

平成 22 年度「重点研究課題」調査研究報告書

研究課題名：信頼性理論に基づく土木構造物のライフサイクルマネジメント手法の構築

研究代表者：鈴木 基行

(推薦：構造工学委員会)

1. はじめに

近年、公共投資額の減少、高度成長期に集中整備されたインフラの一斉老朽化、少子高齢化社会の到来といった背景より、土木構造物の長寿命化に向けた取り組みが精力的に進められている。このうち、自治体をはじめとする各機関では、土木構造物群を資産（アセット）とみなし、ライフサイクルにわたる劣化予測とコスト評価により、合理的かつ効率的にその運用を図る、アセットマネジメントの概念が導入されつつある。

これに対し、土木学会の各委員会では、これまでコンクリート構造、鋼構造、複合構造、土構造といった構造・材料種別ごとに、その耐久性が論じられてきた背景がある。また、我が国の土木構造物はそのライフサイクルにおいて、大規模な地震や台風といった作用、厳しい環境作用等を受け性能が低下するが、これまで土木構造物の耐震性、耐風性、耐久性といった問題についても個別に扱われてきた感がある。一方で、土木構造物の管理者や、これを利用する市民にとっては、構造・材料種別や作用は問題ではなく、「丈夫で美しく長持ちする土木構造物」の実現のみが求められている。さらに、土木構造物のこの種のマネジメントシステムの運用にあたっては、性能低下の定量的予測や劣化機構の解明とともに、作用や性能に内在する不確実性を考慮し、信頼性の観点から技術者が最終的な判断を下す必要があるが、このような技術レベルにある組織は極めて少ないのが現状である。

以上の背景より、今後土木学会においては、土木構造物の長寿命化を目指し、構造・材料種別によらず、ライフサイクルにわたる作用や構造・材料特性を考慮し、信頼性理論に基づく性能評価を可能とする研究課題に取り組む必要があると思われる。よって、構造工学委員会では土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会を設置し、「信頼性理論に基づく土木構造物のライフサイクルマネジメント手法の構築」に関する研究課題に取り組むこととした。本研究体制は、図 1. 1 に示す通り、コンクリート構造 WG、鋼構造 WG、複合構造 WG、土構造・地震動 WG と、これらをつなぐ信頼性 WG、全体を包括する主査・幹事会からなる。

本研究小委員会では、平成 22 年度、全体委員会 2 回、主査幹事会 4 回、タスクフォース（研究方針に関する集中審議）1 回を開催した。そこで、コンクリート構造、鋼構造、複合構造、土構造を対象に、そのライフサイクルにわたる環境作用、地震作用、風作用とこれらの作用に対する耐久性、耐震性、耐風性を考慮したマネジメントの実現に向けた現状と課題、さらにはこれらの構造物のライフサイクルにわたる安全性評価のための性能評価手法、信頼性評価手法の現状と課題を抽出し、これらの知見を共有した。次いで、構造

物の用途や重要度，管理者の財政・技術力に応じた区分（3段階）を設け，区分に対応した性能マトリクスを構築し，これによる安全性評価手法としての信頼性評価のあり方について論じた．本研究成果は自治体の管理者・技術者，市民に対し，広く受け入れられるものとするため，ライフサイクルマネジメントに関する概念，研究・実施事例等を分かりやすく解説したリーフレットとしてまとめ，各地で講習会を開催することを予定している．

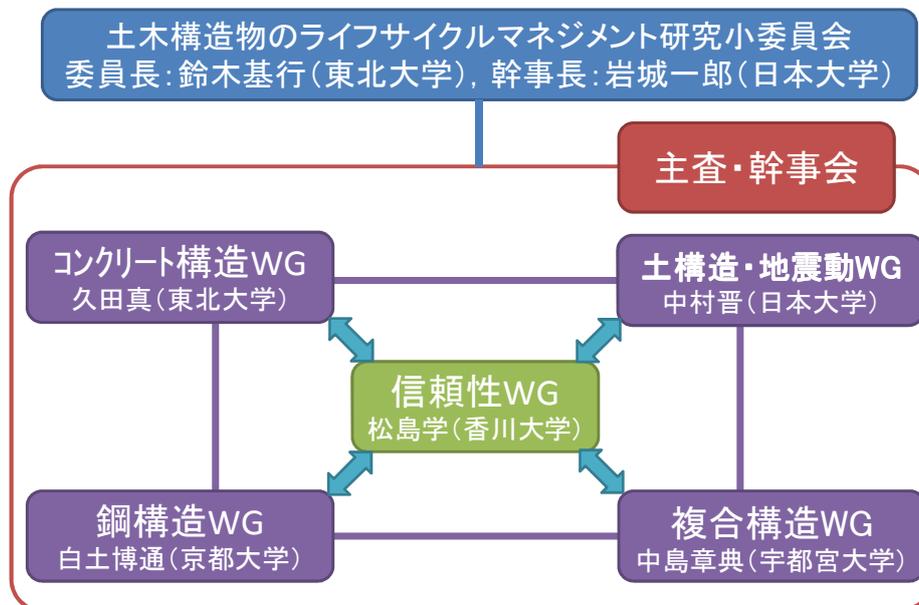


図 1. 1 本研究の実施体制

2. コンクリート構造

2. 1 概要

土木構造物は、①公共性が高く、不特定多数の国民が利用し、税金等公金により建設されることが多い、②建設期間および供用期間が長い、③概して大規模である、④厳しい自然条件下にある、⑤場所や目的によって文化的・シンボルとしての意義を持つ、⑥高度な技術の集合体である、などの特徴があり、その目的は、インフラとしての社会活動上の機能を確保し、公共の利益に貢献することである（土木構造物共通示方書より抜粋）。

構造物が要求された性能を満足するように設計される段階まではいずれの材料を用いた構造物でも同様であるが、コンクリート構造物は、セメント、水、細骨材（砂）、粗骨材を所定の品質となるようにコンクリートを配合設計し、製造されたフレッシュコンクリートを現場まで運搬し、打設、締固め、仕上げ、養生を経た後に構造物となるため、施工段階でのいわゆる「出来栄え」がその後の構造物の性能変化に大きく影響を及ぼし得る点に特徴がある。このため、場合によっては、竣工時の検査で、設計段階で目標とした構造物の性能が発揮されているかを確認できず、性能の低下が当初予想したよりも早くに生じてしまう可能性は否定できない。

したがって、コンクリート構造物は、その時々の状態を把握するために定期的な点検を行い、現在の状態が供用するのに支障がないかを適切に評価し、加えて将来に起こり得る状態の変化を予測することで、性能低下（劣化）が顕在化する前に未然に対応する予防保全型の維持管理が推奨されているのである。

例えば、土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕「10章 塩害に対する構造物の維持管理」では、コンクリート構造物の塩害に関する劣化過程を表2.1のように定義しており、その概念図として図2.1が示されている。これらの考え方は、コンクリート構造物が供用を開始した後の性能の変化のみを対象として図化されたものである。また、これまでの構造物の調査などによれば鉄筋コンクリート構造物（RC）であれば、塩害を受けたコンクリート構造物では、かぶりが剥落する程度の内部鉄筋の腐食の場合には、部材の構造性能には大きな低下は見受けられないこと、ただし、内部鉄筋の断面欠損が顕著となり腐食が著しく進行した場合には、部材の力学的性能は急激に低下すること、などが報告されるようになった。一方、プレストレストコンクリート構造物（PC）であれば、組上げ筋の腐食が発生していなくても、PC鋼材の腐食が進行するだけで部材の構造性能は著しく低下することなども明らかになりつつある。このような既往の調査結果を踏まえ、加えて前述のような設計段階における「設計図書中の構造物」あるいは施工段階における「施工工事の各プロセスを経て具体化された構造物」までも図中に書き込むとすると、図2.2のようになると考えられる。

