

特集

今後の技術基準改訂に
向けた方向性
～新たな行政ニーズと
技術基準～



港湾分野における性能設計の役割と次世代設計基準の方向性

宮田 正史
福永 勇介
菅原 法城

国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

国土技術政策総合研究所 港湾研究部 主任研究官

国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室 研究官

1. はじめに

本稿では、まず港湾分野における性能設計を主題として、その導入効果、基準類や新技術導入との関係性について考察する。次に、H30(2018)年の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾(設計基準とよぶ)の改訂作業を振り返り、これまでの改訂変遷におけるH30年改訂の位置づけを試みる。そのうえで、次期設計基準の改訂に向けた方向性を論じる。最後に、性能設計と設計基準に対するさらなる期待を述べたい。なお、本稿の内容は著者らの意見であり、著者らが所属する組織の見解を示すものではない。

2. 港湾分野における性能設計

「港湾の施設の技術上の基準」(技術基準)は、H19(2007)年に性能規定化され、それ以降発行された設計基準は性能規定型へと移行した。以下、性能設計の導入効果、および性能設計と基準類や新技術との関係性について考察する。なお、本稿では、性能設計を「実際に求められる性能を明示し、その性能の実現を中心に据えた設計やその体系」と捉えて、論を進める。

■性能設計の導入効果²⁾

性能設計を行うためには、設計者(施設の発注者や管理者等を含む広義の概念)が施設の目的、要求性能、性能規定や維持管理方針等を明確に設定することが鍵となる。しかしながら、性能規定化以前の設計実務ではそれらの事項が必ずしも明確に設定されていない場合もあった。性能設計の導入により、「施設の目的は何であり、その施設に対してどのような性能を求め、その性能を満たすための性能規定は具体的にどのような指標・許容値で規定し、どのような照査方法で確認すべきか。そしてどのように点検や維持管理を行い、地震等が発生した後にどのように復旧していくのか。」という、本質的に重要な内容

について十分に議論・整理してから設計を進めることの重要性が、あらためて強く認識されるようになったことが設計実務に及ぼした最大の効果であると考えている。

例えば、レベル2地震動に対応した耐震強化岸壁については、地震直後にどのような性能を求めるかを設定する必要があるとともに復旧に必要な施工計画・工程などの検討も必要となり、従前より綿密な検討が必要となる。また、従来、岸壁とコンテナクレーンは個別に耐震設計が行われていたが、性能設計の本来主旨に照らせば両者が一体となって初めて所要の耐震性能が確保されるため、現在では一体的な耐震解析が行われる。また、防波堤や防潮堤についても、設計条件を越える津波が作用した場合であっても、多重防護の考え方にに基づき背後地域の減災をどう達成するか、そして個々の施設については容易に倒壊に至らないように「粘り強い構造」とするために、水理模型実験や数値解析を利用して構造断面を決定するなど、まさに性能設計導入の狙いを具現化した設計が行われている事例も多い。

■新技術導入の難しさ

一方で、当初の目論みどおり、性能規定化により設計者が自由な選択肢を持ち、設計者の創意工夫を活かした、より低コストで高品質な施設整備につながっているかという点については、期待された効果は得られていないという声をよく聞く。しかし、これは性能設計の導入有無に関わらず、様々な要因が複合的に影響した結果であると考えられる。高度経済成長期の直轄事業では、発注者自らが民間企業や研究所等と連携して技術開発を行い、その成果をそのまま事業に活用することも多かった。様々な新構造形式の防波堤が全国の港湾で試行されたことに代表される。しかしながら、現在は、コンプライアンス上の問題(特定の新技术・工法の採用にあたっての公平性・透明性等の確保)、予算決定から事業着手までの時間が極めて短いこと、直轄職員の職務範囲が拡がり、かつ設計の高度化と相まって



設計技術に詳しい職員も減少していることなど、当時と比較すると新技術導入のハードルは高い状況にあると考えられる。特に、事業着手までの時間が短いと、新技術を導入するための技術的な検討時間がないため、あえてリスクのある新技術の導入は避けることになる。また、実務的には、単年度で実施する基本設計の中で新技術導入を決める必要があるが、外注実施して行う基本設計では、既存のマニュアルや施工実績のある汎用化された技術をベースに検討することになるため、やはり革新的な新技術の導入は難しいと考えられる。このように、性能設計を導入しても新技術の導入が進まないということではなく、上述したような様々な要因が複合的に影響した構造的な問題であるのではないかと考える。

