構造物の設計法は、上述のように歴史が浅いことから、暫定的な指針¹⁾によっている。この指針は、限界状態設計法を基本としたものである。

コンクリート部材の設計法としては、我が国では許容応力度法が使用されてきている。しかし設計法としては許容応力度設計法よりも限界状態設計法の方が合理的であり、欧米の多くの国では既に限界状態設計法に移行しており、我が国でも土木学会の「プレストレストコンクリート標準示方書」(昭和53年)²⁾において、許容応力度法に、破壊に対する安全度の検討が加味されている。また、同じく土木学会において「コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案)」(昭和58年)³⁾が作成され、更に検討が加えられている。

ここでは、限界状態設計法の概要を説明するとともに港湾構造物に限界状態設計法を適用する場合の、いくつかの問題点について検討を加えた。

参考とした指針としては、上記の土木学会のものに加えて、CEB-FIP の指針⁴⁾や、海洋構造物を対象とした FIP の指針⁵⁾などである。

港湾構造物であることの主要な問題として、ここでは波力の荷重作用の特性値の定め方、波力が繰り返し作用することに対する材料の疲労、および耐久性にかかわるコンクリートのひびわれの問題などについて設計のめやすを与えるため若干の考察を加えた。

2. 限界状態設計法の概要

2.1 コンクリート部材の設計法

周知のことではあろうが、許容応力度設計法、終局強度設計法および限界状態設計法について概説する⁶⁾。

(1) 許容応力度設計法

従来から行われてきた鉄筋コンクリートの設計法は、鉄筋とコンクリートをともに弾性体と仮定し、コンクリートの引張強度を無視して計算した時の部材の各点に作用する応力度が、それぞれの材料の許容応力度以下であることを確かめる方法である。ここで、安全性は各材料の強度をそれぞれに対する安全係数で除した許容応力度とすることによって確保する形をとっており、この点から許容応力度法とよばれる。また材料を弾性体と仮定（弾性体として挙動する範囲内を対象としている）していることから弾性設計法とよばれることがある。

この設計法は非常に簡便であり、従来、世界中で長い間用いられてきており、その間に不都合が生じるたびに改良が加えられ、我が国でも一般にはこの方法により設計が行われている。

しかし、この設計法にはいくつかの欠点があり、現在では世界の多くの国で用いられなくなっている。その欠点のおもな点は、

- ① 各材料はそれぞれ非線形の性質を有しているから部材各点に作用する応力度は必ずしも断面力に比例しない。したがって、この方法では破壊に対する安全度が明らかでなく、また各部の安全度を一定に保つようにすることも困難である。
 - ② 荷重に関する問題もすべて材料の許容応力度によって取り扱っているために荷重の性質の相違や荷重の組合せの影響を合理的に取り扱いにくい。
- などである。

(2) 終局強度設計法

この方法は材料の非線形性を考慮して求めた部材断面の耐力が、その断面に作用する設計断面力以上であることを確かめるものである。安全性は、従来の設計荷重に適当な大きさの荷重係数を乗じて設計断面力を求めることによって確保する形をとっている。

この方法によれば、破壊に対する安全度の確保は許容応力度設計法によるよりは確実であり、荷重の特性も、荷重係数を適当に変えることによって設計に反映することも可能であって、前述の許容応力度設計法の欠点を克服しており、この点では一歩進んだ設計法といえる。

しかし、この方法は許容応力度設計法とは逆に、材料の特性を合理的に設計に反映することが困難である。また安全性の確保については便利であるが、常時の使用性の確保については別途検討する必要があるという欠点も持っている。

(3) 限界状態設計法

終局強度設計法の問題点を解決し、安全性および使用性を一つの設計体系で合理的にとり上げようとするのが限界状態設計法である。

この設計法は、1964年にCEBによって提唱され、その後、1970年および1978年にはFIPとの協同による基準案⁹⁾が発表され、今後、世界のすう勢はこの設計法の採用に向かって進んでいくものと思われる。

限界状態設計法の概要を簡単に述べる。

構造物に外力が作用すると、その外力の大きさによっては構造物の機能あるいは安全性にとってなんらかの不都合が生ずる。それを超えると構造物あるいはそれを構成する部材が機能あるいは安全性を損なう。このような設計目的を満足しなくなる状態を限界状態とよぶ。