すなわち、設計段階における「設計図書中の構造物」は、当然のことではあるが構造物には要求された性能が所定の水準を満足するように「設計」されるので、この段階で照査の手続きを経てOKとなった構造物は、補修や補強をせずとも、確実に予定供用年数の

間はもつものとなるはずである。しかしながら、図2.2に示した通り設計段階における「設計図書中の構造物」は、施工段階における工事の各プロセスを経て具体化され、実際の構造物となるのであり、この段階における何らかの不確定要因により、設計で確立した通りの構造物に到達していない場合が起こり得る（図2.2中の◎に到達しなかった場合という意味）。もしそうでなければ、設計段階で設定した用値のどこかにエラーがあるものと考えざるを得ない。

また、供用中の構造物にあつては、現状の示方書で定義されている「潜伏期」および「進展期」は供用期間中に長く緩やかに変化し、その反面、内部鉄筋の腐食の進行が加速（加速期）すると、思いのほか短期間に構造性能が低下してしまうと考えられる。

以上のような不確定でかつ未だに機構の解明が不十分な事象が多々あるのがコンクリート構造物であり、それゆえに、LCMにおいては、適切な点検、評価、将来の劣化予測および対策の選定がなされることが大前提となるのである。

これらの状況を鑑みて、コンクリート構造WGでは、主な活動内容を以下のように集約した。

- (1) 関連する国際基準の動向調査
- (2) 信頼性理論を導入するための枠組みの構築
- (3) 枠組みをわかり易く説明するためのブレイクダウン作業

表2.1 各劣化過程の定義
(示方書 [維持管理編] 解説 表 10.1.1)

劣化過程	定 義	期間を決定する主要因
潜伏期	鋼材表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度*に達するまでの期間	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材 の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	

* 標準的にはこの値を 1.2kg/m^3 と定めている。

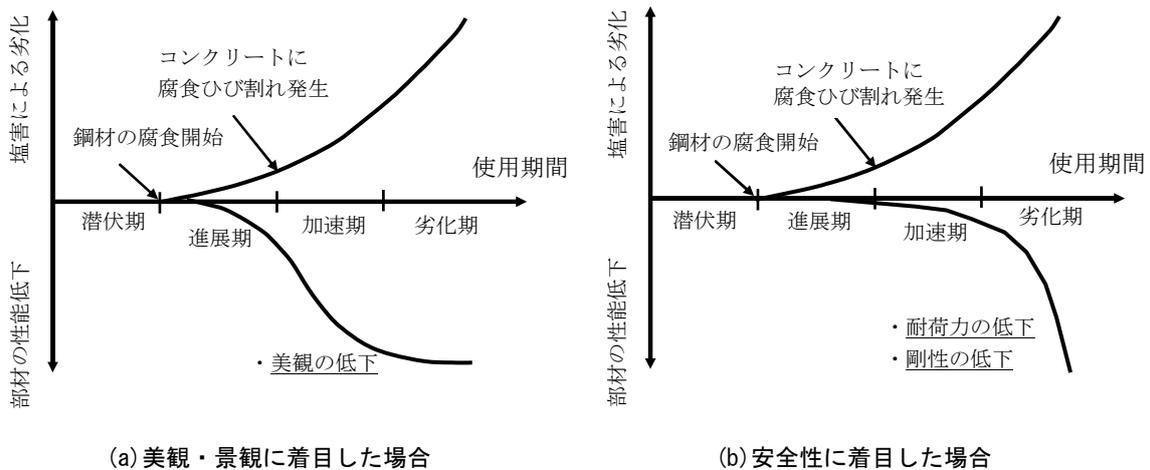


図 2.1 塩害による劣化進行過程の概念図の一例
(示方書 [維持管理編] 解説 図 10.1.1)

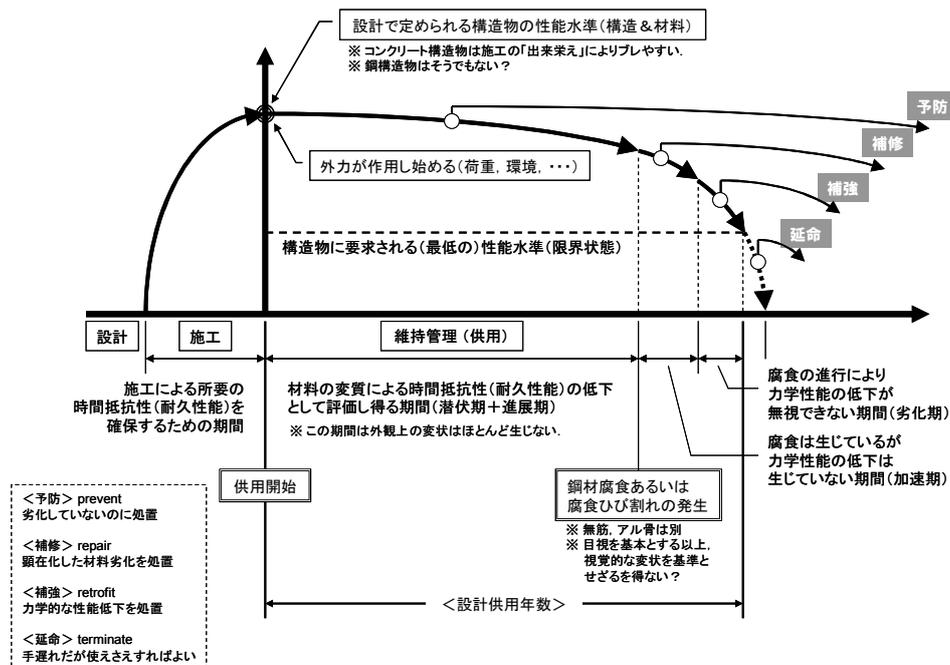


図 2.2 設計、施工ならびに供用段階での構造物の性能変化の概念図

2.2 国際動向の調査

国内外の既往の検討事例として、ISO を中心としてライフサイクルマネジメントに関連するすでに策定された規格および策定中の以下の規格案を調査した。

これらの国際規格については、土木学会 ISO 対応特別小委員会、JCI-TC71 対応委員会など、国内にも策定に携わるいくつかの委員会が活動中である。次年度以降、ISO における取り扱いについて体系的な調査を実施する予定である。

また表 2.2 に示した DARTS は、トンネル構造物を対象に LCC を考慮した設計支援

ツールの構築を目的に実施された、欧州共同研究プロジェクトである。このプロジェクトにおいては、それ以前に実施された同種のプロジェクト”DuraCrete”をベースとして、要素技術の高度化が図られたようである。DARTS では、LCC の最小化を図るための意思決定を支援するため、全体的・包括的な枠組みから、個別具体の要素技術（たとえばコンクリートの中性化や塩害予測のための具体的方法論）までが検討されている。さらに、LCC に関する様々な定義づけがなされており、個々のコストの考え方や算定方法についても、文書の中に含まれている（図 2. 3）。DARTS プロジェクトにおける検討結果については、後に発刊された fib Model Code に対して反映されているものと推察される。具体的な内容に関する調査は、次年度継続して実施していきたい。

表 2. 2 コンクリート構造物の LCM に関する主な国際規格

ISO 13822	2001	Base for design of structures - Assessment of existing structures
ISO 22965-1	2007	Concrete- Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier
ISO 22965-2	2007	Concrete- Part 2: Specification of constituent materials, production of concrete and compliance of concrete
ISO TC71 (SC7 原案)	2010	Maintenance and repair of concrete structures - Part 1: General principles
EN1504		Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity –
DARTS	2001-2004	Durable and Reliable Tunnel Structures
fib Model Code 2006	2006	fib Model Code for Service Life Design, 2006
fib Model Code 2010	2010	fib Model Code for Service Life Design, 2010