■性能設計・設計基準・新技術導入の関係性

図1に、著者らが考える「性能設計・新技術・基準類との関係性」の概念図を示す。性能設計を「実際に求められる性能を明示し、その性能の実現を中心に据えた設計やその体系」と捉えれば、設計基準の有無に関わらず、その設計理念は上位に位置する概念であろう。また、新技術や既存技術をどのように選択し、組合せて利用するかも、理想とする実現したい性能を考慮して決定すべきものと捉えれば、やはり性能設計のコンセプトは新技術を包含する上位概念と位置づけるのが妥当であろう。

さらに、性能設計を高いレベルで実現するためには、事業の進め方や入札契約方式も関係するであろう。土木インフラの整備の場合には、大規模プロジェクト等で発注者側が性能設計の枠組みを大いに活用し、自らが意識的に先導して新技術や新設計法の導入を目指すことは重要であろう³⁾。また、設計・施工一括発注方式などにおいても、基本設計から技術提案を受けて施設を整備するという方法も一定の割合で行い、常に新技術や新設計法が導入されやすい環境づくりも必要であろう⁴⁾。

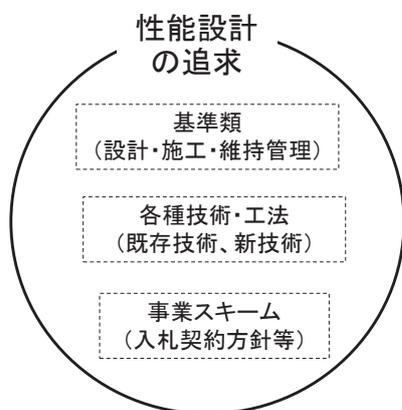


図1 性能設計・新技術・基準類との関係性

設計基準の整備は、公共インフラとして同程度の安全性レベルの施設を同じ手法で効率良く設計するには、非常に有効である。標準化により、設計手間を減らすことが出来るとともに、設計ミスも防止できる。しかしながら、設計基準は独り歩きすることが多いので気をつけなければならない。図に示すとおり、性能を探求した設計の中で、設計基準に記載されている設計法や標準的な構造形式が当該プロジェクトにとって適切であるのかを判断しなければならない。設計基準>性能設計、と主従が逆になることは避けなければならない。設計基準の細かい記載内容を全て遵守しなければならないとなると、それは思考停止状態であり、新しい展開は生まれにくい。常に「性能設計」に重心を置けば、このようなことには陥らない。性能設計の枠組みを最大限活用しながら、社会全体に性能設計のメリットを今まで以上に還元できるようにしていくことが今後の課題であろう。

3. H30設計基準の改訂骨子と位置づけ

図2に、H19年からH30年基準改訂までの主要な検討経緯や社会的ニーズの変遷を示す。改訂までの約10年間で様々な課題やニーズが発生していることが分かる。大きな視点で捉えると、H30基準改訂の骨子が見えてくる。

■防災・減災対策強化への対応

2011年東日本大震災を受け、津波に対する防災・減災対策の強化が重要テーマであった。このため、防波堤や防潮堤の耐津波設計に関わる基本理念や設計技術が拡充された。また、耐震強化施設で利用される鋼管部材の靱性(粘り強さ)を設計に反映する手法も盛り込まれた。また、東日本大震災時に復旧設計を行うための調査・試験の計画立案・実施に苦勞した経験を踏まえ⁵⁾、港湾施設の復旧のための調査手法を時系列的(初期調査、緊急復旧調査、本格復旧調査)に整理した結果も盛り込まれた。

■維持管理時代に相応しい設計基準

2012年の笹子トンネル崩落事故を受けて、既存施設の点検強化や維持管理を考慮した設計の徹底も重要なテーマであった。また、港湾では、ふ頭の統廃合による再編や係留施設の増深などの改良事業が急増していたが、これまでの設計基準には改良設計に関する記載がなく、その対応も急務であった⁶⁾。さらには、改良設計を実施する際には、当該施設に係る各種の履歴データ(設計図書、施工管理時の各種データや竣工図書など)が必要となるが、それらの情報が逸散しており、改良設計時に苦勞する事例も散見された。このため、調査・設計・施工・維持の連携強化や重要情報の保管・伝達の重要性もあらためて認