限界状態は、一般に、最大荷重力に対する安全性に対応する終局限界状態と通常の使用性と耐久性に対応する使用限界状態とに区分されるが、繰返し荷重の卓越する場合には疲労に関する問題は終局限界状態に含める場合もあるが、疲労限界状態として別途取り扱うことが便利である。

「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」ではそれぞれ次のように定義してある。

終局限界状態——構造物または部材が破壊したり、転倒、座屈、大変形等を起こし、安定や機能を失う状態

使用限界状態——構造物または部材が過度のひびわれ、変位、変形、振動等を起こし、正常な使用ができなくなったり、耐久性を損なったりする状態

疲労限界状態——構造物または部材が、変動荷重の繰返し作用により疲労破壊する状態

限界状態設計法は、安全度の検証方法として初歩の段階ではあるが、確率論的手法を取り入れ安全度を合理的に評価することを目指している。確率的解析を行うには、荷重の変動、材料の品質のばらつき等を知らなければならない。しかし、実際には、これらを厳密に扱うことは非常に困難である。

そこで、これらの要素の不確実性は、荷重作用および材料強度の特性値において考慮するとともに、荷重作用および材料強度について、安全係数を導入することによって考慮している。

そして、設計計算は、各限界状態に対して、特性値と安全係数を用いて求まる荷重作用の影響が、同様に求まる構造断面の抵抗力以下であることを確かめることを行行う。

終局限界状態に対する安全性の検討は、図-1⁹⁾に示すように、材料強度の特性値 f_k を、それぞれの材料に応じた材料強度の安全係数 r_m で除した材料強度の設計用値 f_d を用いて部材断面の設計用耐力 R_d を求め、これが荷重の特性 F_k 値に安全係数 r_f を乗じた設計用値 F_d より求まる設計用断面力 S_d 以上であることを確かめることによって行われる。すなわち限界状態設計法で

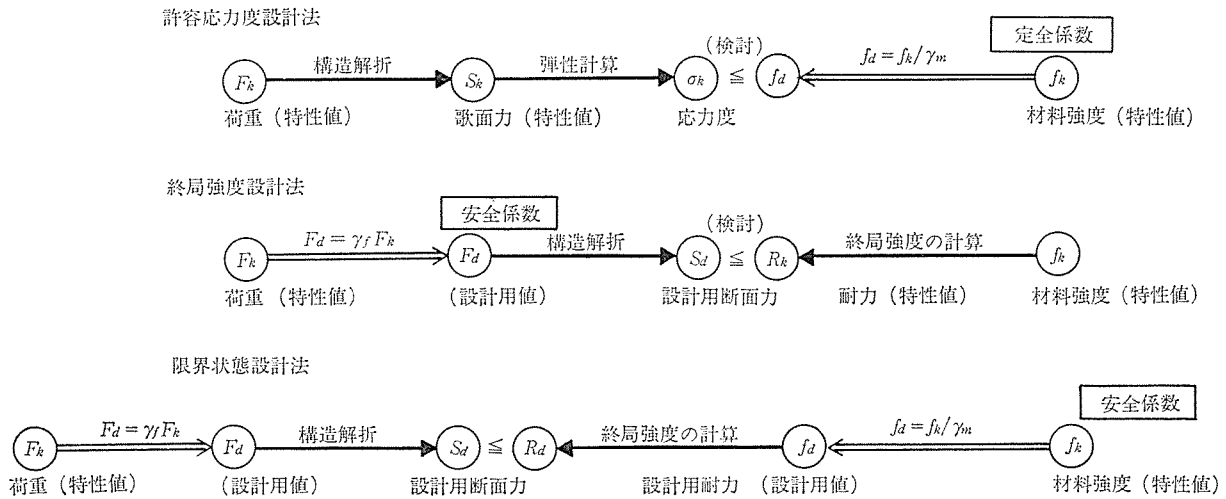


図-1 各種設計法における安全性の検討方法

は、荷重に対するものと材料に対するものとの2種類の安全係数を用いることがその特徴である。このように安全係数を2つに分離することによって、鉄筋とコンクリートという異種材料の扱いも、また活荷重と死荷重あるいは常時荷重と地震荷重のような異なった性質の荷重の問題も、それぞれ合理的に取り扱えるのである。

