

建築構造物の長期性能設計の将来像

金子 佳生^{*1}・前田 信之^{*2}・山野辺宏治^{*3}

1. はじめに

日本建築学会では、鉄筋コンクリート構造における常時荷重下の課題と長期性能設計に対して、広く意見を聴取することを目的として、「鉄筋コンクリート構造の常時荷重下の課題と長期性能」と題したパネルディスカッションを2009年8月に行った。本論では、主題のひとつであった、性能の経時変化を考慮した建築物の長寿命化や維持管理に関する社会的な動きを考慮した長期性能設計の将来像¹⁾を提示し、今後の展望について言及する。

鉄筋コンクリート部材の長期性能評価項目に「ひび割れ」と「長期たわみ」があるが、従来は仕様規定を遵守することで最低限の長期性能は確保され则认为、その検討を省略することが多かった。しかし近年、これまで想定されていなかったような、長スパン化や高強度材料を用いた部材が使用されるようになってきた。さらに、住宅の品質確保の促進等に関する法律、長期優良住宅の普及の促進に関する法律等が制定され、性能の明示が必要となってきている。そのため、ひび割れ幅や過大なたわみの問題が改めて問われるようになってきた。

一方、これまでの許容応力度設計法における長期設計・短期設計、また性能規定化における使用性・安全性は、ある一定の再現期間に基づく外乱の大きさを対象とし、連続的な時間軸に対する性能評価ではなかった。この時間軸上の長期性能評価を実現するためには、材料・施工・構造設計の各分野の連携が求められる。

このような社会背景に対し、ここで記す長期性能設計は、常時荷重のみでなくすべての外乱を対象とし、以下のように定義する。なお、使用性・安全性や耐久性が低下した建築物に対する修復性（修復レベル）評価も、長期性能設計に含める。

長期性能設計とは、時間軸を考慮した上で、建築物の構造躯体が供用期間中、設定した使用性・安全性や耐久性に関する品質や性能を確保できるようにする設計である。

2. 目的と工学的意義

鉄筋コンクリート造を含め、あらゆる構造種別の建築物は、竣工後時間とともにその性能が低下していく。しかしながら、従来の性能設計の概念は、設計段階で性能を設定し、その性能を供用期間中は維持・管理する考えであり、建築物の性能の経年変化を時間軸で考慮していなかった。

これに対し、ここで定義する長期性能設計とは、図-1に示すように、時間軸を横軸として供用年数を設定し、建物性能を定量化するための性能指標を縦軸とした、連続的な時間軸に対する性能評価（ヘルスマonitoring）をベースに、建築物の長寿命化や維持管理に関する社会的な動向を考慮することを目的とするものである。図中の用語の定義を以下に示す。

・性能指標：建物性能を定量化するための時間を関数とする縦軸の変数である。性能指標の各評価項目については、その特性値が劣化に伴って増加するようなものであれば、その逆数を評価項目とすることによって「低下」と関連づけることは可能である。例えば、最大層間変形角の逆数を用いた規準化変形や最大ひび割れ幅の逆数を用いた規準化ひび割れは、直接的な構造性能低下を示し、また材料レベルではクリープによるひずみ²⁾の逆数は見かけのヤング係数、長期たわみの逆数は見かけの剛性とみなすことができる。さらに、システム同定手法に基づく、層剛性低下係数（残存剛性と初期剛性の比）³⁾も重要な性能指標となりうると考える。