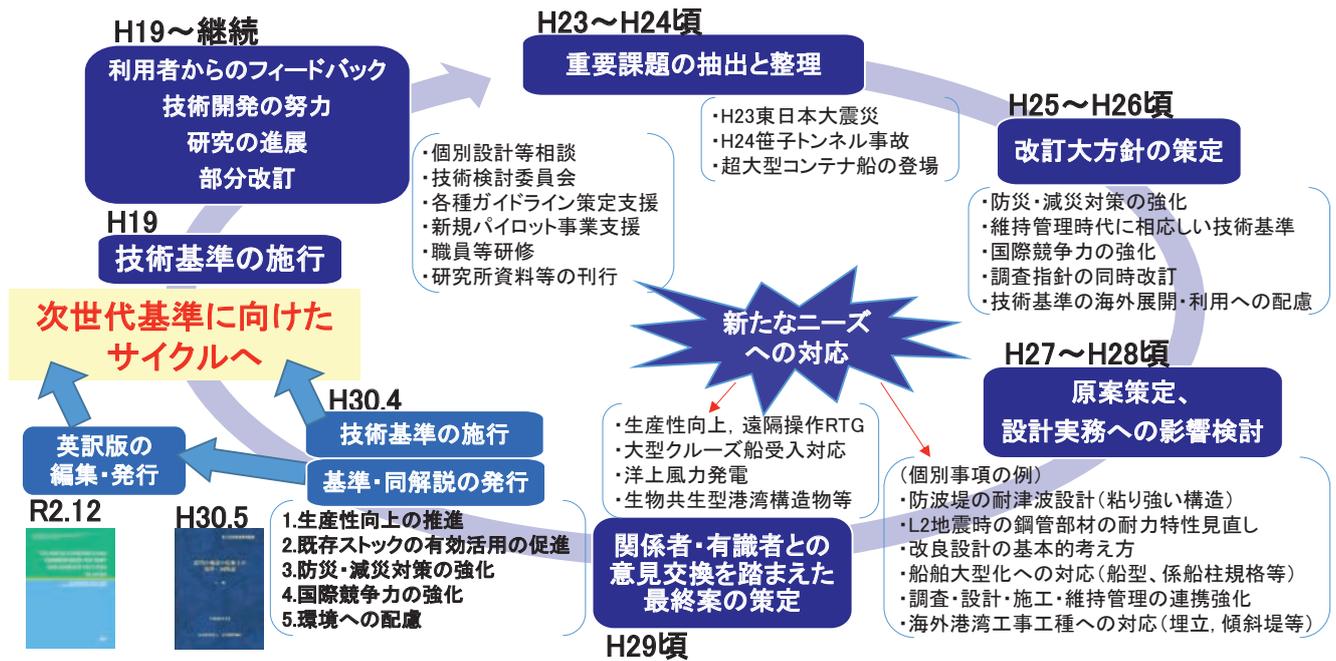


図2 H30設計基準改訂の検討経緯と社会的ニーズの変遷

識されていた⁷⁾。このため、H30基準改訂では「維持管理時代に相応しい設計基準」の変換点になるように、事業全体を通じた調査・設計・施工・維持の連携強化や後工程を考慮した業務の重要性（全体最適の視点）、改良設計の基本的な考え方などが新たに盛り込まれた。

■多様な基準ユーザーの利便性に配慮した設計基準

様々な基準利用者からのニーズへの対応も重要なテーマであり、H30基準で新たに盛り込まれた内容は多岐にわたる。国交省港湾関係の直轄職員からは、「港湾調査指針」（S46発行・S62改訂、港湾協会発行）への改訂要望があった。その背景は、設計前に実施する各種調査は極めて短期間で計画を立て実施しなければならないが、常時微動観測など調査方法も高度化し、多岐にわたるため、若手職員の勉強時間もなく技術伝承も難しいので、港湾施設に関する各種調査が俯瞰できる基礎的な技術資料を整備して欲しいというものであった。このため、参考技術資料として「観測・調査および試験」が追加された。国内の基準利用者（港湾管理者、コンサルタント、施工企業等）からは、H11基準に掲載されていたコンテナふ頭やマリーナなどの施設用途ごとに計画や設計上の留意点をまとめた解説を復活して欲しいとの要望が寄せられた。このため、H30基準では、H11基準に記載されていた内容を最新の情報に基づき更新するとともに、クルーズふ頭編をあらたに策定し、これらを