使用限界状態の検討については、使用限界状態で対象とする荷重の特性値に、その荷重に対応する安全係数を乗じた設計用値に対して、部材が過度のひびわれ、変位変形、振動等をおこし、正常な使用ができなくなったり耐久性を損なったりしないように、それぞれの許容限界以下となることを確かめることによって行う。

2.2 限界状態設計法の構成上の特徴

限界状態設計法のいま一つの特徴は、設計法の部分的な改良が比較的容易なことである。

許容応力度法は材料の強度を安全係数で除した形の許容応力度を用いることによって、安全性の確保をはかっている。この場合、許容応力度は単に材料の強度のパラッキ、持続荷重や繰返し荷重などの荷重の性質が材料の強度に及ぼす影響など材料の強度にかかわる要素を考慮するだけにとどまらず、荷重の性質、荷重の組合せの頻度、設計外力と実際の外力の相違、設計理論と実際の構造物の挙動の相違、破壊時の様相、構造物の重要度等の種々の要素に対しても、部材が安全を保たれるように定められている。その数値は多くの設計の実績により確認され、主要な許容応力度の値は示方書の類に規定されている。すなわち許容応力度設計法においては不確定要素あるいは数値計算にのらない要素の多くは許容応力度によってカバーされているので設計法の一部を構成する事項を変更することは、その事項そのものはより妥当なものであっても、必ずしも容易ではない。

一方、限界状態設計法においては、後述のように荷重

作用および材料強度それぞれに対して特性値および安全係数を用いること、構造物の終局の状態および常時の使用状態における検討を行うなどのように、個々の要素あるいは検討事項が独立して処理されることから、設計法の構成要素の一部を変更することは、許容応力度法と比較すると容易である。

すなわち、限界状態設計法はその構成要素をいわばカートリッジ式に取り替えることが可能であり、すぐれた研究成果を取り入れることが容易である。また施工実績についても、たとえばコンクリートの品質管理が向上すればそれをコンクリートの強度の特性値に反映させやすいという利点がある。この意味でも限界状態設計法は合理的な設計法といえる。

したがって、PC 港湾構造物のように、実績が少なく今後、設計法を確立させていかなければならない分野においては適した設計法といえるであろう。

3. 特性値および設計用値

3.1 材料強度の特性値

材料強度の特性値とは、実際の強度がある一定の確率でしかそれを下まわらないような値である。特性値を定めるためには、統計的な分布を仮定するが、一般には、正規分布を用いてよい。

強度の特性値 f_k は、この場合次式で定義される。

$$f_k = f_m(1 - k\delta)$$

ここに、 f_m ：試験値の算術平均値

δ ：試験値の変動係数

k ：係数

f_k より小さい試験値が得られる確率は CEB-FIP の基準等では 5% とされており、正規分布の場合 k の値は 1.64 である。

3.2 材料強度の設計用値

材料強度の特性値は、強度の変動を考慮して定められるのであるが、それは材料強度の標準的な試験において現われる変動を対象とするもので、その他の要因による変動は安全係数（材料係数）で取り扱い、材料強度の特性値を材料係数で除した材料強度の設計用値を用いて設計を行う。

すなわち材料強度の設計用値 f_d は次式で表わされる。 $f_d = f_k / r_m$ 、ここに、 f_k は材料強度の特性値、 r_m は材料係数である。

材料係数では以下のような事項が、考慮の対象とされる。

- ① 材料強度の特性値からの危険側の値となる可能性
 - ② 構造物中における材料の強度と、試験体から得られる強度との差
 - ③ 主として施工中に生ずる局部的欠陥
 - ④ 断面の不正確さ
 - ⑤ 材料の特性が限界状態に及ぼす影響
 - ⑥ 材料の特性の経時変化
- などである。

これらの複雑な要因を理論的に取り扱って適当な材料係数を求めることは現段階では不可能である。

コンクリートおよび鋼材に対する材料係数として、たとえば表—1 に示す値が考えられる。この値の理論的根

表—1 材 料 係 数

限界状態	鋼 材	コ ン ク リ ー ト
終局限界状態	1.15	十分注意して管理して製造した場合 (工場製品等の場合) 1.4
		現場打ち等の場合 1.5
使用限界状態	1.0	1.0

拠は明確ではないが、各種の規定共通にこの値が用いられていること、荷重に対する安全係数をも考慮すると、従来から設計されている構造物について、限界状態設計法によっても、ほぼ同様のものが設計できると考えられることから、この値を採用してよいと思われる。なお、鋼材に対する値よりもコンクリートに対する値が大きいことは、コンクリートの強度のばらつき、コンクリートの供試体と構造物における強度の差異等を考えると妥当であろう。