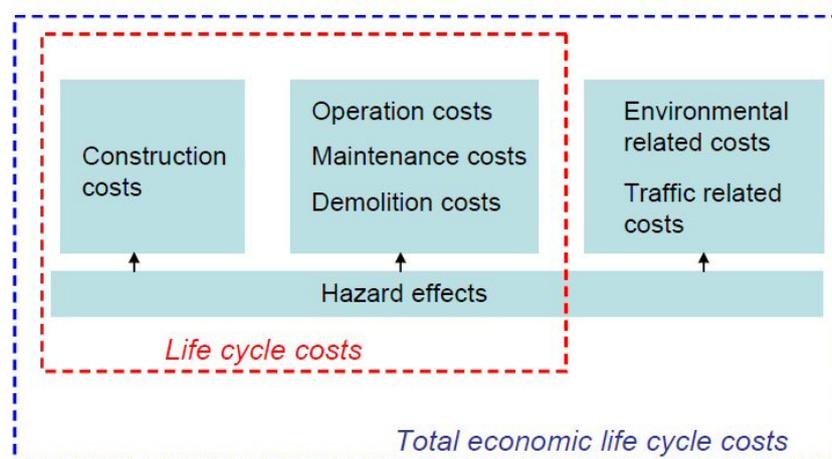


図 2. 3 DARTS における LCC の定義

2. 3 信頼性理論を導入するための枠組み作り

冒頭に述べたとおり、コンクリート構造物の維持管理において、信頼性理論に基づく枠組みを導入するためには、供用期間中の性能の変化を重要度に応じてマトリクス化する必要がある。表2. 3にコンクリート構造物の重要度に応じた維持管理の基本方針を示すが、これに基づき、WGで検討した結果として重要度に応じた維持管理のマトリクス案が表2. 4である。

このようなマトリクスが、コンクリート構造物を含めた構造形式全てについて作成することができれば、構造形式によらないライフサイクルマネジメントの枠組みを構築することが可能になると思われる。

表2. 3 重要度に応じた維持管理の基本方針

基本方針				
・予防保全は簡易予防保全と本格予防保全に分けられる。				
・簡易予防保全をベースとして重要度に応じて本格予防保全の割合を変える。				
重要度	維持管理方針	作用	劣化予測手法	LCC
3	予防保全前提(健全度4までしか許容しない)、地震作用を受けても3あるいは2までしか許容しない。	ライフサイクルにわたるあらゆる作用に対して評価(環境作用と地震作用を併せて評価)	劣化機構に基づく劣化予測	個および群のLCC評価と群の予算平準化
2	簡易予防保全と事後保全の使い分け(延命化を図り、健全度3あるいは2までを許容する)	環境作用と地震作用に対して別々に評価	統計処理に基づく劣化予測	個および群のLCC評価と群の予算平準化
1	原則簡易予防保全のみ。要求性能を落としながら、金をかけずに使いこなす。落橋・崩壊回避、規制(車両制限)&延命治療せず	落橋・崩壊を引き起こす恐れのある作用に対してのみ簡易に評価	個の劣化進行度調査	LCC評価せず。元々コスト最小。

※現行の用語を用いているが、予防保全や要求性能の引き下げ等の用語は見直しても良い。

表2. 4 重要度に応じた維持管理のマトリクス案

耐久性能	一般環境	厳しい劣化環境
高度	機能維持	
中位	限定機能維持 or 構造体維持	
一般	倒壊せず	

構造性能	健全度	
機能維持	5	潜伏期
	4	進展期
限定機能維持	3	加速期 前期
構造体維持	2or1	加速期 後期
倒壊せず	1	劣化期
倒壊	0	劣化期

2. 4 枠組みをわかり易く説明するためのブレイクダウン作業

委員会全体の活動目標の一つのとして、構造物管理者へ理解しやすくするためのブレイクダウンする作業を検討した。

検討の結果、ガイドラインの骨子を抽出したリーフレットの作成や、既往の失敗事例から教訓を学ぶという意味で「やってはいけない事例集」などの作成が必要であるとの見解に達した。

(1) リーフレットのコンテンツ

リーフレットは、信頼性理論の枠組みを分かり易く説明するために、表2. 5のようなコンテンツを盛り込むことが検討された。

(2) 「やってはいけない事例集」について

既往の失敗事例より、教訓を得ることは重要である。ブレイクダウンの内容として、以下の例に示すような事例集を取りまとめることが検討された。

例1) 塩害劣化の懸念のある構造物に、とりあえず表面被覆や部分断面修復を実施すると何が起こるか？

- 残留塩分（程度による）により再劣化が生じ、余計な出費が生じる可能性が高くなる。
- 場合によっては治ってしまうこともある。
- 構造物は外観上「きれい」になるので、少なくとも「その時」の担当者には達成感がある。
- 目視点検が困難になる（が、何もしないよりは「まし」である場合もある）

例2) 再劣化事例を列挙するだけでも、当時の技術としては優れていたものの長期療法ではなかった、あるいはアフターケアが不足していたということが臨床実験でわかってきた、などの整理ができる。

表 2. 5 リーフレットのコンテンツ案

1. 総論	2-4 構造物の種類と劣化の関係
1-1 LCMとは？	(1) 道路橋
1-2 LCMでマネジメントされるもの (新幹線を例に)	①高速道路
1-3 LCMを導入することの意義 (または、LCMを導入しなかったら？)	②一般国道
(1) 構造物の安全の確保	③地方道
(2) 管理上の予算確保の合理化・効率化	(2) 鉄道橋
1-4 LCMの最終目標	①新幹線
1-5 具体的に何をするのか？	②在来線
	③その他の鉄道構造物
2. コンクリート構造物のLCM	(3) 港湾構造物
2-1 コンクリート構造物の特徴	2-5 構造形式と劣化の関係
2-2 ガイドラインで取り扱うコンクリート構造物	(1) 鉄筋コンクリート(RC)構造物
①構造形式別	(2) プレストレストコンクリート(PC)構造物
②構造物別	2-6 地域と劣化の関係
③部材種類別	(1) 劣化外力の取扱い
2-3 ガイドラインで取り扱う外力	(2) 地域区分
(1) 塩化物イオン	①日本海側と太平洋側
①飛来塩分	②海洋環境と内陸
②内在塩分	③寒冷地と温暖地
③凍結防止剤	2-7 橋梁(コンクリート構造物)の維持管理の現状 と課題
(2) 地震動	3. LCM導入にあたっての留意点

2. 5 まとめ

我が国には、橋長 2m 以上の橋梁だけを取り上げても 6 7 万という夥しい数の構造物が存在している。これらのうちの多くが、コンクリート構造物であり、それを管理する立場の数多くの技術者が存在する。

残念ながら、現状としては、これらの構造物管理者全てが、構造や材料を熟知した技術者である可能性は高いとは言えない。特に、このような傾向は、全国の橋梁の半数以上を管理する地方自治体において顕著であると推察される。これまでのWG内での議論を通じても、このことは明白であり、したがって一刻も早く、効率的かつ合理的な維持管理の方法論を構築し、広く普及させることが急務であると思われる。

3. 鋼構造

鋼橋の LCM は、桁の防錆防食や鋼床版の疲労の問題にみられるように、構造要素ごとに従来より検討されている諸課題がある一方、これらを総合し鋼橋全体を取り扱う考え方や、複数の橋梁を統括する管理者の維持管理戦略に資する情報を改めてとりまとめ、橋梁の規模や重要度に応じて示すことが重要であるとの認識に立ち、LCM の意味、定義に立ち返り議論を進めた。