設計基準に盛り込んだ。また、海外プロジェクトでの利便性にも配慮し、傾斜堤と埋立造成に関する記載が拡充された。世界的に採用が多い防波堤構造は傾斜堤であり、新規港湾プロジェクトでは埋立造成が必須であることが多いため、これらに対応するためである。

■H30基準改訂の位置づけ

以上を踏まえると、H30基準改訂は、これまでの基準の枠組みを踏襲しつつも、大きな転換点として位置づけられるのではないかと考えられる。

- ・性能設計のさらなる深化に向けた新たな起点
- ・直轄基準から国内外の多様な基準ユーザーのための基準への転換点
- ・新規施設と既存施設を対象にした維持管理時代に相応しい基準への転換点
- ・計画・調査・設計・施工・維持管理の幅広い分野に対応できる基準への転換点

4. 次世代港湾設計基準の改訂方向性

本章では、今後の港湾設計基準の改訂に向けた大きな方向性について、著者らが考えていることを示す。なお、あえて高いハードルを課した目指すべき設計体系の方向性を提示しており、次期港湾基準での実現可能性の確認を経たものではないの



で、その点は留意して頂きたい。

■利用者ニーズ・生産性を考慮した設計体系

基準策定の良い点は、作業の効率化にある。ただし、注意を要するのは、基準を一旦定めると、その見直しは容易ではないことである。基準を策定した前提条件や適用範囲が現状にそぐわない場合や、基準が足かせとなり利便性や生産性が損なわれるような場合は、基準は速やかに変更する必要がある。例えば、既存岸壁の増深改良時に船舶との衝突防止のための岸壁築造限界の考え次第で、改良工法や改良工費が大きく変わる場合もある。このような場合に、利用船舶やその接岸・係留運用条件（接岸角度、自動係留装置の導入、波浪・風速等の運用条件）ごとに照査を行い、最適化を図っていくことは性能設計の観点からは推奨される。その際、設計基準では、衝突防止の考え方や安全性レベルの目安、施設整備側と利用者側の責任分界点の明示などが記載されるべきである。港内静穏度や自動化ターミナル内での労働安全性への対応などについても類似した課題が内在する。

以上に示したように、施設利用者の利便性や生産性の向上ニーズに対応するための枠組みの明示やその照査技術を充実化していくことは、次世代基準の一つの方向性であろう。

■災害対応力の向上に配慮した設計体系

周知のとおり、我が国は自然災害が多い。港湾施設も、地震、波浪・高潮、津波等により幾多の被災を受けてきた。同じコストで整備するのであれば、被害を少なくし、かつ復旧しやすい構造であることが望まれる。例えば、ケーソン式防波堤であれば、設計条件を越えるような津波や波浪が来襲した場合でも、ケーソンが基礎マウンドから滑落・転倒しなれば、波高伝達率も一定程度に保たれ、かつケーソンを再利用した復旧も可能である。

また、地震直後の岸壁の利用を考えた場合、目視点検しかできなくても岸壁の利用可否の判断をより早く・正確に行うこと

が求められる。例えば、矢板式岸壁であれば、岸壁の天端の変形は発生していないが、矢板本体が海中で大きく孕みだしている場合（図3の右図）は、船舶に損傷を与えてしまうため、水中での変状調査が必要となる。一方、矢板が前傾し、構造全体が海側に変形する破壊モード（図3の左図）に設計がコントロール、もしくはその破壊モードしか発生しないことが事前に確認されていれば、岸壁天端の変形量が限界値を超えなければ水中部の健全性も確保されているという迅速な判断ができる可能性がある。このように、崩壊の形態を予測あるいは制御できるような設計法の導入は、災害対応力の向上に直結するため、今後の次世代基準に向けて検討すべきテーマであろう。