3.3 荷重作用の特性値

(1) 荷重作用の特性値の原則

荷重作用の特性値は、構造物の耐用期間中にあらかじめ定められた確率で、その値を（更に不利な値の方向にむかって）超えない値と定義されるが「コンクリート構造の限界状態設計法指針提案」では次のように表わされている。

- ① 荷重の特性値 F_k は、最大または最小荷重のうち構造物にとって危険側の保証値とする。保証値とは荷重のばらつきを想定したうえで、構造物の施工中および供用期間中に生ずる最大または最小荷重の期待値とする。
- ② 特性値は、検討すべき限界状態について、それぞれ求めなければならない。限界状態としては、一般に、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態を考慮すればよい。
- ③ 荷重の規格値 F_n がその特性値とは別に定められている場合には、荷重の特性値 F_k は、その規格値 F_n に荷重修正係数 ρ_f を乗じた値とする。

(2) 終局限界状態における波力の特性値

港湾構造物に対する荷重作用として、最も重要な波力について、その終局限界状態における荷重作用の特性値をどのようにとればよいのか検討する。なお、ここでは沖波を対象とする。

まず、橋梁などの一般的な PC 構造物を対象に、特性値の特徴を考えてみる。

たとえば自動車荷重については、自動車の車種を限定すれば、その荷重の大きさの分布の幅は限られている。また最大値が規定されており、それをオーバーすることはあっても、その最大の値にはおのずと限界があり大きく超えることはない。また荷重の作用する頻度は多い。この特徴は、人為荷重一般にほぼ共通していると思われる。このように、最大荷重の分布の幅は比較的小さい。また、耐用期間の長さにはほとんど影響されない。

したがって、特性値をどのように定めたとしても、最大荷重の平均値と特性値との差、および最大値と特性値の差はいずれも小さい。すなわち特性値はこれを超す確率が小さい値であるが、最大荷重の平均値にも近い値でもある。また最大荷重の平均値近傍の大きさの荷重はしばしば作用する可能性がある。

一方、荷重作用としての波についてみると、次のような特徴をもっている。

- ① 通常の港湾構造物に対して考慮される耐用期間以上の期間の波浪観測記録はなく、統計的に設計波高を決定する場合は、耐用期間より短い期間の記録をもとに推定している。
- ② 再現期間に対する確率波高を考える場合、再現期間によって波高は大きく変動する。設計においては再現期間のとり方は耐用期間にかかわるから、結局耐用期間により設計波高（最大荷重）が大きく異なってくる。

すなわち、最大荷重として採用が考えられる値の幅は広い。また最大荷重は耐用期間中に一回あるかないかと

いった値である。したがって非常に大きい波が来る可能性がないとはいえない反面、安全側ばかり考えると極端に不経済な設計になるおそれもある。

波については、最大荷重に遭遇する可能性が、永久荷重や人為荷重の場合よりも小さいこと、および経済性を考慮すると、特性値を超える場合の安全性について別途検討されるなら、特性値を超える確率は永久荷重や人為荷重の場合よりも大きくってよいと思われる。しかしその確率をいくりにするのがよいかを理論的に決定することは非常に困難である。

ところで限界状態設計法においては、荷重の算出方法の不確実性や、特性値から望ましくない方向への変動に対しては安全係数（荷重係数）で考慮し、特性値に乗じて設計用値と定めることとなっている。すなわち、荷重係数の値と特性値のとり方は関係している。

耐用期間中にまず作用するおそれはないが、作用すれば重大な影響をおよぼす荷重作用（たとえば船舶の衝突による衝撃）は偶発荷重作用（事故荷重作用）とよばれているが、偶発荷重作用に対しては、荷重係数は1.0でよいとされている。

波に関しても、耐用期間中に一回あるかないかといった波は偶発荷重作用に近い性質であり、波の推定方法をきびしく、更に発生する確率を低くってまず起こり得ない波を荷重作用として、その特性値を定めたならば、荷重係数は偶発荷重係数と同じく1.0にとってもよいと思われる。これは波を偶発荷重作用として扱えばよいというのではなく、特性値の定め方の検討にあたっては、このことも考慮してよいのではないかということである。