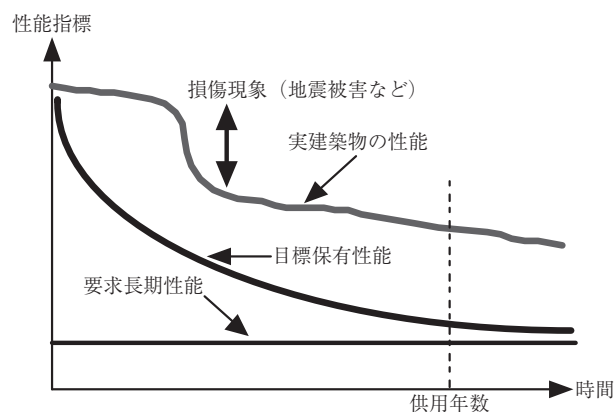


図-1 長期性能設計の考え方¹⁾

*1 かねこ・よしお／京都大学大学院 工学研究科 教授（正会員）

*2 まえだ・のぶゆき／清水建設㈱ 千葉支店生産総合センター 生産支援グループ長（正会員）

*3 やまのべ・こうじ／清水建設㈱ 技術研究所 グループ長

- ・**要求長期性能**：建築物に対し供用期間内で継続して確保が要求される長期性能である。要求長期性能は、複数のグレードに分類され、時間の経過により変動すること考えられる。これに対し、図中の実建築物の性能とは、竣工時から使用完了時までの、種々の外乱に対し変動する、実建築物の性能変動例を示している。
- ・**目標保有性能**：設定した供用期間中の要求長期性能を満たすための、時間の経過と連動した劣化・損傷現象に対する最低限必要な長期性能の目標値である。すなわち、要求長期性能を確保するために想定した、時間軸とともに変化する設計用性能変動モデルである。

このように、長期性能設計は、多くの工学量を定量化し、その信頼性も同時に確保するという高度で広範囲な研究領域に基づいて達成されるものであり、個々の研究領域の発展とその融合による、建築および社会全般の長寿命化という、これまでに類のない工学的意義を持つ。そのひとつの方向性として、材料レベルの局所化を定量化する数値解析手法、部材レベルや架構レベルの変形挙動をマクロな力学モデルにより定量化する数値解析手法、および各レベルに対する実験手法による相互の共同検証に基づいて信頼性の高いヘルスマonitoringシステムを構築することは、長期性能設計において重要な研究領域のひとつと考えられる。

以上、長期性能設計の目的と工学的意義について記述したが、長期性能を低下させる要因とそれに対して想定される長期性能設計を定義するため、ここでは長期性能を低下させる要因を以下に示す劣化現象と損傷現象の2つに分類する⁴⁾。

- ・**劣化現象**：物理的、化学的、あるいは生物的要因によって鉄筋コンクリート部材の品質や性能が時間とともに徐々に低下する現象で、大気中の炭酸ガスによるコンクリートの中性化や常時荷重による疲労等も含まれる。特に、コンクリートの中性化が鉄筋のかぶり厚さの深さまで進行すると、鉄筋の腐食によりコンクリートにひび割れが生じ、建築物の使用性や耐久性のみでなく、安全性が低下する場合もある。これらの要因に対する長期性能設計においては、主架構や2次部材を対象部位とし、すべての構造要素に対し、弾性限以下（低応力レベル）の荷重に限定してたわみ、ひび割れ等をヘルスマonitoringし、経年劣化による耐力低下、疲労寿命を定量化することにより、長期性能を明瞭化する必要がある。
- ・**損傷現象**：地震、台風、あるいは火災等の突発的な自然現象、あるいは日射、設計想定外の外乱的作用によって、鉄筋コンクリート造部材に損傷が生じ建築物の品質（主として安全性）が短時間に低下する現象で、これらに対する長期性能設計においては、

対象部位として主架構と2次部材に分類して以下のように明瞭化する必要がある。

- 1) 主架構の長期性能設計：地震、台風、水害、雪、過大積載荷重、熱、テロ等の非常時荷重に対し、主架構の供用期間内での性能低下を、主として安全性の観点からヘルスマonitoringし、損傷後の長期性能を定量化する。
- 2) 2次部材の長期性能設計：2次部材に対し、非常時荷重（水害、雪、過大積載荷重、熱、テロ）や設計時想定外の変形挙動（地震等による境界条件の変化）に起因する性能低下を、主として、使用性の観点からヘルスマonitoringし、損傷後の長期性能を定量化する。

3. 長期性能設計概念の具体化

先に定義した長期性能設計における重要なプロセスは、鉄筋コンクリート造建築物の供用期間に対し定めた要求長期性能を満たすための目標保有性能を時間軸で設定し、さらに時間軸で建築物の性能をヘルスマonitoringし、建築物が目標保有性能を有しているか適時検証することである。

