

## 防波堤の粘り強さに関する一考察

山下 徹\*

\* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波は、東日本の太平洋側沿岸に大きな被害をもたらした。特に防波堤が全半壊した背後地では、津波の流入量が格段に多くなることによって、浸水高さが高くなり、津波による被害が顕著となった。このため、これらの施設は津波に対する「減災効果」が大きく低下しない程度の損傷にとどまる「粘り強さ」が求められている。ここでは、“粘り強さ”について、この1年の業務を通して筆者が見聞きした情報を踏まえ、考え方の整理を行った。

キーワード：粘り強さ、防波堤、津波

### 1. はじめに

当センターに在職中に3.11地震に遭遇した。それ以降、地震津波対策の関連業務に関わることとなり、その過程の中で港湾にかかわる多くの関係者の意見、考え、思い等を聞く機会を得た。その中でも特に防波堤の“粘り強さ”に関しては何度も議論になることが多く、より高い関心と港湾を守るために何とかしたいという思いが伝わってくるようであった。

ここでは、“粘り強さ”について、この1年の業務を通して筆者が見聞きした情報を踏まえ、私見を述べる。

### 2. 防波堤の粘り強さに関する技術者の考え

“粘り強さ”に関する技術者の意見、考えについて情報収集した内容を以下に示す。なお記載内容は、紙面の関係で頂いたご意見、文献、提言等を要約、または前後の説明箇所を割愛しているものもあり、原文とは異なるニュアンスになっている可能性もあるが、その際は、ご容赦頂きたい。

#### <粘り強い構造とは>

- ① 港湾における総合的な津波対策のあり方 中間取りまとめ (交通政策審議会港湾分科会防災部会, 2011. 7. 6) : 繰り返し来襲する津波に対して、仮に第一波で被害を受けたとしても倒壊せず、第二波目以降にも最低限の耐力を保持する。また、最大クラスの津波に対して、損傷しても倒壊しにくい構造。<sup>1)</sup>
- ② (独) 港湾空港技術研究所 下迫領域長 (日本埋立浚渫協会 HP を編集) : 今回の津波被害を踏まえ、越流による防波堤背後の洗掘対策をまず考える必要がある。防波堤の後ろ側を守るにはいくつかの方法があるが、簡単なのは後ろ側に石などを積み、高くすることである (図-1)。洗掘をまず防止し、仮にケーソンが動き出してもストッパーの役割を持たせる。コストも考えると現実的な対応と言える。

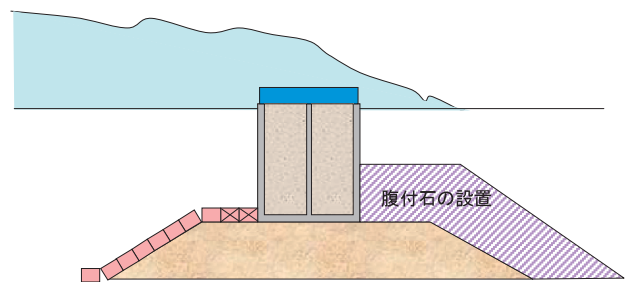


図-1 粘り強い構造の例 (その1)

- ③ (独) 港湾空港技術研究所 高橋理事長 (2012. 3) : 粘り強さの一つとしてダクティリティ (靱性・延性) の利用を考えなければならない。すなわち、大きく変位しても津波の低減効果がある程度保たれていなければならないと考える。たとえば、限界状態設計法で言われている安全性能を確保する限界の変形量まで許容することによって、安定と評価できる津波の高さを大きくできる。特に、変形量が大きくなることによって抵抗力が増大する効果が高い構造、すなわち、ダクティリティの高い構造であれば、その経済的な効果は高くなる。また、破壊モードを考えた粘り強さとしては以下があげられる。

- ・被害が法線方向に広がらないようにする粘り強さ (洗掘に対する上部工の形状の工夫)
- ・どこか弱いところをつくりそこが破壊することによって全体を守る粘り強さ

