

気候変動に適応する 土木構造物

地球温暖化に伴う気候変動により、私たちの予想を超えた自然災害の発生が目立っている。津波や台風、洪水などの水関連災害はその代表的なものであり、その規模は次第に強大化するように感じられる。これらの脅威から私たちを守る土木構造物には、高い安全性と信頼性維持が強く求められる。これまで多くの土木構造物を支えてきた鉄鋼材料は、今後も長期間にわたり高い性能を発揮することがますます重要になっている。

大きな脅威となる水関連災害

2005年8月、アメリカ南東部のメキシコ湾でハリケーンが発生した。「カトリナ」と名付けられたこのハリケーンは、8月25日にフロリダ半島に上陸してから海に抜けるも、29日にはニューオーリンズ付近に再上陸し、翌日にはニューオーリンズ付近の約8割が水没したと報道され、世界中を驚かせた。

地球温暖化が私たち人間社会にもたらす災害のなかでも、被害の大きいのが水関連災害である。ある調査によると、過去100年間で被害の大きい自然災害の内訳は、洪水、暴風、干ばつな

どの水関連災害で全体の約90%を占めるという。また世界の中ではアジア、次いでアフリカやアメリカで、水関連災害が多く発生している。水関連災害は毎年ほぼ同じ時期に発生し、地震などの災害に比べ件数が多いのは仕方がないが、最近では、件数が増加するだけでなく、被害規模が大きい、いわゆる激甚災害が増える傾向にあり、私たち人間社会にとっては大きな脅威である。

2007年2月に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第1作業部会の第4次評価報告書が発表された。IPCCは地球温暖化問題についての対応策を科学的に裏付ける組織であり、その報告書は世界各国から注目される存在となっている。今回の報告書では、地球の気候システムに温暖化が起こっていることを断定するとともに、「人間が原因となる温室効果ガスの増加が温暖化の原因である」とほぼ断定している。また地球の平均気温は過去100年に0.74℃上昇し、最近の50年に限ってみれば過去100年の2倍の速さで温暖化が進行しているという。

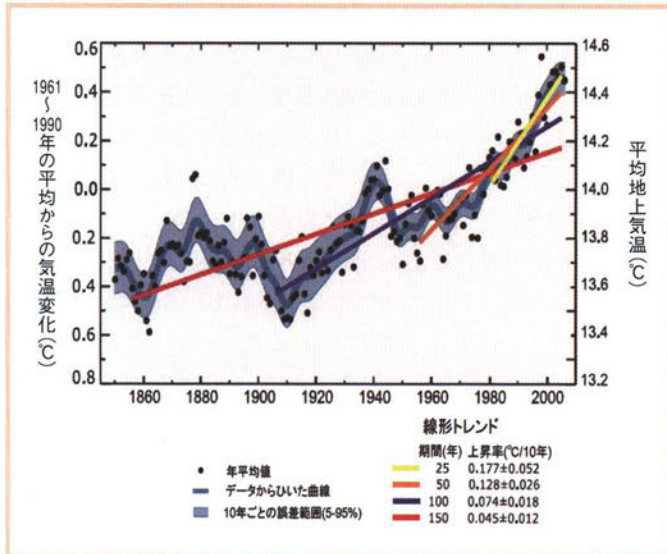
また、干ばつ、大雨、熱波、熱帯低気圧 (ハリケーンや台風など) などの極端な気象現象については、北大西洋で1970年頃から、海水温度の上昇に伴って強い熱帯低気圧が増加していることが原因である可能性が高いと報告されている。その他の海域でも同様な傾向が見られるといい、このような熱帯低気圧の増加傾向は、人間の活動が影響を及ぼしている可能性があるまとめられている。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC)