しかしながら、災害対応力の向上のためには、個々の施設の性能照査だけでは限界がある。このことは、図4のような防波堤、岸壁、防潮堤の組み合わせを考えると直ぐにわかる。防波堤が完全に倒壊した場合には、岸壁および防潮堤に作用する波は厳しくなり、荷役への支障から港湾全体としての機能低下に直結するが、防波堤が変形しても倒壊せずに留まれば、機能低下の程度は緩和されるはずである。現在、港湾施設の設計は、施設ごとに設定された要求性能のみに基づいて行われているため、このような被害の連鎖やそれに伴う港湾機能の低下を考慮することができない。このため、次世代基準に向けては、様々な施設・設備から構成されている港湾をシステムと捉え、各種作用（地震、津波、台風等）に起因するシステムの機能低下程度をハード・ソフト一体として照査できる体系を導入するなど、実際の災害対応力（緊急物資輸送や通常荷役の機能維持と災害後の早期復旧）に直結するような枠組み構築も重要なテーマであると考えられる。

■サステナビリティを考慮した設計体系

既存の港湾施設の多くは高度経済成長期に集中的に整備されており、今後急速に老朽化が進展することが懸念されている。その一方で、財源は限られているため、新規施設の整備も、既存施設の延命化・改良・更新・統廃合も、次世代に何をどう遺し

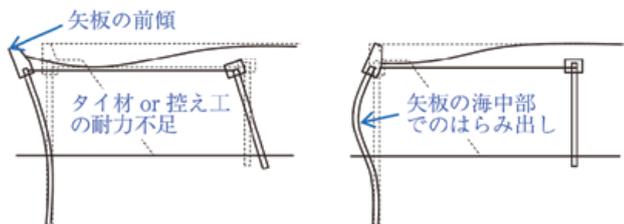


図3 矢板式岸壁の破壊形態の例

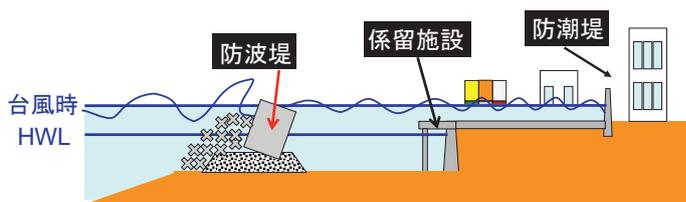


図4 台風時の防波堤・岸壁・防潮堤の被害連鎖のイメージ

ていくかが問われている。新規施設については、例えば、二酸化炭素の排出量を貨幣換算した上での設計断面比較に基づき工法を決定するなど、新たな社会的要請への対応の必要性が高くなるであろう。また、既存施設の改良では、気候変動への対応を全国一律に実施するのではなく、物流機能の維持にとって極めて重要となる港湾の防波堤を選択し、当該施設の設計外力を引き上げ、必要な対策を優先的に進めることができる設計体系も必要になる。ちなみに、国内の防波堤の設計波は50年確率波が標準であるが、海外港湾では100年確率波とする場合が多い。

以上のように、広く捉えれば、社会インフラの長期的な効用を最大限に高めるために、変化する社会要請に沿った合理的な断面決定を可能とするような、サステナビリティを考慮した設計体系の構築も、次世代基準に向けた一つの方向性であろう。

■数値解析や各種データを活用した全体最適を考慮した設計体系

近年、港湾施設の設計でも、有限要素法や差分法に代表される数値解析の利用が増加している。耐震強化岸壁を対象とした2次元地震応答解析に加えて、改良設計における新旧部材が組み合わさった複雑な断面を対象とした構造解析や、3次元流体解析による複雑な断面形状の護岸での波力や越波量の評価などが該当する。数値解析の利用自体について問題はないが、解析ツールがブラックボックス化し、ユーザーが解析結果の妥当性を直感的に判断することが難しいなどの課題がある。数値解析の品質確保および信頼性向上に向けた取組みとして、数値解析に対するV&V (Verification and Validation) の方法論の確立と標準・ガイドラインの策定が各国・各分野にて進められており、次世代基準では数値解析の利用ルールの明示が望まれる。

また、調査・設計・施工・維持管理の建設生産プロセスのさらなる効率化を図るために、BIM/CIMや各種のICT技術、規格化・標準化された部材、調査や施工段階で得られた計測・施工管理データなどを最大限活用できる標準的な設計プロセスの提示なども必要であろう。実現するのは容易ではないが、例えば、BIM/CIMによる構造計画と構造設計・数値解析とを連動させて、より合理的な構造断面を探索しながら、施工時の自動化・省人化や規格化・標準化された部材の活用効果を見極めつつ、設計・施工の建設プロセス全体としての生産性向上が見込める設計を探求するというのが、本来求められていることである。