LCM とは？との問いかけに対し、「構造物の一生（施工開始から供用終了・取り壊しまで）を通じて、構造および材料の劣化・損傷の程度およびそれらの原因を知り、各種対策、補修、補強を適切な時期に講じること」が概ね委員間の共通認識であることが確認された。とくに維持管理・補修の面では、

- ・明確な目的・制約（供用年数、性能、コスト等）のもとで、
- ・適切なタイミングでの補修・補強を行うこと

が LCM であり、具体的には、

- ・対象構造物の安全性に及ぼす劣化の影響、
- ・現状の耐力の評価、
- ・劣化原因やその機構の解明と予測モデルの構築

の重要性が指摘された。さらに、LCM は点検・健全性評価の効率化を実現するための具体的方法であり、対象とする部材や損傷などを限定することによる負担軽減の可能性も指摘されたが、よりグローバルな維持管理戦略の構築と、対象や問題を限定化しより深く物理機構を探ること、との相反する方向性をどうまとめるか、課題の大きさが改めて浮き彫りになったとも言える。以上の意見交換を踏まえ、当初は、

- (1) 構造物に対する要求性能、劣化による性能低下について検討する。
- (2) 劣化の原因となる外因とその影響の度合いを評価し、劣化モデルを構築する。
- (3) 的確にかつ安価に性能低下を検知する。
- (4) そのうえで最適な補修・補強シナリオを策定する。（ユーザコストや年度予算も踏まえて）

などを活動の方針として提案することとした。

次いで、鋼構造は耐用年数に達しても十分に健全であるとも言われており、LCM で何を指すか目標を定める必要性・重要性とともに、コンクリート構造は確実に劣化が進行するのに対し、鋼構造は補修により確実に健全度が増加する固有の特徴が指摘された。また、ネットワークとしての LCM（管理者の立場）と橋梁個々の LCM という多面性も含むことから、鋼橋の LCM の考え方を問題や事例ごとに紹介し、それぞれの考え方を併記する形でまとめることとした。さらにコンクリート構造、複合構造、土構造との共通の議論を進めるため、要求性能と仕様およびその背景となる劣化、損傷、各種作用による応答評価をマトリクス形式で取りまとめる方向で議論を進める。

ところで、鋼橋の LCM を議論する上で焦点となる腐食、疲労の問題の他に、主として長大

橋の設計上重要な因子として風の問題が挙げられる。我が国の長大橋は若戸大橋完成後約 50 年，本州四国連絡橋大三島橋完成後約 30 年になる。風と LCM の接点を探ることも鋼構造グループの検討課題のひとつとして捉え，図 3. 1 に示す通り，長大橋の耐用年数内に経験する風荷重強度，動的現象の頻度・強さと，構造物に及ぼす影響（耐力に対する風の影響度）の確率統計的評価，飛来塩分量と部位別付着塩分量の評価，等について事例を挙げながら検討を加える予定である。

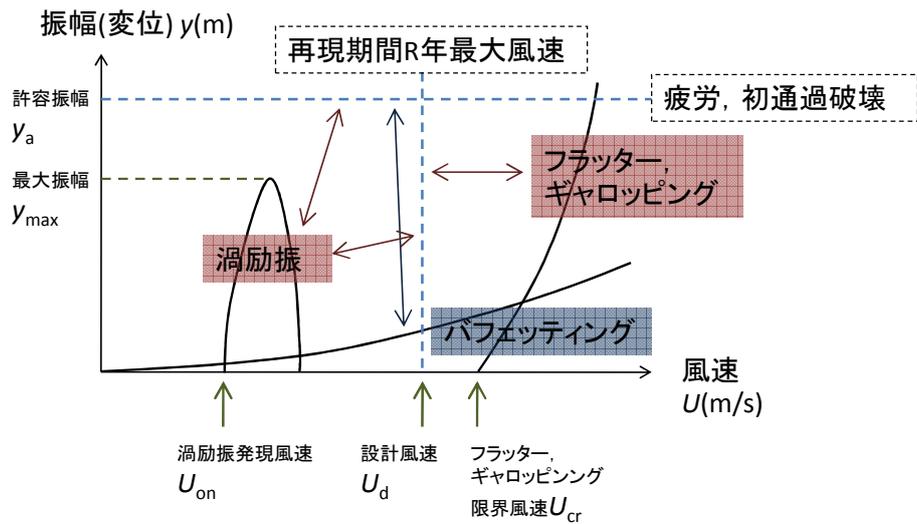


図 3. 1 長大橋の風による応答と安全性照査

4. 複合構造

4. 1 はじめに

鋼コンクリート複合構造には、合成桁、合成柱等これまで一般的に用いられてきた構造形式に加えて、鉄筋コンクリート床版の耐久性を改善するために使用例が増えてきている合成床版や鋼部材とコンクリート部材の異種部材接合部を有する複合ラーメン橋や混合橋等がある。これらの構造形式は、鋼材とコンクリート材料の長所を活かした、高い剛性と強い強度を有するという特徴がある。合成桁は長い年月に亘り適用されているが、合成桁を含めて鋼コンクリート複合構造の耐久性については必ずしも十分に把握されていない。

そこで本報告では、鋼コンクリート複合構造のうち、合成桁、合成柱（RC 柱への鋼板補強も含む）、合成版（主に橋梁床版としての適用例）、異種部材接合部について、その耐力や耐久性に影響を与える損傷あるいは劣化のタイプを抽出し、その要因、点検方法、対策等を整理する。

4. 2 複合構造として対象とする構造形式、部位、劣化損傷のタイプ

上記のようにここでは、複合構造の主な構造形式として、合成桁、合成柱（RC 柱への鋼板補強も含む）、合成版（主に橋梁床版としての適用例）、異種部材接合部を対象とする。まず、これらの構造形式あるいは部位が用いられている例を、それぞれの劣化損傷のタイプとともに簡単に説明する。

（1）合成桁

合成桁は、コンクリート床版と鋼桁を上フランジ上面に設置したずれ止めによって結合して一体化し、コンクリート床版も主桁作用に見込み、合成断面として荷重に抵抗する設計をしている。このため、コンクリート床版の劣化損傷は、床組としての機能低下にとどまらず、主桁作用に障害を及ぼすことが懸念される。一般には、合成桁を構成する鋼部材とコンクリート部材の耐久性において留意すべき事項は、それぞれ鋼構造あるいはコンクリート構造において留意すべき事項と同様である。しかし、合成桁において主桁作用としての橋梁の耐力や耐久性に影響を与える主要な劣化要因はコンクリート床版の劣化損傷である。

コンクリート床版の劣化損傷としては、コンクリートのひび割れ、剥離、骨材化が挙げられる。これらの損傷は、床版コンクリートの乾燥収縮、重車両の走行、車両の繰返し載荷による疲労損傷に加えて、それに伴う鉄筋の腐食によって生じると考えられている。

（2）合成柱

合成柱は、鉄骨をコンクリートで被覆した鉄骨鉄筋コンクリート柱と鋼管内にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管柱に大別される。いずれも通常の RC 柱と比較して合成断面としての耐力および靱性の向上だけでなく、施工の省力化や重量軽減といった合理化を図った特徴がある。

鉄骨鉄筋コンクリート柱は鉄骨がコンクリート中に埋め込まれているため、鉄骨の腐食

による劣化等はあまり問題にならないと考えられ、また、ひび割れが生じた場合の対応は鉄筋コンクリート構造に準じることでよいと考えられる。一方、コンクリート充填鋼管柱では、鋼管の外側にはもちろん塗装等の防食が必要であり、これも通常の鋼材の腐食対策等に準じることでよく、また、コンクリートのひび割れ等は問題にならないと考えられる。