- ④ (独) 港湾空港技術研究所 野津氏 (2012. 3) : 被災程度  $y$  が外力  $x$  の関数  $y=f(x)$  であると仮定し、 $df(x)/dx$

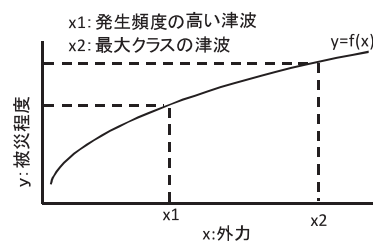


図-2 被災程度  $y$  と外力  $x$  の理想的な関係図

が発散したり、著しく大きい値にならない構造物を粘り強い構造物と定義してはどうか。

- ⑤米国の技術者：ハリケーンカトリーナによる災害を教訓として言えることは、早期の復旧復興ができること（≒Resilient）、すなわち減災のレベルに留める事が、粘り強さにつながる。
- ⑥早稲田大学 清宮教授（2012.3）：トラス橋梁で2, 3部材が破壊しても全体系はまだ保持している状況がある。すなわち、リダンタンシー（冗長性）が大きいほど望ましい。また、粘り強さだけでなく復旧性も重要。今回の地震により新幹線の高架橋が破壊しても目の届く橋脚部下端に被害を集中させたことにより、復旧が早期に行えた。
- ⑦（財）沿岸技術研究センター 山本理事（2011.10）：変形の増加率よりも抵抗力の増加率が大きい機構や構造体の不静定次数を増やすことが粘り強さを増大させることにつながる。
- ⑧（財）沿岸技術研究センター 高山参与（2011.6）：付加的なことをすることによって単に抵抗力が増すのは粘り強い構造ではない。粘り強さは次のように定義されるだろう。1. 構造物が破壊しにくくなることを前提にして、変形が進むほど抵抗力が増大する構造（ケーソンの背後に裏込石を置くことによって単に初期抵抗力が増大するのは粘り強くなったとは言わない。このようにすることによって構造物の変形が大きくなるにしたがって抵抗力が増す場合には粘り強い構造となる）。2. 他の目的で設置したものが波力低減効果がある場合（反射波低減のために設置した消波ブロックで被覆した防波堤は粘り強い構造だと考える。消波工被覆堤では、重複波のような場合には波力低減効果は小さいが、波高が大きくなって碎波するようになると波力低減効果が強くなる。つまり、波高が大きくなるほど粘り強くなる）。
- ⑨プロフェッショナルエンジニアコンサルティング 代表 土屋秀雄氏（2011.12）：設計者はすべての起こりうる事象を想定し、その事象が起こった場合のリスクを予見する義務を負う。

上記を要約すると「大変形」「冗長性」「じん性（延性）」「復旧性」「減災」といった性能を具現化したものが“粘り強い構造”ではないか、と主張されているのではないかとと思われる。また、各主張は決して破壊しないものを築造するというのではなく、経済性や施工性を考慮して投資効果が高いものを築造していく必要があることも併せて強調されているように思われる。

### 3. 一般的な概念を参考にした粘り強さ

#### 3.1 2系統の安全システムによる粘り強さ

社会システムや装置、製品、構造物等の安全性を高め

る方法としてフェールセーフといった考えが述べられることが多い。フェールセーフは、装置・システムにおいて、誤操作・誤動作による障害が発生した場合、常に安全側に制御するような設計手法であり、信頼性設計のひとつである。構造物に着目した例ではないが、兵庫県のポートアイランドと陸地をつなぐルートとして、橋梁（神戸大橋）と沈埋函（港島トンネル）の2つの異なる構造のアクセスルートが確保されている事例がある。橋梁の後に造られた港島トンネルは、混雑緩和、アクセスの改善が主たる目的であるが、2つのルートが一つのイベント（台風、地震等）によって同時に破壊する可能性が低いため、埋立地内の社会システム、インフラが機能不全に陥ることを防止する、といったことも期待されているようである。粘り強さを考える上では、このようなフェールセーフのしくみを導入することも一つの解決策であるようにも思われる。たとえば防波堤において滑動、転倒といった支持機構が破壊された場合でも、全く別系統の支持システムが構造体の流失を防止するといった方法などが考えられる（2系統の異なる防護システム）。コスト面を考えると実現性は低いかもしれないが、防波堤の港外側にコンクリート製のアンカーを埋め込み、そのアンカーとケーソンを係留索で結合することにより、ケーソンの流失を防止するといった方法も考えられる。