■汎用性のあるレベル1信頼性設計法（部分係数法）への転換

国内外の多くの設計基準では、信頼性設計法が既に導入されている。港湾分野でも、H19基準からレベル1信頼性設計法

（部分係数法）が導入された。しかしながら、現場の設計者や関係する研究者から、当時の部分係数法に対する様々な意見が寄せられた。代表的な意見としては、「部分係数の解釈が難解で設定方法も煩雑であり、部分係数が細分化され過ぎており、計算ミスを起こしやすい（部分係数の簡素化ができないか）」や「部分係数の適用条件（構造形式や諸元、荷重・材料条件等）についての制限が多く、その適用範囲も明確ではない。もっとタフに利用ができる部分係数とならないか。日本の部分係数を海外の港湾工事で利用する際に、その適用可否について判断ができない。」などが寄せられた。このため、H30基準で提示した部分係数のフォーマットは、荷重ソース及び抵抗要因ごとに荷重係数・抵抗係数を細かく設定できるようにしているものの、設計実務での利便性を優先して部分係数の数を極力減らしている⁸⁾。

これまでの経緯を踏まえつつも、次世代港湾設計基準では、国内外で汎用的に利用ができる部分係数の提示が必要であると考えている。現状残されている大きな課題としては、以下があげられる。

- ・全ての構造形式および照査項目に対して信頼性解析結果に基づくキャリブレーションされた部分係数が提示されておらず、従来の安全率法に相当する照査方法も混在している。地震作用に対応する部分係数も定められていない。
- ・全体安定性の照査に対する、荷重の組み合わせに関する考え方が提示されていない。
- ・全体構造と部材の安定性の照査において、両者の部分係数の一貫性がない。
- ・蓄積された各種データを活用し、柔軟に部分係数を更新するような体系になっていない（レベル1地震動に対する照査用震度の設定法については、過去の岸壁の被災・無被災事例データを用いた妥当性の検証がなされているが、そのような検証を継続的に行い、必要に応じて設計法や係数をデータに基づき更新していくことが重要である⁹⁾）。

これらの課題は、H19基準から続いているものであり、今後の改善が望まれる。

5. おわりに

最後に、「性能設計」と「設計基準」に対するさらなる期待を述べたい。

本稿で繰り返し述べたとおり、性能設計の理念を中心に据えれば、従来見逃されていた照査内容の改善やマニュアルどおりの思考停止状態での設計作業からの脱却などが、継続的に図られることになる。また、実現したい性能を達成するために、新技