長期性能設計の概念をより具体化させるために、建築物の重要度を考慮し3つのグレードを設定する。図-2に設計グレードの考え方を以下に示す。

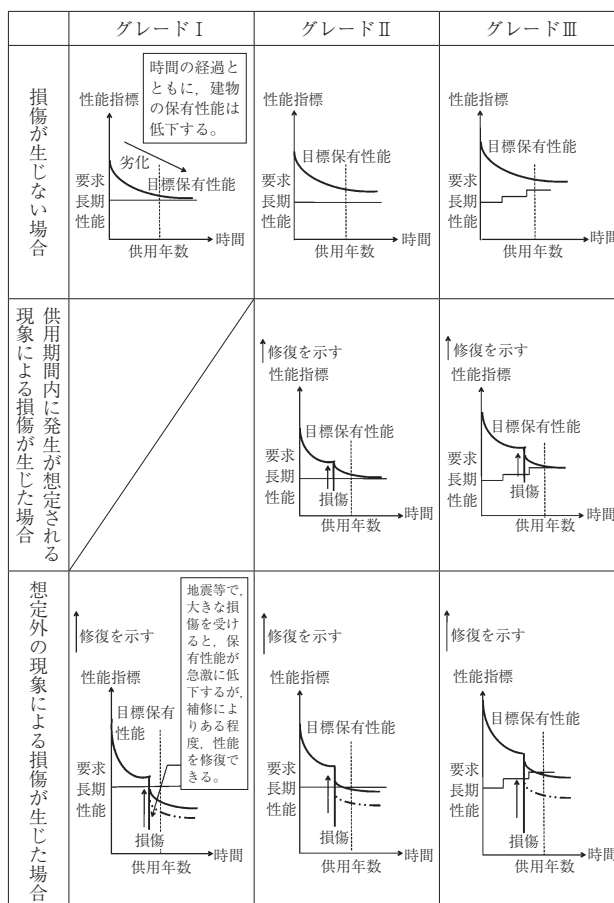


図-2 建築物の設計グレード¹⁾

- ・グレードⅠ：劣化現象による性能低下に対しては、供用年数に達するまで要求長期性能を満足する。ただし、損傷現象が生じた場合には、設計において修復性能を考慮していないため、修復しても要求長期性能を満足できない場合がある。現状は、この考え方で設計している。
- ・グレードⅡ：設定した供用期間内に発生が想定される現象による損傷に対しては、建築物の品質や性能が一時的に低下しても修復を施すことによって要求長期性能を満足する。ただし、想定外の損傷現象が生じた場合には、修復しても要求長期性能を満足できない場合がある。
- ・グレードⅢ：性能設計に関する考え方はグレードⅡと同じである。ただし、人々の暮らしが豊かになり、建築物に対する要求長期性能が高まっていくことを考慮し、要求長期性能を変化させている。設計段階で、将来の要求長期性能の向上を推定し、それを要求長期性能に反映させている。

ここで、グレードⅢの考え方を、住宅の床スラブを例にして示す。住宅の床スラブにおいては、居住者の要求性能が厳しくなり設計法が変化してきている。かつて遮音性能や振動等に対する要求性能は明確に設定されていなかったが、居住性向上を図るため重量床衝撃音遮音性能や振動に関する環境係数等が規定されるようになり、125 mm 程度であった床スラブ厚が、現在は 180 mm 程度になっており、さらに性能向上のため床スラブ厚を厚くしようとする動きがある。また、かつては圧縮側となるスラブ中央上端に主筋を配筋しないベンド配筋であったが、乾燥収縮ひび割れの制御を目的として、圧縮側となるスラブ中央上端にも鉄筋を配筋するようになった。

設計者は、建築主が最適な要求長期性能を選択できるよう使用性・安全性や耐久性に関する品質や性能を説明する必要がある。特に建築主が経済的かつ合理的な選択ができるようコストについても説明しなければならない。

経済性の概念を図-3 に示す。図では要求長期性能が

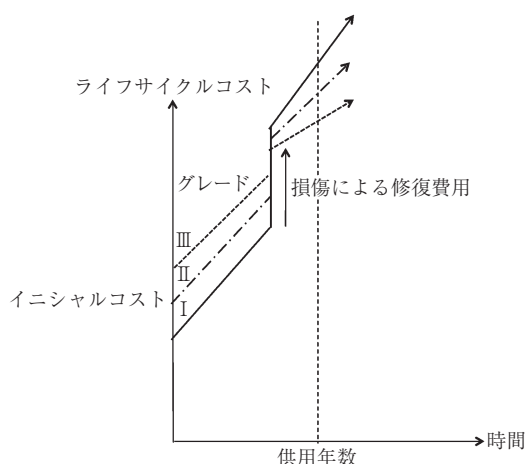


図-3 経済性の概念図¹⁾

高いためイニシャルコスト（初期建設費）の高いグレードの建築物を建設した方が、イニシャルコストが安いグレードの低い建物よりライフサイクルコストが安くなる場合がある例を示している。これは、グレードの高い建築物は、高い性能を有するように建築されるため、性能を維持するランニングコストを抑えられること、また大きな地震等の外乱を受けた場合も、損傷の程度が抑えられ、修復費用が低く抑えられることに起因している。