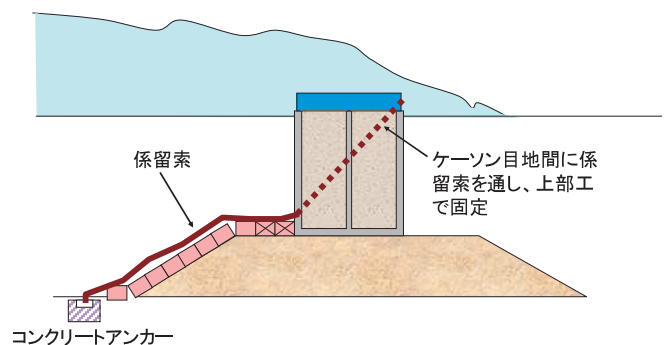


図-3 粘り強い構造の例（その2）

または、港外側の消波ブロックの幾つかを鋼製の索でケーソンと結合したような対策も効果が期待できるのではないかとと思われる。ただし、係留索は長期的な耐久性に懸念があるために、腐食や磨耗の進行が少ない工夫が必要である。

安全性の捉え方をもう少し広げた例としては、たとえば中央防災会議（東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波大作に関する専門調査会）ですでに提唱されている“防波堤の防護効果（ハード対策）にかかわらず地震発生直後から積極的に避難する（ソフト対策）”といった防災計画は異なる2系統の安全対策の考えによるものだと思う。

#### 3.2 想定外力を把握することによる粘り強さ

信頼性設計は、過去に起こった事象を母集団にして、確率論を根拠として安全性を体系化したものである。こ

の統計処理のベース（母集団）が限りなく大きければ特に問題はないが、人類の記録の歴史はまだ浅く、何か大きな現象・事象が起こるたびに設計基準が安全側にシフトし、構造物がそのたびに頑強になるというサイクルが繰り返されてきたような経緯もある。だからといって、無限に更新されるといったことではなく、どこかに上限のラインがあるのではないかと考えられる。たとえば、オリンピックでは毎回世界新記録が更新され、永遠にこの繰り返しが起こるようにも見えるが、スポーツ科学、医学的には100m走は9.3~9.6secが限界という説もある。ひるがえせば構造物に作用する外力も同様であり、津波の外力もどこかに極値があり、その数値に過去の被災事例が漸近していつているのではないかと考えることができる。

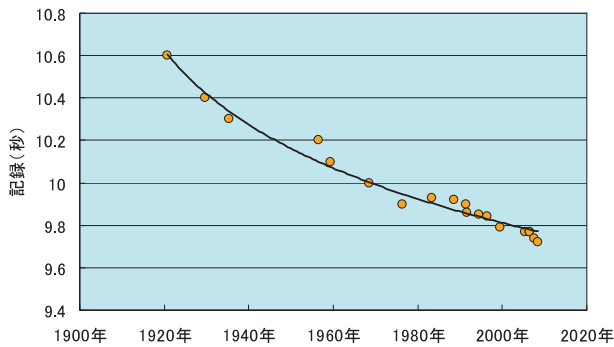


図-4 男子100m走の世界記録の変遷

「見ていない現象は信じにくい。経験したことのない事象に対しては洞察力が働きにくい。」過去の経験や記録が設計のよりどころとなっていることは、否めない事実であるが、統計的に将来起こりえる事象も含めて外力の極値を推計できれば、その極値は少なくとも起こる可能性があるときみなすことができ、設計で考慮することに意味が出てくるのではないかと考えられる。