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、人間活動による気候変化、影響、適応および緩和方策に関し、科学的、技術的、社会経済学的な見地から包括的な評価を行うことを目的として、1988年に世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) により設立された。IPCCは3つの作業部会と1つのタスクフォースとで構成され、1990年からこれまで3回にわたって評価報告書をまとめ、報告してきた。日本国内でもIPCC国内連絡会を組織して活動支援を行うとともに、多くの研究者が論文を報告書に引用されたり、原稿執筆に参加している。最近では、国際的な地球温暖化問題への対応策を科学的に裏付ける組織として、次第に大きな影響力を持つようになり、2007年にはノーベル平和賞を受賞した。

■世界の平均地上気温

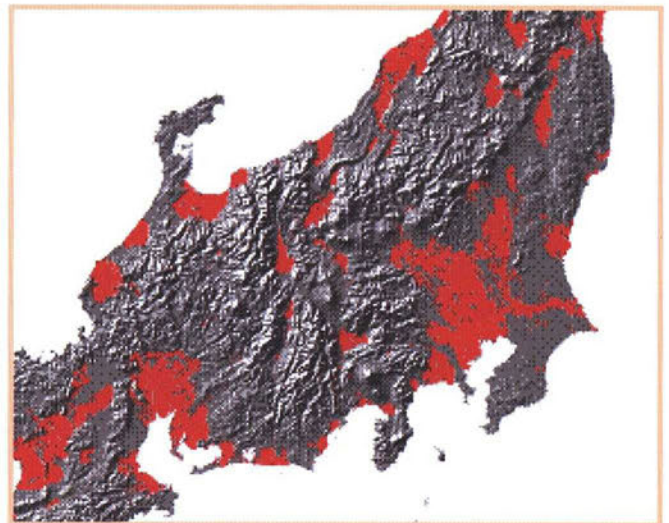
IPCC第4次報告書によれば、過去100年間で世界平均気温が0.74℃上昇した(2001年には0.6℃上昇と報告されていた)。また最近50年間の気温上昇傾向は、過去100年間のほぼ2倍に相当することがわかる。



(IPCC第4次評価報告書統合報告書SPMを元に作成)

■河川の氾濫リスクエリア抽出の例

国内主要河川で作成されている浸水想定区域図や海外主要河川の氾濫実績情報をベースに、地形指標と氾濫幅との関係をあらかじめ求めておき、数値地形情報のみから、世界中どこでも氾濫リスクエリアを抽出できるようにする試みの例。さらに的確な洪水リスクマップの作成方法の研究が進められている。



(資料提供: (独) 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター)

観測データに基づく科学的なリスク予測の重要性

地球温暖化に伴って強い熱帯低気圧が増える傾向にある、ということは想像がつくが、熱帯低気圧の規模がどのくらい強くなるか、どのくらいの頻度で発生するか、など細かい点についてはまだまだ解明されていないことが多いのが現状である。そこで水関連災害に対し、温暖化についての正しい科学的知見をもとに、各地域における温暖化の影響や脆弱性を予測し、的確に対応していこうという取り組みが本格化している。

2006年にUNESCOなど国連機関と協力し、(独) 土木研究所内に水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)が設立された。ICHARMでは、世界の水関連災害の防止・軽減のため、的確な戦略を提供し、その実践を支援する拠点となることを目指している。現在、気候変動が洪水リスクへ与える影響の評価(文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」)の研究をはじめ、地球規模での気候変動とリスク評価研究を進めている。

ICHARMでは現在、気象研究所と共同で、20kmメッシュのAGCM(大気循環モデル)のシミュレーション結果を用いて、地球全体および特定脆弱地域を対象とし、気候変動が洪水リスクへ与える影響を評価する研究に取り組んでいる。それによって得たデータを元に、現在から近未来にかけての水災害の変化を定量的に評価することになっている。