今、耐用期間内にそれを超えることがほとんどない波として、耐用期間と再現期間に基づいた遭遇確率より、耐用期間50年の場合の遭遇確率5%の波（50年間にそれ以上の波が少なくとも一度来る確率が5%である波）を求めると、それは再現期間975年の波になる（再現期間975年とは設計者の感覚にはなじまない数値かもしれないが）。そこで耐用期間50年に対し、再現期間と同じく50年とする波と、再現期間975年の波を算出して、その関係を調べてみる。

高橋ほかは波浪に関する拠点観測10か年の記録から全国23港の高波の発生確率を推定しているが、その方法により同じ23港の再現期間975年の波高を求め、50年確率波高との比をとると平均1.3となる（実際には大きな波高の波は水深によっては砕波するので、これより小さくなることもある）。また推定値の信頼性に関して再現期間50年の推定値の95%信頼限界の上限値の50年確率波高に対する比を求めると平均1.14となり、ま

た再現期間975年の95%信頼限界の上限値の50年確率波高に対する比は平均1.5となる。

もし、遭遇確率5%としたり、あるいは更に加えて95%信頼限界の上限値の波高に対応する波力を荷重作用の特性値にとるならば、その場合は偶発荷重作用と同じ荷重係数を1.0にとってもよいであろう。逆にいえば一般の壁体に作用する波力は波高に比例するとみてよいから荷重係数が1.3~1.5であれば、特性値として耐用期間を再現期間とする波にとってもよいといえる。

設計波高は一般に比較的短い期間の記録をもとにした推定値であるから、再現期間を長くって特性値を定め荷重係数を1とするより、荷重係数に設計波高の推算にかかわる不確実な要素を含め、再現期間を耐用年数とした方が原則にかなっている。

次に、他の規定あるいは指針も参考にするべきであるが、FIPのコンクリート海洋構造物の設計施工の指針⁹⁾では波の再現期間を50~100年としている。またDNVの指針⁹⁾では再現期間は耐用期間としている。なお、DNVでは荷重係数を1.3としている。

また、設計条件は設計の各部において使い分けずに一定のものを使うことができればその方が望ましい。たとえば防波堤の堤体全体としての安定の検討に用いる設計波高よりも、PC部材の断面の設計に用いる波高が大きいとすると、堤体全体の安全に対して保証されていない設計波に対して部材断面の設計を行うことになり、設計体系が異なるからとはいえ釈然としない。また設計作業上も設計条件を使いわけるとは、設計を複雑にするだけでなく、ミスを生じさせる可能性もあり、できれば避けることが望ましい。

現行の設計法である「港湾の施設の技術上の基準・同解説⁹⁾」では設計に用いる沖波の決定方針は、

「港湾の施設の設計に考慮する沖波の諸元は、相当長期間の波浪実測値、あるいは、おおむね30年以上にわたる気象資料によって得た推算値を実測資料で補正した値に適切な統計処理を施した発生確率を検討した結果、または、仮想台風に対して計算した波浪推算値に基づいて決定するものとする。」

とされている。

また、設計の対象となる沖波としては、再現期間を構造物の耐用年数に基づいた遭遇確率から求めるのがのぞましいが、遭遇確率をどのようにとるかは、構造物の機能、重要度、投資効果などに左右され、一般的には決められないので、個々の場合に応じて、責任技術者の判断により決定しなければならない、と解説されている。

従来の防波堤の設計の実例では、設計波高を統計的に求める場合は再現期間と耐用年数を等しくとるのが最も

多いようである。

以上より、終局限界状態に対する荷重係数は後述されるが、CEB-FIP⁹⁾、DNV¹⁰⁾、ACI¹⁰⁾の指針案を参考に1.5にとるとすると、波の荷重作用の特性値は基本的には責任技術者の判断により決定されるものであるが、現時点では、通常の耐用期間に対しては、耐用期間を再現期間とする波、もしくは構造物全体の安定の検討に用いる波を用いてよいであろう。

3.4 荷重作用の設計用値

荷重作用に関しても、特性値 F_k と安全係数 (荷重係数) r_f より荷重作用の設計用値 F_d が定められる。

すなわち、

$$F_d = r_f \cdot F_k$$

CEB-FIP⁹⁾によると、荷重作用の安全係数 r_f は更に次の3つの係数に分かれる。

- ① すべての荷重が、その荷重の特性値より不利な値となる確率を考慮するもの。
- ② すべての荷重が、その荷重の特性値で同時に作用することの確率の小さいことを考慮するもの (安全係数というより荷重の組合せ係数と呼ぶほうが適当である)。
- ③ 設計上、仮定の不正確さおよび施工上の誤差により断面力の不利な方向への変化の可能性を考慮するもの。