#### 4. 粘り強さを具現化していると思われる事例

以下に粘り強さを具現化したのではないと思われる事例を示す。

##### 4.1 落橋防止装置

既設構造物を供用・稼働させながら付加的に設置した対策事例としては阪神大震災を契機として設置されることとなった落橋防止装置がある。



写真-1 阪神大震災による落橋被害 (国総研 HP)

落橋すると多大な被害が生じるだけでなく、復旧にも時間がかかるといった側面では、防波堤と境遇が類似している。また前述した2系統の異なる防護システムとしても捉えることができる。この落橋防止装置は道路橋示方書のなかで設置することが明確に示されることとなった。



写真-2 落橋防止構造 (東北地方整備局 HP)

##### 4.2 自動車のスリップ制御

自動車は通常走行時にはスリップ（滑動）しないことを前提に製造された製品であるが、運転手の想定を超える事象が起きた場合には、急制動等により、スリップが生じることがある。スリップが起こり、タイヤがロックされると、タイヤの摩擦係数は下がってしまうが、停止までの制動距離や車体の操作性が損なわれないように、最近ではABS装置 (Anti-lock Brake System) により、スリップによる被害を最小限に抑えるしくみ（減災）となっている。グラフにあるようにABS装置は摩擦係数が最大となるスリップ率 20%程度を目標にタイヤの回転を制御している。

スリップ率 (S) は、車体速度 (Vv) と車輪速度 (Vw) の差を車体速度で除したもの (S= (Vv-Vw) /Vv) を指す。

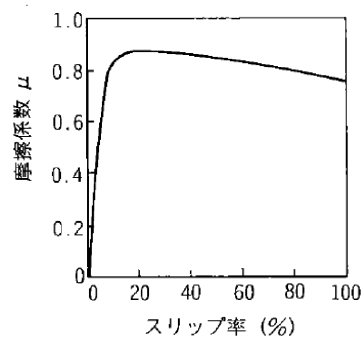


図-5 スリップ率と摩擦係数の関係

素材がゴム製のタイヤは、作用する重量に比例して摩擦係数が増大するといった、通常の法則（摩擦力F=摩擦係数μ×垂直荷重N）とは異なる挙動を示すため、その延長線上での見方は適切ではないかもしれないが、スリップしてもその被害を最小限に抑えるといった発想は、減災の考え方に通じるものがあるのではないかと考えられる。

##### 5. 私の考える粘り強さ

ここまでの事例や技術者の考えを踏まえると、たとえ



ば、以下の要素を考慮することが粘り強い構造として効果が高いのではないかと考えられる。すでに主張されている技術者の言葉を借りている部分も多く含まれているが、ご容赦いただきたい。

- ①既設構造物に付加的に設置が可能でかつ安全性が増大する対策工を設置する。
- ②異なる2系統の支持系統の確保により、最悪の事態を回避する。
- ③想定される最大の外力を把握することにより、構造物の安全性、信頼性を向上させる。
- ④破壊が進行する過程でその随所に破壊に抵抗するシステムを備える。

上記について、これらの要素を最適化して、より安価な投資により粘り強さが向上できる構造物を構築することが理想であるが、具現化にあたっては、それぞれの要素ごとに解決すべき課題があるものと思われる。

①については、既にケーソン背面への腹付石を設置する構造が提唱されており、施工性・経済性を考えると実施される可能性が高い工法である。しかし、変形量と抵抗力の関係について定量化する計算方法がまだ確立されていないことに加え、越流時の津波の条件やマウンドの高さ・形状等によっては腹付石が洗掘を受けることが予想されており、最近の実験結果等も含めた検討・整理が必要と思われる。一方、すでに一部の港湾において整備が進められている図-6のような長周期波対策工があるが、このような形状であれば①の効果も期待できるのではないと思われる。