気候変動を前提とした新たな考え方を導入

IPCC第4次評価報告書の中では、「温暖化の「緩和策」には限界があり、緩和策を行ったとしても気温の上昇は数世紀にわたって続くことから、温暖化に伴うさまざまな影響への「適応策」を講じていくことが重要である」とされている。ここでいう温暖化の「緩和策」とは、温室効果ガスの排出削減に取り組むことなどを指し、一方「適応策」とは、例えば海面水位の上昇を見込んだ計画的な堤防の嵩上げを行う、などの対策のことを指す。

しかし実際のところ、日本では気候変動が水関連災害に与える影響について、科学的な解明が徐々に進んでいるという段階であり、具体的な適応策についての検討は十分とはいえない。

現在日本では治水施設の整備の当面の目標として、「大河川は30～40年に一度の降雨に対応できる程度」「中小河川は5～10年に一度の降雨に対応できる程度」と設定されている。しかしこの目標に対しての整備状況は、現在まで約6割程度でしかなく、今後温暖化に伴い、洪水や土砂災害、高潮災害などによる壊滅的な被害が起きる可能性は増加している。

今後の日本の降水量は、現在より1.0～1.2倍程度、最大で1.5倍になると考えられている。仮に100年後に降水量が1.2倍になるとすれば、現在の河川の整備のペースでは追いつかず、これまでと同様の対策だけでは実際に被害が起きる河川が出てくることになる。

国土交通省では、気候変動に適応した治水対策検討小委員会を設置し、平成19年11月に水関連災害における気候変動への適応策についての中間とりまとめを発表した。その中で、これまでと同じ対策だけではすべてを守ることは難しく、今後次のような考え方が必要であると述べられている。

- 被害の最小化を図り、犠牲者ゼロを目指す。
- 首都圏など中枢機能の集積地では、機能マヒの回避を目指す。

このように基本的な考え方の転換とともに、講じるべき対策も変化してくる。つまり「どんな雨や風でもびくともしない頑丈な設備を作る」というのではなく、「被害がゼロでなくとも、少なくとも犠牲者は出ない、都市機能が壊滅状態にならない」ことを目指すのである。そこで、現在考えられている対応策のメニューとして、日本古来の二線堤（内外二重になっている堤）や輪中堤などの整備などが挙げられている。また、あらかじめ川が氾濫する可能性を考慮しておき、氾濫しても被害の少ないようにコンパクトな街づくりを行う「コンパクトシティ」などの提案も検討されている。

海面上昇と増大する波高・高潮の影響

気候変動が原因となり、私たちの周囲の海洋や沿岸、河川、ダムなどで、いろいろな水関連災害が発生する。この中から、港湾や沿岸域に影響を及ぼす気候変動を見てみよう。

波浪、高潮などの現象の解明や防災について研究している（独）港湾空港技術研究所では、全国港湾海洋波浪情報網にある全

国60地点の波浪情報について処理、解析を行なっている。同所海象情報研究チームリーダーの河合弘泰氏によれば、最近の顕著な変動の例として「高波出現頻度の高まり」と「港内静穏度の低下」が見られるという。

このうち高波出現頻度の高まりは、日本全国のすべての観測地点で頻度が上がっているわけではないが、太平洋側の一部では高波が多発化する傾向が見られている。高波発生頻度を高める原因としては、台風や低気圧の規模の強大化やコースの変化が挙げられる。これにより港湾の構造物には超過外力（設計時の想定を超えた外力）がかかる場合も出てくる。

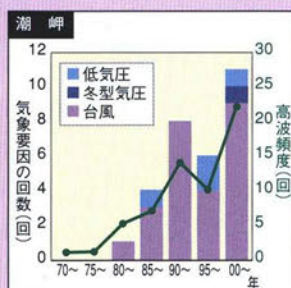
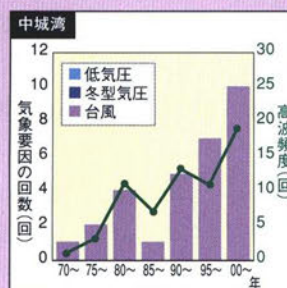
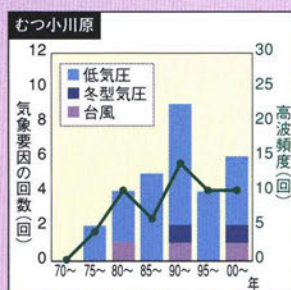
また、地球温暖化により、平均海面が上昇すれば浸水被害も増加する。港湾の内部にすでに設置されている岸壁の高さは、荷役（船舶からの荷物の揚げ降ろし）のしやすさで決めているので、すでに海面すれすれのところでは、大潮や満潮などの条件が加わると浸水が起これ、港湾施設が破壊されやすくなる。