荷重作用の組合せを考慮すると、基本的には、荷重作用の設計用値は次のように表わされる。

$$F_d = r_g G_{\text{mean}} + r_p P_{\text{mean}} + r_f (Q_{ik} + \sum_{i=1}^n \psi_{oi} Q_{ik})$$

ここに、 G_{mean} : 永久荷重作用の期待値

P_{mean} : プレストレス力の期待値

Q_{ik} : 基本の変動荷重作用の特性値

Q_{ik} : 付随する変動荷重作用の特性値、危険なもののみ考慮する

ψ_{oi} : 組合せ荷重作用のための係数

r_g : 永久荷重作用に対する安全係数

r_p : プレストレス力に対する安全係数

r_f : 変動荷重作用に対する安全係数

このように荷重作用の設計用値、安全係数の考え方はやや複雑であるので、各限界状態の項において再度述べる。

4. 終局限界状態の検討

終局限界状態の検討は、終局限界状態に用いる荷重作用の設計用値によって発生する部材力 (断面力の設計用値) より、断面耐力の設計用値が上回ることを確認することによって行う。なお、終局限界状態には種々のもの

があるが、ここでは、断面破壊の終局限界状態を主として考えている。

荷重作用の設計用値は、変動荷重作用については前述のように荷重作用の特性値と、荷重の組合せの確率を考慮する荷重組合せ係数 ψ および荷重係数 r_f を乗じて求める。組み合わせる荷重のとり方については、限界状態設計法であるからといって、許容応力度設計法と異なることはなく、許容応力度設計法と同一のものを考えればよい。しかし、荷重組合せ係数の値については現段階では議論がなされていないので、特別の検討を加える以外は、一応1.0とする。

荷重係数については、FIP等の規定を参考に表-2の

表-2 終局限界状態の荷重係数の標準値

荷重の種類					P:永久荷重 D:変形荷重 L:人為荷重 E:環境荷重 A:事故荷重
P	D	L	E	A	
1.1	1.1	1.5	1.5	1.0	

値を標準とする。表-2において荷重は次のように分類する。

- ① 永久荷重作用 (P) には、構造物あるいは部材の自重、裏込めによる常時の土圧、これらに見合う地盤反力等が含まれる。
- ② 変形荷重作用 (D) には、プレストレス、温度変化、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響などが含まれる。
- ③ 人為荷重作用 (L) には、上載貨物の重量、荷役機械の重量、船舶の接岸力などが含まれる。
- ④ 環境荷重作用 (E) には、波圧、風圧、地震による影響、潮汐による静水圧の変動分などが含まれる。
- ⑤ 事故荷重作用 (A) には、船舶の衝突などが含まれる。

ただし、荷重係数を小さく見積った方が危険側となる場合は、表-2の荷重係数1.1を0.9に変えて検討を行うものとする。

荷重作用の設計用値が定まると、これより部材力が求まる。終局限界状態の検討は、材料強度の設計用値等を用いて算定した断面耐力が、上記の部材力を上回ればよいのである。

5. 使用限界状態の検討

5.1 一般

使用限界状態には種々のものがあるが、一般に、使用限界状態に対する検討は、対象とする荷重の設計用値 F_d に対応する部材のひびわれおよび変形が、許容限度以下となることを確かめることによって行われる。

PC 港湾構造物においては、部材の変形が問題となる

ことはまれである。一方、ひびわれについては、鋼材の腐食すなわち部材の耐久性にかかわる重要な問題である。

従来の無筋あるいは鉄筋のコンクリート港湾構造物は構造物全体の重量によって波力等の荷重作用に抵抗する形式のものが多いこともあり、コンクリート部材に大きな部材力が作用して耐久性上有害と思われるひびわれが発生したり、また一部の鉄筋の腐食が構造物全体の安全や機能の著しい低下をもたらすことは殆んどなかった。したがって一般には設計計算段階で耐久性の点でひびわれの制限を考慮することはなかった。