さらに、耐震補強等の観点から RC 柱の外側に鋼板を貼り付けた鋼板巻き立て補強が用いられているが、この構造はコンクリートの外側に鋼板を配置するという点で鋼コンクリート充填鋼管柱に類似している。したがって、同構造の劣化損傷も同様の点に注意を払えばよいと考えられる。

しかし、コンクリート充填鋼管柱あるいは RC 柱の鋼板巻き立て補強でも、柱上端部や下端部の桁や基礎との連結部においては、鋼材とコンクリートの接触部（接触端部）が外面に露出していると、その部分に隙間が発生した場合には腐食の発生が懸念される。

（3）合成版

鋼コンクリート合成版（合成床版）は、道路橋における床版の長支間化や急速施工の要求に対応するために開発が行われてきた。鋼コンクリート合成床版は、基本的には2つに大別できる。1つは形鋼等を鉄筋のかわりに主部材として用い、コンクリートを打設した形鋼埋込型合成床版である。代表的なものとして、I形鋼格子床版等がある。もう1つは、適当なずれ止めを配置した鋼板にコンクリートを打設した鋼板・コンクリート合成床版である。近年、鋼板・コンクリート合成床版は、ずれ止めを改良した種々のものが開発されている。

合成版は、コンクリート下面を鋼板で覆う構造であるため、コンクリートのひび割れ性状を目視で確認できないことが維持管理上の課題である。現在のところ、道路橋等で適用されている合成床版は供用年数が比較的短いため、顕著な劣化損傷はほとんど生じていない。合成版の劣化損傷のタイプとしては、輪荷重走行による疲労損傷、鋼材の腐食およびコンクリートの材料劣化が考えられる。

疲労損傷としては、I形鋼格子合成床版では、パンチプレート部の疲労損傷があり、鋼板・コンクリート合成床版では、(a)ずれ止めの疲労破断に起因する鋼板とコンクリートの分離による破壊、(b)底鋼板の連続性を確保するために設けられる底鋼板同士の継手の破壊、(c)コンクリート内部に発生する水平方向または底鋼板の補剛リブの上端を結ぶように形成されるアーチ状のひび割れにより引き起こされる床版分離による破壊、(d)コンクリート部の押抜きせん断破壊等が想定されている。

また、合成版が橋梁床版として使用される場合、底鋼板は構造部材または型枠として用いられている。防水層の施工が不十分な場合や劣化が生じている場合には、床版上面からコンクリートを通して雨水等の侵入があり、底鋼板とコンクリートの界面に滞水し、底鋼板の腐食やずれ止め・形鋼の取り付け部の腐食が進行することとなる。また、ずれ止めの頭部付近や形鋼のフランジ下部では、コンクリート打設時に空隙が生じやすい。このような場合には、ずれ止めや形鋼自身の腐食が懸念される。また、鋼板の外表面は通常の鋼構

造物と同じ環境に曝されるため、結露水や飛来塩分に対する対策をとる必要がある。

合成版が道路橋床版として使用される場合、上面が舗装、下面が底鋼板で覆われているので、一般的なコンクリート構造物に比べるとコンクリートの材料劣化は少ない。

一方、凍害や化学的腐食作用等を受ける環境に合成版を用いる場合は、コンクリートの材料劣化についても対策をとっておく必要がある。

(4) 異種部材接合部

種々の鋼コンクリート複合構造物においては、その構造物内の各所に鋼材とコンクリートの接触部が必ず存在する。この鋼材とコンクリートの付着状態が良くない場合に、その部位に腐食因子の侵入があると両者の境界面の鋼材に腐食が生じる可能性がある。また、その腐食状態を長年放置すれば構造物の耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。

鋼コンクリート複合構造物を構成する鋼部材あるいはコンクリート部材の耐久性に関して留意すべき事項は、それぞれ鋼構造あるいはコンクリート構造において留意すべき事項と同様である。ここでは、このような鋼コンクリート複合構造物において、鋼材とコンクリートの境界部の腐食やそれに伴う劣化が懸念される典型的な部位について説明する。

上述のような鋼コンクリート複合構造物においては、鋼材とコンクリートが接触しているところが種々存在している。図4.1に鋼材とコンクリートの接触部の模式図を示すが、このような鋼材とコンクリートの接触端部が外面に露出しているところ（境界部）に隙間ができるとその部分に腐食が生じることが懸念される。

一般に、コンクリートはアルカリ性を呈することから、コンクリートに接触した鋼材は腐食しないと考えられていたために、その部分の鋼材に塗装等の防食が施されていない場合がある。そのため、上述の鋼材とコンクリートの境界部の鋼材は腐食する可能性のあることが指摘されている。このような部位に腐食が生じた場合、コンクリートと鋼材が接触する境界部は外面から見えないため目視によって確認することが難しく、また、境界部やさらにその内部に腐食が生じた場合の補修も難しい。

例えば、波形鋼板ウェブ橋の波形鋼板ウェブとコンクリート下フランジの境界部には、一般に、境界部からの水の侵入を防ぐためにシール材が設置される。しかし、このシール材も経年劣化するため、目視点検に当たってはシール材の状況も点検する必要がある。

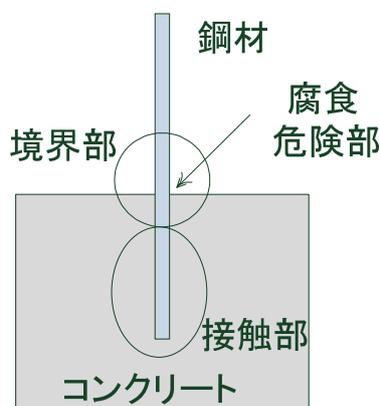


図4.1 鋼コンクリート接触部のイメージ

4. 3 各構造形式の劣化損傷のタイプと点検方法

以上のように、合成桁、合成柱（RC柱への鋼板補強も含む）、合成版（主に橋梁床版としての適用例）、異種部材接合部では、それぞれの構造形式あるいは部位において種々の劣化損傷が生じることが懸念される。これらの劣化・損傷は、鋼材（ずれ止めを含む）あるいはコンクリート部の疲労、鋼材の腐食、コンクリートの劣化損傷、あるいは、鋼材とコンクリートの接触面での腐食等である。これらのまとめると表4. 1のようになる。

鋼部材あるいはコンクリート部材部分の劣化損傷は、それぞれ鋼構造およびコンクリート構造で考えられるものと同じである。したがって、その点検方法や対策も同様であると考えられる。しかし、コンクリートの埋込まれた鋼材の疲労や腐食あるいは鋼材とコンクリートの接触面の腐食等は容易に発見できないため、点検が難しい。これらの部位の点検方法として、目視、あるいは、打音検査によるものが一般的であるが、最近では、超音波やレーザーを用いた点検方法も開発されつつある。しかし、これらの新しい点検方法は試行的に利用されている段階であり、一般的な適用にはまだ検討の余地がある。

表4. 1 複合構造の構造形式と劣化損傷の種類

劣化損傷の種類	合成桁	合成柱	合成版	異種部材接合部
疲労	鋼桁、ずれ止め、床版コンクリート		形鋼、底鋼板、ずれ止め、コンクリート	鋼部材
鋼材の腐食	鋼桁	鋼管	底鋼板、ずれ止め、形鋼	鋼部材表面
コンクリートの劣化損傷	床版コンクリート	被覆コンクリート	コンクリート版	コンクリート部材
鋼材とコンクリートの接触端部の腐食	鋼桁上フランジとコンクリート床版の接触面	鋼材とコンクリートの接触面	底鋼板とコンクリートの接触面	鋼材とコンクリートの接触面