4. 長期性能に関する評価項目

長期性能設計における性能指標の設定について、供用年数との関係における具体的な性能を列挙することにより、長期性能の具体的な評価項目のイメージを捉える。

対象とする評価項目は部材ごとに異なるものであり、建築物の用途によっても異なるものと考えられる。表-1 に長期性能の具体的な評価項目を列挙するとともに、主な構造部位との関連性について示す。なお、本論では、

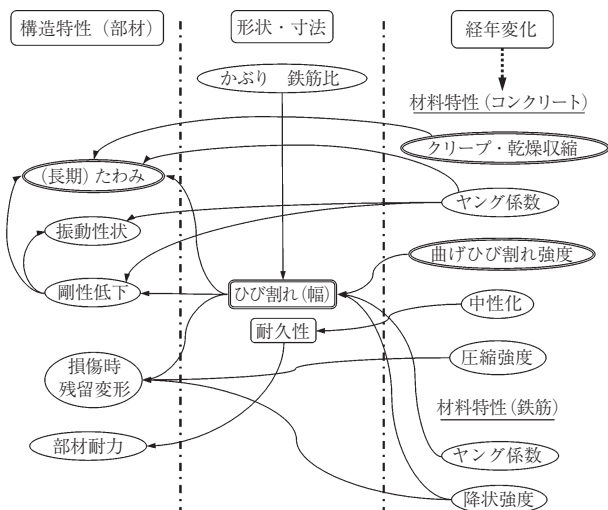
表-1 主な構造部位と評価項目の関連性¹⁾

部 位 評価項目			スラブ (主に常時荷重)		梁	柱	壁
			床	屋根			
材 料 特 性	コンクリート	クリープ 乾燥収縮			◎	○	○
			—	—	—	—	
		ヤング係数	○	—	○	○	○
			○	○	○	○	
		ひび割れ 強度	◎	◎	○	○	○
			○	○	◎	◎	
		圧縮強度	○	○	○	◎	◎
			○	◎	◎	◎	
	ひび割れ幅	◎	◎	○	○	○	
		○	—	○	—	○	
	中性化	○	○	○	○	○	
		—	—	—	—	—	
	鉄筋	ヤング係数	○	○	○	○	○
			—	—	—	—	
		降伏強度	◎	◎	◎	◎	◎
			◎	◎	◎	◎	
構 造 特 性	(長期) たわみ	◎	○	○	—	—	
		○	—	—	—		
	振動性状	◎	—	○	○	○	
		○	○	○	○		
	剛性低下	○	—	◎	○	○	
		◎	◎	◎	◎		
	損傷時残留変形	—	—	—	—	—	
		◎	◎	◎	◎		
部材耐力	○	—	○	○	○		
	◎	◎	◎	◎			
遮音性能			◎	—	—	—	○
					—	—	—

〔凡例〕◎：重要な評価項目

○：やや重要な評価項目

○：それほど重要ではない評価項目



* 矢印は影響を及ぼすことを示す。

* 2重線枠の項目は主に本小委員会では取り上げているもの。

図-4 構造特性に及ぼす主な材料特性の因果関係¹⁾

主構造に関する評価項目に限定しており、各項目に対するクライテリアについては言及しない。また、表中の◎は重要な評価項目であることを示している。長期供用期間においては、特に材料特性の経年変化（劣化）や地震荷重による損傷等が予測されるため、重要な評価項目として、剛性低下（劣化）や耐震性能（部材耐力）の低下が挙げられる。さらに、地震荷重による損傷のみならず、他の要因による損傷（劣化）を示す性能として残留変形も重要な項目として挙げられる。なお、火災によるスラブの損傷現象は、省略している。これらの評価項目を性能指標として採用することによって、長期性能設計が具現化できる。