しかし、PC 構造物の場合は PC 鋼材の破断は即部材の破壊、ひいては構造物全体の安全や機能の喪失につながる重要な問題がある。特に腐食に対して厳しい環境条件である港湾においては、その懸念が従来 PC の利用に必ずしも積極的でなかった理由の一つでもある。

しかも港湾構造物の建設水深が深くなって、強大な波力が繰り返し作用したり、あるいは構造物の機能の向上をはかるため構造が複雑化すると、ひびわれがますます問題となってくる。

そこで、ここではひびわれについて検討することにする。

5.2 ひびわれ

(1) ひびわれ

ひびわれのパターンを図-2¹¹⁾に示すが、このように複雑な形状で何をひびわれ幅として定義するかは問題である。ひびわれを腐食を促進する物質の通路として考えれば、コンクリート表面から鋼材表面にいたるひびわれ幅の平均値もしくは最小値が通路の特性をよく表わして

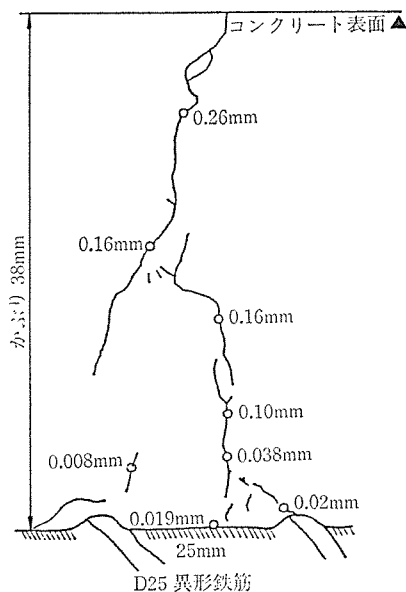


図-2 ひびわれのパターンの一例¹¹⁾

いるのではないかと推察される。しかしながら、このことについては定性的にも証明されていない。

既往の研究は、その大部分がコンクリート表面のひびわれ幅を対象としているため、どのようなひびわれ幅の指標がコンクリート内部の鋼材の腐食と関連づけるのに最適かといった議論はほとんどない。

コンクリート表面のひびわれ幅をもってひびわれを代表することが最適だという証明はないが、実際問題の処理としては現状の研究段階では表面ひびわれ幅を用いるのはやむを得ないことであり、以下の議論も表面ひびわれ幅について進めることにする。

(2) ひびわれ幅の制限値

ひびわれ幅の制限値は、厳密に言えば、鋼材のかぶり荷重の頻度、環境条件、構造物の耐用期間などにより定めるのがよいであろうが、現状の研究段階ではそういったきめ細かい決め方はできない。

しかしながら、ひびわれ幅 0.1~0.2 mm というのが腐食上よりみて、大きな分岐点であろうということは、多くの研究に示されている。

これらの研究を参考にして、許容ひびわれ幅は、少なくとも「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁹⁾により海水に直接接する部分、海水で洗われる部分および激しい潮風を受ける部分で 0.15 mm、上記以外の部分で 0.2 mm 以下となるようにしなければならない。

(3) ひびわれを検討する対象となる荷重

コンクリート部材のひびわれの制限に関しては、前述のように、ひびわれ幅の制限値については種々の議論がなされているが、ひびわれ幅の検討の対象となる荷重について議論はあまりなされていない。この荷重としては通常の使用状態における最大の荷重をとればよいが、自動車荷重のような人為荷重では、通常作用する荷重はほぼ特定できるから、ひびわれ幅の検討の対象とする荷重についてもその決定は比較的容易であろう。したがって土木学会のプレストレストコンクリート標準示方書における「通常の使用状態」、CEB-FIPの Model Code⁴⁾における「frequently」な荷重といった表現でもよいのかもしれない。しかし波のような自然現象である環境荷重に対しては、どのような状態をもって通常の状態とし、それに対して検討しておけばよいかを決めることは容易ではない。ここでは波に関してどのような荷重を対象にすればよいか検討する。

どのような状態の荷重についてひびわれ幅を検討するかということは、ひびわれ幅の制限値を定めることと同等に重要であると考えられる。この場合の荷重の状態としては、その荷重以上の荷重の継続時間（ひびわれ幅の継続時間に対応する）あるいは、どの程度の頻度の荷重