4. 4 まとめ

合成桁、合成柱（RC柱への鋼板補強も含む）、合成版（主に橋梁床版としての適用例）、異種部材接合部等の鋼コンクリート複合構造では、上記のように各構造形式において種々の部位の劣化損傷が懸念される。鋼材あるいはコンクリート部のそれぞれの劣化損傷は、既存の鋼構造あるいはコンクリート構造で考えられているものと同じである。しかし、コンクリートの埋込まれた鋼材の疲労や腐食あるいは鋼材とコンクリートの接触面の腐食等

は、複合構造の特有のものであるが、それらの劣化損傷は容易に発見できないため、その点検も難しい。

また、複合構造では、このような劣化の部位を早期に確認し、これらの劣化が構造物の耐力や耐久性に影響を与えるようになる前に対策を施すことを目指している。したがって、これらの複合構造の劣化損傷と構造系の性能劣化の関連についてはまだこれからデータの蓄積等が求められている段階である。さらに、文献調査等により劣化損傷と構造系の性能劣化の関連付けを進める必要がある。

今後、複合構造として最も一般的な合成桁を取り上げ、コンクリート床版が劣化した場合の床版の取換えについて、検討すべき事項、具体的な取替え方法、さらに、取替え時の通行止め等の対応における経済比較も含めて検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会：事例に基づく複合構造の維持管理技術の現状評価，2010.5.

5. 土構造・地震動

5. 1 活動の経緯

(1) 活動計画

土構造物／地震動 WG の活動目的は以下の 4 つである。

- 1) 土構造物のライフサイクルマネジメント(LCM)のガイドライン作成
- 2) 土構造物のライフサイクルマネジメント(LCM)の事例評価
- 3) 336 委員会による生起確率付き地震動群の評価手法とそれに関連する事項に関する課題の整理
- 4) 推本のハザード情報に基づく生起確率付き地震動群の評価手法の整理と高度化

この目的を達成するため、2 年間の活動期間を以下のような年次計画に基づいて実施する。

<1 年目>

- ・ 道路、鉄道盛土などの土構造物、国内外のライフサイクルマネジメントに関する取り組みやその手法を整理する。
- ・ 道路、鉄道盛土などの土構造物の要求性能と外的作用、損傷に応じた補修・復旧方法と費用の関係について関係を整理する。

<2 年目>

- ・ RC 構造物や鋼構造物と同様な水準で、LCM の分かりやすいガイドライン(手引き)を作成する。
- ・ 土構造物のライフサイクルマネジメント(LCM)の事例評価の作成
- ・ LCM 評価に用いる地震作用の考え方の高度化

(2) 平成 22 年度の活動概要

1 年目である平成 22 年度は、以下に示すように 3 回開催 WG を開催した。

- ・ 第一回 WG 平成 23 年 5 月 12 日(水) PM2:00-5:00 土木学会会館 D 会議室

内容：活動方針に関する検討、既往の研究成果に基づく課題の整理、既往観測波形を用いた地震動予測に関する最新の研究に関する話題提供などを実施した。

- ・ 第二回 WG 平成 23 年 8 月 26 日(水) PM2:00-5:00 土木学会会館 E 会議室

内容：ハザード評価の観点での基準地震動評価の課題の整理、ライフサイクルコストを用いた地震時の補強盛土の経済的評価に関する話題提供などを実施した。

- ・ 第三回 WG 平成 23 年 11 月 16 日(火) PM2:00-5:00 東京都市大学図書館地下プレゼンテーション室

内容：公共施設の維持管理の現状と課題に関する話題提供、土構造物の維持管理方針・LCM の整理等、LCC 評価のための地震作用（松竹梅）、複数の作用に対する構造物の性能表現について議論を行った。

5. 2 活動報告

(1) 土構造物に係わる LCM の課題

土構造物の LCM について、経年劣化がある場合とない場合についてのイメージに基づき課題を以下のように整理した。

1) 経年劣化がある場合の土構造物の LCM イメージ(図 5. 1 参照)と課題

課題：土そのものに関しては、粘土の圧密のように時間遅れが無いと構造性能の経時変化をもたらすことが考えにくく、コンクリート構造物のような劣化イメージに合致しない。盛土の圧密沈下は実際にどの程度問題になっているのかが課題である。ただし、支持地盤については、地盤そのものが対象ではないため、橋梁やその他の構造物に対する LCM の経時変化要因として取り扱う必要がある。

LCM としての外的要因と土構造物の機能低下：舗装補修、土砂除去等は、経年劣化のイメージに合致する。それらは、補修ではなく、機能低下原因を取り除くことになり、LCC を下げることになる可能性がある。

以上より、土構造物の経年変化を考える上で、地盤から構造物への土圧、強制変位などを作用の一種として扱うか、それが構造物の経年劣化に影響を与える可能性があるかについての検討が必要である。

2) 経年劣化がない場合の土構造物の LCM イメージ(図 5. 2 参照)と課題

課題：

- ・補修費と耐震補強費の関係(耐震補強費と補修費との関係により、LCC を評価せずに対策を行うのは LCM として適切か(北海道の例、梅レベルの LCM))

- ・経年劣化がない場合に RC などの構造形式を対象として LCM と同じ範疇で評価できるか

- ・降雨や地震による土構造物の損害の可能性を評価できるのか。また、土構造物の性能の見直しによる性能向上は、要求性能というより要求性能+ α が可能な工法のコストだけで判断され、補修コストを下げる補強(補修方法の変更、半メンテナンスフリー)が選択され、LCC 評価をするのか。

(2) 複数の作用に対する土構造物の性能表現について

新設の構造物の耐震設計においては、地震動のレベルを設定し、それに対して構造物が設定した状態内にとどまることを確認することが一般的である。耐震性能は、地震動のレベルと構造物の状態の組合せにより表わされることになる。その耐震性能は、構造物の重要度(高度、中程度、一般)に応じ、地震動のレベルと構造物の状態の組合せで表現することができる。地震作用以外の作用に対しても、一般に構造物の重要度は変わらないと考えられる。ここで、重要度とは、構造物が所要の性能が損なわれた時の損失の程度に応じた水準を表し、維持管理水準による表現も必要となると考えられる。

次に、作用として地震作用を考えると、地震動は 2 つの性能を評価するための水準として、レベル 1 地震動) とレベル 2 地震動が規定されている。他の作用に対しても、性能評価の水準に応じて単一、また複数の性能が規定される。

また、構造物の状態は、1)機能維持、2)限定機能維持、3)構造体維持、4)倒壊寸前、5)

倒壊の5つの水準で設定し、それぞれの状態をできるだけ具体的な工学量で表現する。この表現は、地震作用を含む偶発作用に対する表現ではあるものの、環境作用などの変動作用による性能の経時変化の状態変化に対して、その水準、特に機能維持から限定機能維持の間の性能を確保するための水準を加えることが必要ではないかと考えられる。

鉄道構造物・維持管理標準によれば構造物の維持管理性能は健全度 A, B, C, S の4段階で表現されている。S は変状のない健全、C は軽微な変状であり、現状では影響はないものの、点検観察が必要な水準(仮称、点検レベル)、B は現状で影響を及ぼす変状ではないが、進行すると A に至る監視が必要な水準(仮称、監視レベル)である。これは、機能維持水準の範囲ないで、維持管理上の必要性能といえる。また、A は A1, A2, AA まで分けられ、A1 の性能低下のおそれがある水準、A2 の性能低下が進行している状態、AA の構造物の機能に影響を及ぼす水準である。その維持管理水準と前述の構造性能を合わせると以下のように表現できる。いずれにしても、新設構造物に付与する性能と、偶発、変動作用後の維持管理のための水準は適切に整合させる必要がある。これら性能と工学量および外観の状態などを適切に関連づけ、それへの対処のグレードを設定することにより、松竹梅対応が可能となると考えられる。