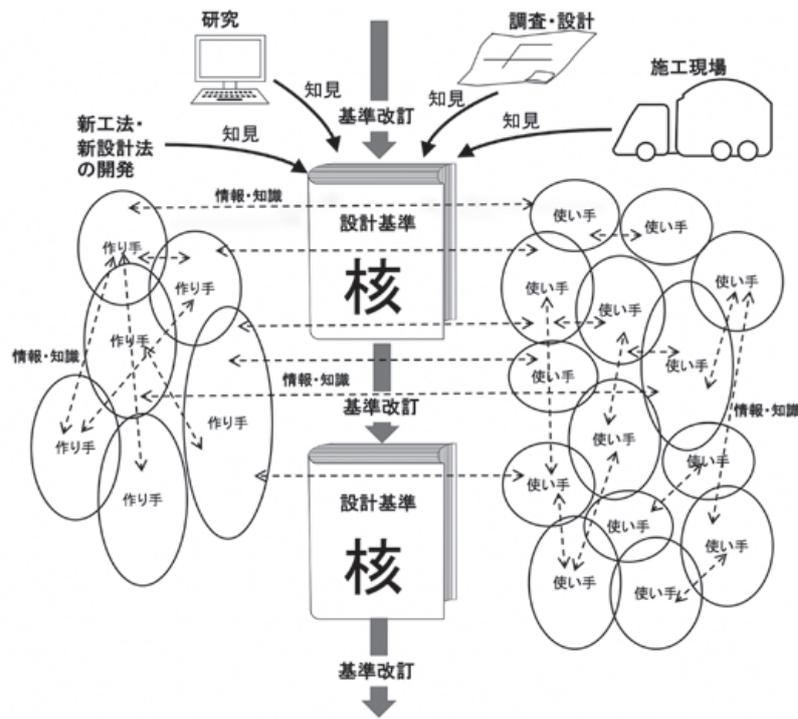


図5 技術伝承の土台(核)としての設計基準の役割(イメージ)¹⁰⁾

術の開発・導入への挑戦や、新技術導入を誘導するような入札契約制度への変革なども促されることになる。また、今後はこれまで以上に港湾での災害対応力の向上が求められるが、単体施設の性能照査だけではなく、港湾全体をシステムとして捉えて性能・機能を照査していくという方向性も、性能設計の範疇であろう。また、港湾全体システムの性能・機能レベルが、地震・津波ハザードの変化や気候変動による海面上昇や波浪等の極端化に対して、どのように応答するかを中長期的にモニタリング・予測し、それに対してどのような対策(ハード・ソフト)を段階的に講じていくかを検討することも、性能設計の目指すべき方向性であろう。まだまだ多くの課題が残されているが、今後も性能設計をさらに深化させていくことが社会的に期待されていると考えられる。

設計基準の策定とその継続的な改訂は、技術継承に大きな貢献をしていると考えられる(図5)。設計基準をきっかけとして、設計基準に記載されている文面だけではなく、その背景となる考え方や根拠なども含めて、何らかの知識や技術が技術者を介して伝達されるからである¹⁰⁾。設計基準という核となる書籍があり、それを継続的に改訂することで、組織や時代を超えて、様々な技術や技術者が自動的かつ有機的に繋がり、技術者間で重要な情報や知識が継続的にやり取りされる。ただし、近年は、技術継承を行うべき技術者の絶対数が減少し、かつ技術的な検討を行う時間の余裕がない事業も多く、技術継承は極めて難しい問題である。また、設計基準が対象とする施設、構造形式や設備は、年々、多種多様化し、その対象範囲は拡大す

る一方である。さらに、国内に加えて、設計基準の英訳版が海外のODA港湾プロジェクトでも利用されており、その使い手も多様化している。このような状況の中、港湾関係技術者の育成や技術者間の技術伝承に対して、設計基準を上手に活用していくことも重要な視点であろう。

【参考文献】

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2018。
- 2) 宮田正史，中野敏彦：港湾分野における性能設計，2013年度日本建築学会大会(北海道)研究集会 建築学会構造部門(荷重)－パネルディスカッション「建築物の性能設計・再考～想定外事象も踏まえて～」。
- 3) 三木千壽，日下部治，依田照彦，池上正春：東京ゲートブリッジに適用された新技術とその波及効果(座談会)，土木学会誌，Vol.97，No.3，2012。
- 4) 宮田正史，宮本久士：羽田空港D滑走路整備がもたらしたものは何か？～設計・施工一括発注方式による土木技術の進化の可能性～，土木学会誌，Vol.97，No.5，2012。
- 5) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所：地震・津波被災調査実施要領，平成26年3月。(http://www.pa.thr.mlit.go.jp/sendaignicho/pdf/hisaichosa-youkou.pdf)
- 6) 西岡悟史，井山繁，藤井敦，宮田正史，坂田憲治，高野向後：港湾分野における設計・施工・維持の連携強化策に関する基礎的検討，国総研資料No.932，2016。
- 7) 高野向後，宮田正史，藤井敦，井山繁，加藤藤万，山路徹，岩波光保，横田弘：事例分析に基づく既存港湾施設の改良設計の現状と課題，土木学会論文集B3(海洋開発)，73(2)，L426-L431，2017。
- 8) 竹信正寛，西岡悟史，佐藤健彦，宮田正史：荷重抵抗係数アプローチによるレベル1信頼性設計法に関する基礎的研究～永続状態におけるケーソン式岸壁の滑動および転倒照査を対象に～，国総研資料No.880，2015。
- 9) 福永勇介，竹信正寛，宮田正史，野津厚，小濱英司：重力式および矢板式岸壁を対象とした被災検証による照査用震度式の妥当性の評価，国総研資料No.920，2016。
- 10) 宮田正史，高橋康弘：港湾設計基準を通じた技術伝承(〈特集〉技術の継承と教育)，地盤工学会誌，65-3(710)，pp.16-17，2017。