(あるひびわれ幅となる頻度に対応する)を対象にするかということが考えられる。腐食との関連においては、ひびわれ幅の継続時間で議論すべきであろうが、前述のように、コンクリート表面のひびわれ幅と内部の鋼材の腐食量との関係も明確でない現段階では、どの程度の頻度の荷重を対象とするのかということを考えることにする。

前節において一応ひびわれ幅の制限値を提案したが、厳密にはひびわれ幅の制限も荷重の頻度に対応して定められるべきである。作用頻度の多い荷重を対象とするなら、ひびわれ幅の制限を厳しく、作用頻度の少ない荷重に対しては緩くしてもよいと考えられる。しかしそれらの関係は求められていない。

ところで FIP のコンクリート海洋構造物の設計・施工に関する指針⁹⁾によれば、通常の状態として再現期間 1 か月の荷重をとり、それに対してひびわれ幅を 0.2 mm 以下にするとしている。

ひびわれ幅の制限値が前述の提案値にほぼ同じであることから、この FIP の指針を基に検討してみる。

再現期間 1 か月の波の最大波 (H_{max}) 以上の波が耐用期間中に何波ぐらいくるか、そのオーダーを検討してみる。

高橋ほか⁷⁾が拠点観測 10 か年の記録より求めた波高の出現率より波高と波数(年間)の関係を求め、一方同じく高橋ほかの示した高波の発生確率から 1 か月確率波高 (H_{max}) を求め、年間にそれを超す波数を求めると、数港を対象とした試算では 1 000~10 000 波であった。今、仮に耐用期間を 50 年とすると、その間では 50 000~500 000 波となる。何波以内でなければならないという限界を示すことはできないのであるが、500 000 波という波数は繰返し回数としては大きい値という感じもする。また港湾により波数に大きな差が生じすぎる。

次に再現期間 6 か月の波に対して同様の試算を行うと 6 か月確率波高 (H_{max}) を超す波数は年間 10~500 波であり、耐用期間を 50 年にとると 500~25 000 波となる。これは非常に大ざっぱには、通常の耐用期間に対しては 10 000 前後のオーダーとみなしてよいであろう。

FIP の指針のとおり再現期間 1 か月の波を対象としてもよいのかもしれないが、腐食の問題の重要性を考慮し確たる根拠には欠けるが、現時点での一応の目安としては、耐用期間中に 10 000 回程度作用する波(波群で

はない)をとればよいのではないかと考える。なおこの場合のひびわれ幅の制限値は前節の提案値とする。

年間の波高、出現率が求まっていない場合は、通常の耐用期間に対しては 6 か月~1 年確率波高としてもよいであろう。ただし、使用限界状態においても砕波を考えなければならない場合は、荷重係数を大きくとるなどの考慮が必要である。

6. 疲労限界状態の検討

疲労限界状態に対する検討は、材料の疲労特性および荷重作用が材料に与える応力履歴を基本とし、材料(鉄筋、PC 鋼材およびコンクリート)の応力履歴による累計回数比が $1/r_{fs}$ (r_{fs} は疲労に対する安全係数)以下であることを確かめることによって行うこととしている。

7. おわりに

以上、PC 港湾構造物への限界状態設計法の適用に関して概略を述べた。港湾において PC を本格的に使用しだしてから、日も浅く、設計法も熟度の低いものであり実績を重ねて徐々に熟度が高くなるものと期待される。本稿は現時点(1985 年 4 月)での基本的なコンセンサスを示したものである。今後、読者諸賢の御意見、御批判等も加味し、更に検討されるべきものである。

参 考 文 献

- 1) プレストレストコンクリート港湾構造物設計指針草案、運輸省港湾局、1983
- 2) プレストレストコンクリート標準示方書、土木学会、1978
- 3) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、土木学会、1983
- 4) Model Code for the Design and Construction of Concrete Structures, CEB-FIP, 1978
- 5) Recommendations for the Design and Construction of Concrete Sea Structures, FIP, 1977 and 1983
- 6) 岡村 甫: コンクリート構造の限界状態設計法、共立出版 1978
- 7) 高橋智晴ほか: 波浪に関する拠点観測 10 ケ年統計(昭和 45~54 年)、港湾技研資料 No. 401, 1981
- 8) Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures, DNV, 1977
- 9) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会(運輸省港湾局監修)、1979
- 10) Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures, ACI, 1978
- 11) A. W. Beeby: Concrete in the Oceans, Cracking and Corrosion, Cement and Concrete Association, 1978