(3) LCC 評価のための地震作用について

J-SHIS の地震ハザードが利用できる状況にあり、無視はできない。ここでは、J-SHIS を活用した LCC 評価に用いる地震作用の考え方を示す、一方で、LCC 評価以前に、現行の耐震基準を満たさない構造物がある。こうした構造物の取り扱いは課題である。

松コース：J-SHIS 等の地震ハザード+最新の評価手法による地震動評価（J-SHIS の震源断層に戻って地震動を評価する必要あり）。LCC 評価時に動的解析を前提とする構造物が対象。

竹コース：J-SHIS 等の地震ハザードを基に応答スペクトルを振幅調整（震度を地動速度に変換し、地盤種別毎の標準スペクトルを振幅調整）。LCC 評価時に静的解析を行う構造物が対象。

梅コース：狭い範囲（各市町村）では地震ハザードに大きな違いはないとして、地盤増幅特性のみ考慮。補修の優先度評価の一項目として地震作用を使う場合。

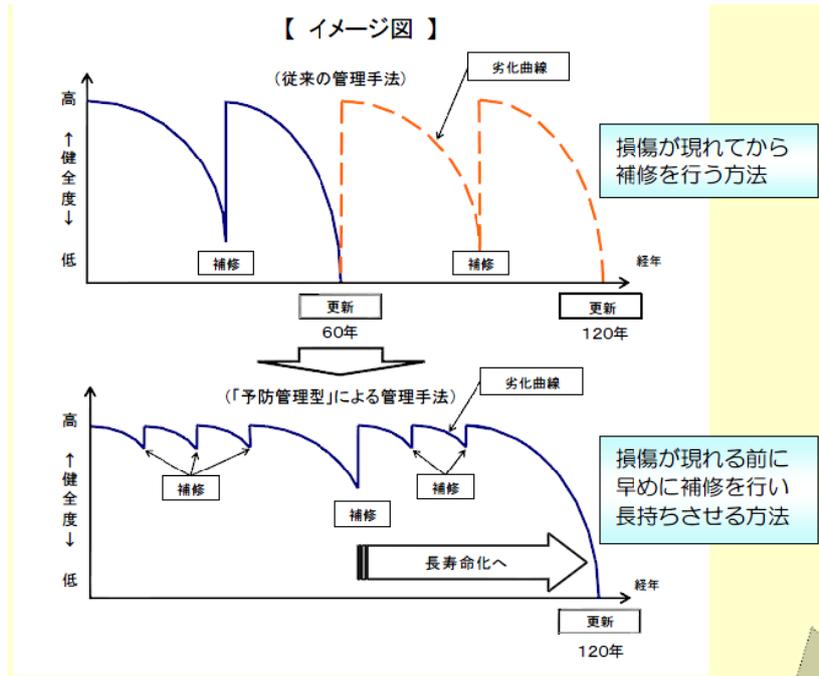


図 5. 1 経年劣化がある場合の LCM のイメージ

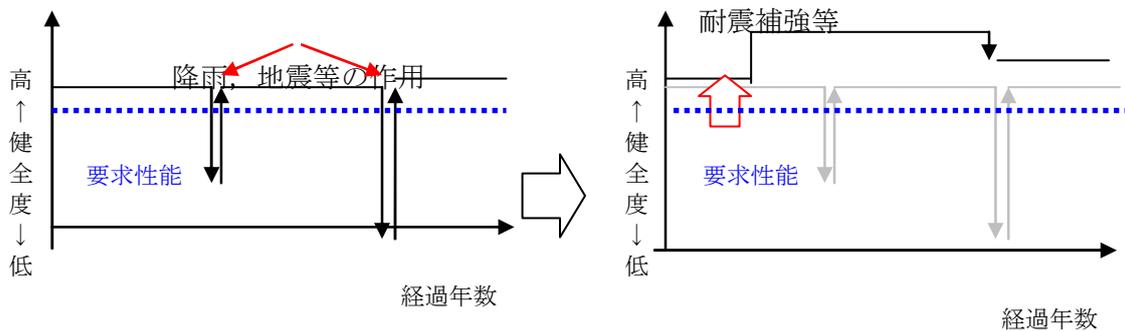


図 5. 2 経年劣化がない場合の LCM のイメージ

表 5. 1 機能維持と限定機能維持の工学的考え方

機能維持			限定機能維持		
既設構造物の内外性状		新設構造物/既設構造物の応答性能	既設構造物の内外性状		新設構造物/既設構造物の性能
点検水準	監視水準	応答レベルが小さい	性能変化	変状進行	内外性状, また応答レベルが構造物に補修・補強が必要な損傷となる

6. 信頼性評価

6. 1 はじめに

信頼性 WG では、平成 22 年度の活動において、構造種別によらないライフサイクルにわたる安全性照査の枠組みに関する議論を行った。本稿では、荷重・環境作用の設定法や、構造系を構成する各部材の性能マトリクスおよび安全性評価の考え方、構造系としての安全性評価法に関してまとめる。

6. 2 荷重・環境作用の設定法

現行の耐震設計では、先にレベル 1 地震動，レベル 2 地震動ありきで，レベル 1 地震動を用いて使用性を照査し，レベル 2 地震動を用いて安全性を照査するとの流れになっている。しかし，本来の意思決定過程としては，先に照査すべき性能があり，設計供用期間を決め，設計供用期間内の作用の種類が決まり，当該作用に対して確保すべき要求性能に対応させて限界状態を決めて，最後に作用の再現期間が決まる以下の流れが自然である。

- 1) 構造物が果たすべき機能と，その実現のために必要となる性能を決定する。
- 2) 構造物の重要度も考慮して，設計供用期間を決定する。
- 3) 設計供用期間内で考慮すべき作用の種類が決まる。
- 4) 作用に対して確保すべき性能と，性能に対応する限界状態が決まる。
- 5) 要求性能，設計供用期間，重要度を考慮して，設計に用いる作用の値あるいは再現期間が設定される。

6. 3 部材の安全性評価

(1) 部材の性能マトリクス

構造系は多様な部材から成り立っているが，部材によって求められる性能が異なる。例えば，橋梁を例にとると，地震時の損傷の発見・修復が困難な基礎は降伏させずに，橋脚基部を塑性化させるといったように部材によって許容する限界状態が異なる。この具体例に対応するように，構造系を構成する各部材について，主部材と非主部材とに分けて，機能維持や限定機能維持といった目標性能との対応を含めて，性能マトリクスを整理することとした。

耐震性能および耐久性能に関する性能マトリクスを表 6. 1 および表 6. 2 に示す。表 6. 1 の耐震性能に関する性能マトリクスの場合には，建設地点において様々な強度の地震動が生じ得ることから，使用性照査と安全性照査のそれぞれに対応させて異なる地震動レベルを考えている。表 6. 2 の耐久性能に関する性能マトリクスの場合にも，耐震性能に関する性能マトリクスと同様に，異なる環境作用レベルで区分することもできるが，その場合には，結果的に建設地点毎の区分となり，同一地点において異なる作用レベルを考えている耐震性能に関する性能マトリクスの考え方と整合しない。耐久性照査は時間変化を伴うことが特徴であることを踏まえ，表 6. 2 のように，設計供用期間として，設計上