図-4は構造物（部材）の各性状に及ぼす主な材料特性の相関関係（図中の矢印は影響を及ぼすことを示す）を示したものである。現状行われている常時荷重に対する設計では、クリープ・乾燥収縮、曲げひび割れ強度、(長期)たわみ等（図中2重線枠で示された項目）が課題となっている。この図によると、ひび割れ幅については、耐久性の観点からも材料特性と構造特性の中間に位置し、重要な項目であることがわかる。いずれにしても、各項目相互間には因果関係があるものの、長期性能設計における評価項目としては、構造特性に分類される項目がより定量化しやすいものと考えられる。

5. 今後の展望

本論では、性能設計の中に時間軸を取り入れた鉄筋コンクリート造建築物の長期性能設計を定義し、その目的と工学的意義、さらに実際の設計と関連づけた概念と評価項目を示した。ここでは、あくまでも定性的な表現にとどめているが、今後は材料工学と構造工学の協調に基づく、より具体的かつ定量的な設計手法の構築が期待される。

そのアプローチとして、鉄筋コンクリート構造物の真の性能を評価するために、要素・部材・構造レベルにお

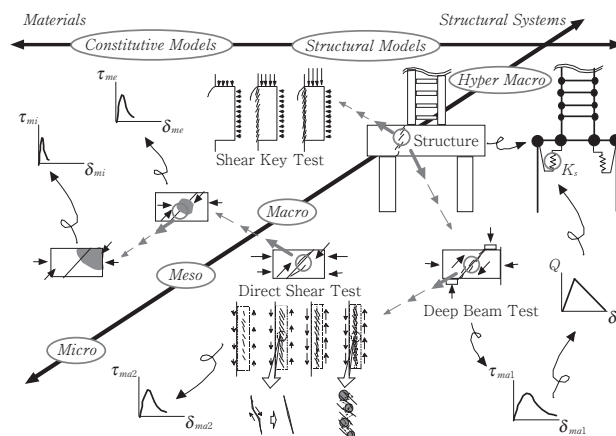


図-5 せん断破壊のモデル化レベル⁵⁾

ける様々な破壊形態を分類し、数値解析上で再現するためのデータとして蓄積していく必要がある。図-5はその一例として、せん断破壊のモデル化レベルを、材料構成モデルから構造解析モデルまでのモデル化軸と、ミクロからマクロ、その上の超マクロ（Hyper Macro）までのスケール軸を用いて、概念的に表現したものである⁵⁾。構造物のせん断モデルが部材モデル（ディープビームやシアークー）のせん断破壊、要素レベル（直接せん断）のせん断破壊、そして材料レベルでのせん断破壊とどのように関係付けるかは、重要な研究テーマである。そのためには図に示すように、どのレベルで、どの破壊領域に着目して観察しているかを明確にすることが重要なポイントになる。

最後に、現在筆者らも参画し、建築領域・土木領域の長期性能設計を主要テーマのひとつとしている「繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会」の活動を紹介する。ここでは、繊維補強セメント系複合材料を対象材料とし、材料設計と構造設計の要素を融合させることで構造物に付加価値を与え、さらに両者を融合（シームレス化）した合理的な設計法と新しい利用法を検討している。本委員会活動を通して、連続的な時間軸に対する性能評価をベースとした長期性能設計の実現を期待し、本論の結語とする。

参考文献

- 金子佳生・前田信之・山野辺宏治：長期性能設計の将来像，2009年度日本建築学会大会（東北），構造部門（RC造）パネルディスカッション「鉄筋コンクリート構造の常時荷重下の課題と長期性能」資料，pp.39～43，2009.8
- 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（1998改定），pp.106～118
- 金子佳生・三田 彰・三橋博三・金指成昭：鉄筋コンクリート造架構の層剛性と柱脚回転角を利用した損傷評価—有限要素法解析による損傷評価とその活用—，日本建築学会構造系論文集，第562号，pp.91～98，2002.12
- 建設省大臣官房技術調査室 監修，(社)建築研究振興協会 編：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト—仕様から性能へ—，pp.51～53，技報堂出版，2000
- 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のせん断破壊・変形特性の評価法における混合モード破壊の意義，委員会報告書，2005.8