最近の高波出現への対策として、港湾施設の的確な維持・補修技術の確立、実施が重要であることは当然だが、一方であらかじめ温暖化を見越した設計基準を導入することの必要性が高まっている。

じつは現在の日本の高潮災害に関する設計の基準は、1959年の伊勢湾台風を契機としたものが多い。伊勢湾台風は、これまで日本で最も被害が大きかった高潮であり、このときの被害をワーストケースと考え、これを基本にこれまでハード面の整備が行われてきた。つまり、①朔望平均満潮位（大潮の満潮時の潮位のこと）にワーストケース（伊勢湾台風級の高潮偏差または既往最

■高波の出現頻度の経年変化例

日本各地の沿岸部において、1970年代以降の高波の出現について観測したデータをもとに、出現頻度、気象要因ごと（低気圧、冬型気圧、台風）の回数をまとめたところ、特に太平洋沿岸の数か所で高波の多発化傾向が見られる地点が明らかになっている。

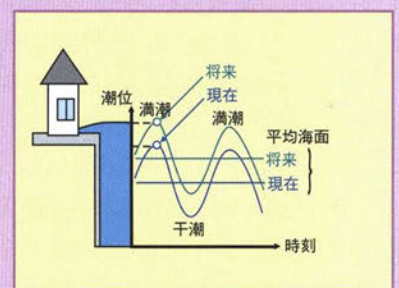


（資料提供：（独）港湾空港技術研究所）

■平均海面上昇と台風強大化による浸水被害の増加

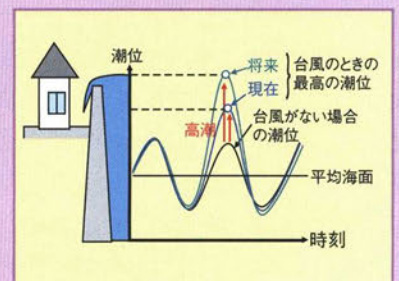
●平均海面上昇

海面すれすれの土地は、台風でなくても、大潮の満潮時に浸水する可能性がある。また小さな高潮でも浸水しやすい。



●台風強大化

台風時の激しい高潮と高波で堤防が壊れやすくなる。また陸地に浸水しやすくなる。



高潮位)を加えた高さ、②観測された既往最高潮位、のいずれかを計画高潮位とし、この潮位に高波が加わっても壊れないように堤防を建設してきた。

しかし、温暖化によって伊勢湾台風級の被害が発生する頻度は、以前よりも高まっていると考えられている。今後は、さまざまなパターンの台風についての高潮予測や、温暖化を予測した将来の気候における高潮予測など、科学的な予測を進めていくことが必要となると思われる。

長周期波による港内への影響

次に、港内静穏度の低下について見てみよう。港内は荷役作業や船舶の安全な航行のため、穏やかな波高を保てるように設計されており、具体的には「波高20～50cm以下の時間が年間の95～97.5%」が目標とされている。最近の傾向として、長周期の波浪が現れやすくなり、港内の波浪に影響を及ぼすことが多くなったといわれる。波浪の周期とは、ある地点の波が下がってから上がり、再び下がるまでの時間のことである。周期が長い長周期波は、見た目には波が小さくないように見えるが、じつはゆっくりと時間を掛けて海面全体が持ち上げるように上下している波である。