許容する限界状態を規定するだけでなく、設計供用期間を超えて実際に供用する期間として定義される「実供用期間」で許容する限界状態を規定した。このように、時間の概念を導入して許容する劣化程度を規定することで、環境作用の厳しさが間接的に反映された性能マトリクスを与えることができる。

(2) 部材の安全性(健全性)評価法

(1) では、性能マトリクスについて、耐震性能と耐久性能を例に取り、個別に示したが、供用年数の経過とともに、耐震性能も低下し得る。この材料劣化を考慮した部材の性能評価法の概念図を図6. 1に示す。なお、図6. 1において、使用性照査と安全性照査に用いる荷重レベルは再現期間に応じて決定される。

塩害環境下にある RC 橋脚を例にとると、鋼材にある腐食減量が生じることで耐力やじん性が低下することから、塩害劣化の指標としては鋼材の腐食減量を用いて、耐久性能と耐震性能とを対応付ける。また、耐久性能のグレードが上がることは、腐食減量が低下することで表現される。

6. 4 構造系としての安全性(健全性)評価法

Caltrans では、劣化レベルを点数化し、各劣化レベルにある各部材の量から評価時点の構造系としての資産価値を算定し、それを初期資産価値で除すことで **Health Index** を定義している。我が国でも、国土交通省や地方自治体で、各部材の劣化レベルに各部材の重み係数を掛け合わせて総和を取ることで、構造系としての健全度を評価している。その際、各部材の健全度の経時変化は、劣化が生じた構造物を対象にして得られた回帰式で与えられているが、劣化が生じてない構造物は統計量に反映されていないため、結果として、非常に厳しい評価(安全側の評価)となっていることに注意が必要である。

本WGとしては、国交省や地方自治体で活用されている各部材の重み係数を参考にして、例えば、以下のような算定式で構造系としての健全度 I を評価することとする。ただし、損傷確率の関数形については、信頼性指標を用いるなど、別途検討の余地がある。

$$I = \sum w_i(1 - pf_i) \quad (1)$$

$$I = \min. \{w_i(1 - pf_i)\} \quad (2)$$

ここに、 w_i は部材 i の重み係数、 pf_i は部材 i の損傷確率である。

式(1)は全ての部材の重み付き健全度に基づく総合評価として構造系の健全度を評価する算定式であり、式(2)は重み付き健全度が最小となる部材で構造系の健全度を評価する算定式である。

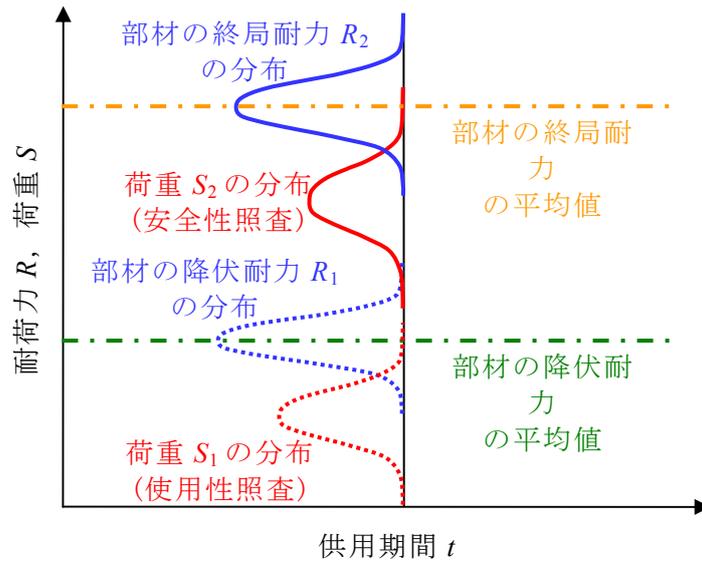
今後は、上記の手法に基づいて、点検・検査結果を活用して各評価時点で健全度評価結果を更新することも検討したい。

表 6. 1 耐震性能に関する性能マトリクス

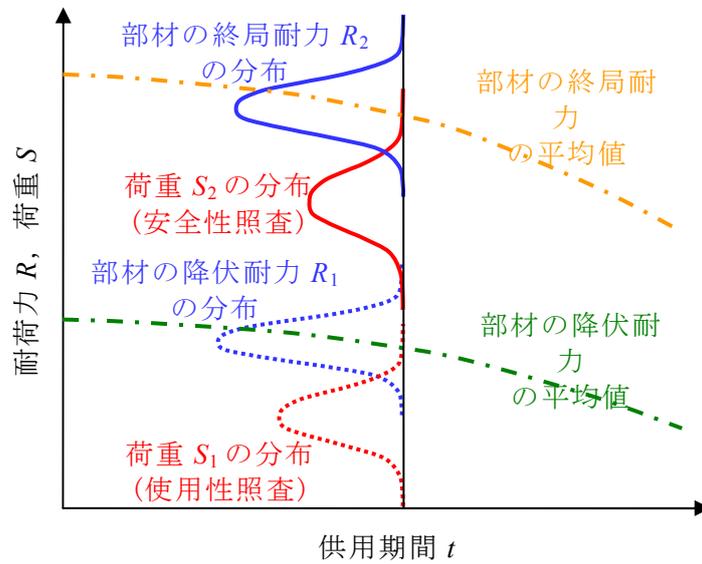
性能	使用性照査 (レベル I 地震動)	安全性照査 (レベル II 地震動)
高度な耐震性能	機能維持	限定機能維持
中程度の耐震性能	限定機能維持	限定機能維持～構造体維持
一般の耐震性能	—	倒壊しない

表 6. 2 耐久性能に関する性能マトリクス

性能	設計供用期間	実供用期間
高度な耐久性能	機能維持 (主部材, 部分的)	限定機能維持 (非主部材)
中程度の耐久性能	限定機能維持 (主部材, 全面的)	限定機能維持～構造体維持 (主部材, 部分的)
一般の耐久性能	—	倒壊しない (主部材, 全面的)



a) 材料劣化を考慮しない場合



b) 材料劣化を考慮した場合

図 6. 1 材料劣化を考慮した各部材の使用性・安全性照査

7. おわりに

本研究により、土木構造物のライフサイクルマネジメント（Life Cycle Management: LCM）の現状と課題について、構造形式（コンクリート構造、鋼構造、複合構造、土構造）と各作用（環境、地震、風）に対する抵抗性（耐久性・耐震性・耐風性）毎に整理し、これらの情報を共有化するとともに、土木構造物のライフサイクルにわたる安全性を包括的に評価し得る性能評価手法、信頼性評価手法の現状と課題について整理し、今後の目指すべき方向性を明示することができた。これまで構造形式や作用に対する専門家が一同に会し、その現状と課題について議論することがほとんどなかった中、本委員会が設置され、土木学会からの助成の下、活動を展開できた意義は極めて大きいと思われる。

また、構造物の用途や重要度に応じて3段階にレベル分けし、レベルに対応した性能マトリクスの構築と、これによる性能評価、信頼性評価に基づき構造物の安全性評価を行う枠組みを構築した。この点も規模や用途、管理者の財政状況や技術力の異なる構造物のメンテナンス&マネジメントのあり方を考える上で、一石を投じたものと思われる。

一方、3月11日の東日本大震災を受け、委員長、幹事長、多くの主査が被災者となったため、年度末に予定していた主査幹事会が開催できず、本研究課題の成果の取りまとめが十分にできなかったことも事実であり、この点は活動再開後に早急に行うとともに、本委員会2年目に当たる次年度の活動につなげる必要がある。本研究成果は自治体の管理者・技術者、市民に対し、広く受け入れられるものとするため、ライフサイクルマネジメントに関する概念、研究・実施事例等を分かりやすく解説したテキストとしてまとめ、平成24年度以降、各地で講習会を開催する予定である。