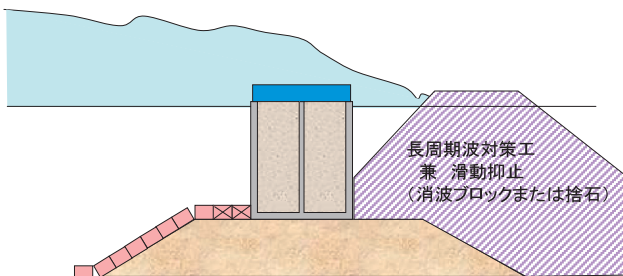


図-6 粘り強い構造の例 (その3)

②については、前述したように一つの安全機構（ケーソンであれば、自重による滑動・転倒・支持力による抵抗力）が破壊されてももう一つの系統で支持できる仕組みが有効と考える。しかしながら、築造コストが課題であり、経済性・施工性を踏まえた提案が必要である。

③については過去の外力を統計処理する方法を前述したが、十分な母集団が無い場合は、たとえば、数値波動水路 (CADMAS-SURF/2D) などの数値計算を用いて構造物に作用する津波力の最大値を想定する方法がある。防波堤を越流するような津波が作用する場合、津波高が大きくなると港内外の水位差 (津波力) も増大するが、砕波限界などの理由から、無限に水位差が生じるわけではない。そのためこの限界点 (変曲点) を数値計算で算出できれば、粘り強さを考える上でひとつの指標になるもの

と思われる。

④については、たとえば、マウンド内のケーソンからの端し圧が大きくなる部位に水中コンクリートなどを充填し、マウンドの破壊モードを変えてしまうといった方法が考えられる。ただし、どのような壊れ方をするか、他に別の問題が生じないか等について検証が必要である (前 (独) 港湾空港技術研究所 菊池特別研究官からアイデアを提供)。

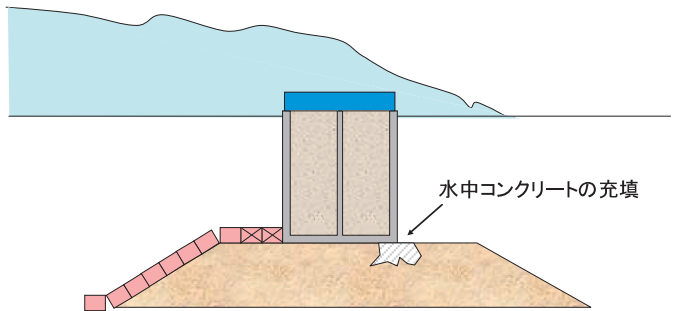


図-7 粘り強い構造の例 (その4)

## 6. あとがき

「はじめからベストを求めな。

ベターの積み重ねがベストになる。」

3.11 震災の対応で 2011 年 3 月末に阪神震災の時の対応方法を調べていたときに当時の責任者の言葉が震災時の標語として記録されていた。はじめは完璧な構造物でなくても問題意識を絶やすことなく、より安定性を高め、徐々に構造物を復旧・復興していけば、より堅固な港湾構造物が出来ていく、ということを言われているのではないかと感じている。先人の知恵や経験、そして新たな知見を取り入れ、安全で安心できる港湾整備が進められることを期待したい。

## 7. 謝辞

本稿をまとめるにあたっては、国土交通省港湾局及び東北地方整備局から様々な情報を頂くとともに、(独) 港湾空港技術研究所、国土技術政策総合研究所、筆者が担当業務に関わることとなった委員会等の委員の皆様から貴重なご意見を頂いた。また、(一財) 沿岸技術研究センター高山知司参与、山本修司理事、八尋明彦審議役の方からも多くの助言を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 交通政策審議会港湾分科会防災部会：港湾における総合的な津波対策のあり方 中間取りまとめ，2011.7.6.