一例として、2006年の台風12号で波浪周期($T_{1/3}$)*は八戸港で17.0秒、常陸那珂で16.8秒を記録した。一般的な日本沿岸の波の周期8～10秒程度に比べ、たいへん長いことがわかる。

長周期波が来ると、波を受ける港湾施設は、長い時間波から力を受け続けることになる。また、長周期波が港内に入ると、いろいろな現象が起こる。たとえば、長周期波の周期と、船とロープで構成される振動系の固有周期とが近づくと、共振現象によって係留船舶を大きく揺らすことになり、貨物の積み下ろしが困難になったり、船舶を係留しているロープが切れたり、岸壁と船舶が接触・損傷する事故が起こったりするなど、予想しなかった事態が起こる。最近では、日本への貨物船の数の増加、積載量の増加、船舶の大型化などが進んでおり、長周期波による荷役稼働率の低下は避けなければならない状況にある。

長周期波による影響を避けるため、港湾施設の面では、防波堤や岸壁の配置などに工夫した計画の立案や、船舶を係留する施設の改良などが図られている。堤防においては、大きな外力でも耐えられるような頑丈な壁を作るという考え方だけでなく、外力を受け変形しても容易に修復できるように、碎石構造とするなどの方法が検討されている。

なお、港湾の施設の建設、改良、維持の際の技術的な基準として適用されている「港湾の施設の技術上の基準」が、2007年4月



長周期波の発生メカニズムや港内への侵入についての造波装置による実験(資料提供:(独)港湾空港技術研究所)



砂礫浜による波高の低減。砂礫を活用して衝撃を吸収することができ、崩れた場合も復旧がしやすいメリットがある。(資料提供:(独)港湾空港技術研究所)

に改訂された。この改訂のポイントは、これまでの仕様規定型の基準から性能規定型の基準に移行したことである。設計基準が性能規定化されることにより、保有すべき施設の性能が明確になり、それを満足させることにより低コストで高品質な施設・構造物の提案の可能性が広がり、鉄鋼材料の需要拡大が期待されている。なお新基準では、設計における潮位については「想定できる最大の潮位と長周期波による潮位をすべて合わせて考慮する」こととされている。いずれにせよ、海面上昇などの外力の今後の推移をできるだけ正確に把握し、必要な対策を講じることが重要である。

的確な維持管理が可能にする長寿命化

港湾や河川向けなどの土木建材は、水源の治水事業や堤防の耐震強化及び都市洪水対策などを目的として使用され、鉄鋼製品は多岐にわたり使用されてきた。代表的な製品である鋼管杭や鋼矢板は、構造物の基礎用支持杭として、また河川改修時の堤防根固め対策や、河川護岸及び堤防の耐震強化などに用いられており、さまざまな製品及び工法が開発されている。

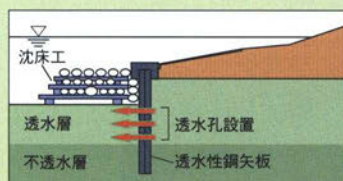
土木建材用の鉄鋼製品では、長期間の使用を想定しているた

* $T_{1/3}$: 1/3最大波周期のこと。波高計で得られた波形記録をもとに、波高の大きい方から1/3個を取り出し、平均した値。

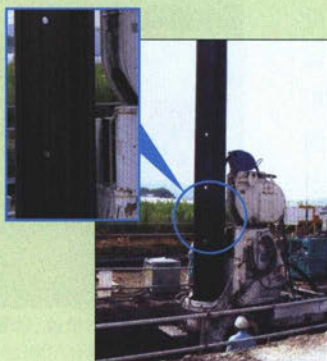
環境負荷低減に貢献する土木用鉄鋼製品の例

土木用鉄鋼製品は、長年にわたり港湾や河川などの施設に使用されており、その種類も多岐にわたっている。幅広く普及してきた理由には、鉄鋼製品の回収・リサイクルシステムが整備されていることや、環境負荷低減に貢献することが社会的に広く認識されていることなどが挙げられる。

環境負荷の低い製品の目安として、広く知られているものにエコマーク認定がある（（財）日本環境協会による）。土木製品のエコマーク認定は2005年から開始されているが、この中の商品タイプの1つに「土木用鋼材製品」も含まれている。すでにエコマーク認定を取得した土木用鉄鋼製品のうち、とくに水関連災害とかかわりの深い例として「透水性鋼矢板」を紹介する。もちろんこれ以外にも、環境負荷低減に貢献する土木用鉄鋼製品が数多くあり、さまざまな環境に適応して使用されていることは言うまでもない。



透水性鋼矢板は、あらかじめ透水孔を設けた鋼矢板である。耐震性や耐久性など、護岸に求められる構造的機能を損なうことなく、陸域や水域の地下水流動が可能な鋼矢板壁を形成することが可能となる。
（資料提供：鋼管杭協会）



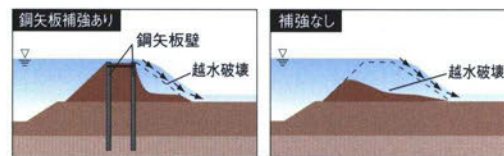
■透過型鋼製砂防堰堤

透過型鋼製砂防堰堤は、土石流の発生時に土石流を捕捉するために設置される堰堤のことである。透過性であるため、比較的細粒の砂礫を通過させる。平常時は、流水や砂礫を流下させて、河床が低下したり海浜が後退したりするのを防ぎ、同時に動植物の移動を妨げないようにする機能を持っている。（資料提供：日鐵住金建材（株））



■鋼矢板芯壁堤

鋼矢板芯壁堤は、堤防内に鋼矢板を打設して構造的に丈夫なコアのある構造とし、堤防を補強する工法である。洪水時の越水、浸透に対応するうえ、大地震時の基礎地盤の液状化等による被害を最小に抑える効果も期待できる。（資料提供：鋼管杭協会）



め、耐食性の確保が極めて重要である。

腐食環境の厳しい港湾構造物の防食法としては、電気防食と被覆防食が多く用いられている。このうち電気防食では、アルミニウム合金陽極を用いた流電陽極方式が用いられることが多い。また被覆防食の代表は塗装であるが、スプラッシュゾーンのように腐食速度が大きく腐食が集中して発生しやすい場所には、有機被覆などによる被覆防食工法など、適切な防食法が講じられている。

一方、腐食速度の緩やかな土中の鋼管杭等の場合は、耐用期間中の腐食量に見合った肉厚をあらかじめ腐食しろとして見込んでおき、耐食性を確保している。

しかしいずれの構造物でも、長い寿命が期待されるので的確な維持・補修を継続して行うことが極めて重要である。必要に応じて塗装の塗り替えなどを行うことにより、十分な耐食性を維持することができる。また日本では、構造物には十分な耐震性能を持つことも重要な要求性能である。

現在の日本の土木施設の多くは、高度経済成長期以降に整備されたものである。これらの施設の耐用年数を約50年と考えると、2010年頃から順次更新の時期を迎えることとなる。そこで、これらの施設の損傷・劣化などを正確に把握・評価するとともに、地球温暖化にともなう出てくる新たな要求性能に適切な対策を講じる

ことは、社会資本の整備という観点から重要となる。

土木施設とは、つねに丈夫で、壊れないものだと私たちは考えがちである。しかし実際は、耐食性や耐震性を長期間にわたり維持していくことに加え、今後の気候変動に伴うこれまでの想定を超える外力にも耐えるよう増強・補強などをしていく必要がある。社会が鋼構造物に寄せる信頼に応えるため、正確な状況の把握と適切な対策を継続的に講じていくことが求められている。

●取材協力 （独）土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター、
（独）港湾空港技術研究所

●文 杉山 香里