

論文の内容の要旨

論文題目 建築物の構造性能のマルチプルな劣化リスクに対する
群論的アプローチと超長期的時間軸への展開

氏 名 三好 徹志

The Club of Romeが提起した成長の限界とこれに続く持続可能社会への移行が、我が国の建築物群に人類の経験しない超長期までの延命を求めており、全ての技術的思想に内在する抽象の適性に関し、新たに同時間軸で議論する必要を生じると共に、建築物の超長期供用の可否というプリミティブな課題が派生している。

建築物の耐用年数に関する我が国の研究は国際的かつ分野横断的に継続されてきたが、共通則を具体化する幾多の機会がありながら、単純観念の一般化を探究する過程で実構造物と関連付けるための抽象化を敬遠した結果、複数の評価方法が共存し、ユーザーに多くを託した状態にある。しかし、世代を超える修繕や改修等の意思決定の決定論的なモデル化は確かに非現実的であるが、現在の重厚な社会システムでは、建物所有者の選択肢が国・自治体の法規や学協会の指針類の管理下にあるため、建築物群単位で俯瞰すれば、個々の建物所有者の主観を確率論的に設定し、総体的な耐用年数を示すことは可能である。また、近年の計算機の能力の向上により、建築物群単位の膨大な部材・材料の性能の推移を解析することも、部分的な抽象を前提として技術的には可能である。耐用年数に関する研究は、市場と方法論が群単位に及ぶに至り、新しい局面を迎えている。

本研究は、建築物群の超長期に亘る更新過程の解析的考察から群単位の解析像を共有した上で、同解析で重要な社会的影響を示すRC造建築物を対象として選定し、コンクリートの劣化モデルへの材料学的アプローチ、気候変動を伴う環境モデルへの自然科学的

アプローチ、材料の劣化モデルを部材、建築物、建築物群単位に拡張する建築学的アプローチ、劣化現象を社会的影響と関連付ける総合科学的アプローチによって、経年劣化に関する研究のオントロジーを構築し、各階層で具体化するマルチプルなリスクの考察を通じて、100年を超える超長期的時間軸における耐用年数の概念を具体化することを目的とする。

なお、本論文は7章で構成され、各章の概要と得られた知見は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景、目的及び構成を示した。

第2章では、群単位の解析像の共有のため、フロー志向の建物所有者が占める建築物群が、行政の奨励でストック志向に移行する500年間の更新過程を、奨励条件の異なる複数のシナリオを与えて、ストック志向の比率、経年数の平均及び標準偏差によって、定量した。この際、建物所有者は、経験的、物理的、法的耐用年数を勘案した社会的耐用年数で更新し、ストック志向の建物所有者は、更新時に翻意した場合は耐用年数100年のRC造建築物に更新し、修繕時に翻意した場合は物理的耐用年数迄供用する基本則を与え、志向の推移は、集団の繰返し囚人のジレンマに学習機能を付与した間接的互惠関係に関するアルゴリズムである下方OFTを、建設用に修正して記述した。都内の市区町村から、フーリエ変換によって特徴的な建設投資の推移が認められた8市区町村を選択して試算を行い、上述の三指標が全国を模した建築物群から3~4割乖離する建築物群がある旨の結論を得て、建設業のCO₂排出量の対国内排出量比に照らし、更新履歴の社会的影響が有意であることを示した。また、超長期に亘り供用するRC造建築物が群の供用年数の平均や標準偏差に与える影響が大きい点から、既存の耐用年数評価手法の超長期への適性の検証が建築物群の更新プロセスとこれに付随する研究、延いては複数の社会的課題にとって重要である旨の主張を展開した。

第3章では、材料学的アプローチとして、国内の一般的な地域におけるコンクリートの劣化要因を整理した上で、第一に、丸山、野口らによるC₃S、C₂S、C₃A、C₄AFの水和反応率を横関らの毛細管空隙率に入力して得たセメントペースト部分の空隙率と、加藤らによるWall effectとブリーディングを考慮した遷移帯空隙量を容積比に基づいて統合して、コンクリート中の物質移動特性モデルを構築し、第二に、尾崎らの吸水・放湿過程の熱水分連成解析により、水の移動に関するデータベースを作成した上で拡散方程式に近似し、外皮に限り降雨の酸性三成分 (H₂SO₄, HNO₃, HCl) とセメント水和物の反応過程をモデリングして、容積変化が顕著なCaSO₄, Ca(OH)₂, SiO₂・nH₂O, CSHの増減を空隙率に反映し、第三に、CO₂, Ca(OH)₂, CSH, Cl⁻, AFmの反応型非定常拡散方程式を水の同式に統合し、コンクリートによる鉄筋の防食機能の経年劣化モデルとした。同モデルによって、コンクリートを屋外暴露した3例の中性化深さのトレース、最も解析と乖離した実験に関する製造段階の変動を考慮した追加解析を行い、本モデルの精度が日本建築学会の予測式と同等以上である旨と、特異値の再現のため確率論的手法が不可欠である旨を確認し、精緻化の限界と総体的な本法の優位性を示した。

第4章では、自然科学的アプローチとして、前章の劣化モデルに入力する外的要因を、RCPシナリオの適性の観点で精査した上、超長期に亘る熱・水・大気環境モデルを構築した。まず、外皮の熱環境は、RCPシナリオを考慮した相当外気温に依り、屋内は同シナリオを考慮した外気温への屋内外温度差の加算と、RC造建築物の高断熱性及び空調の法規に基づく調整に依った。水環境は、降雨が確認された時点で外皮に水膜が形成される仮定のもと、気象庁の1日、1時間、10分単位の観測値、環境省の山陰、太平洋側の酸性成分の観測値に関する解析から、酸性成分を考慮した1時間毎の気象庁観測値を1年単位で乱数によって得た。大気環境としての外気のCO₂濃度は、温室効果ガス資料センターのデータとRCPシナリオに依り、室内の濃度は、国内法規、ASHRAE換気規格、東日本大震災後の動向、白石の実測を参考に、外気の濃度を下限、国内法規と現在の大気中濃度の差分である600ppmを下限に加算した値を上限として、居室毎の濃度をその間で乱数によって得た。また、エアロゾルによる飛来塩分は、大屋らの飛来塩分量、風速及び風向の関係式を前章の劣化モデルに与え、一般環境では検討不要と判断した。その上で、つくば市の南面の雨掛かりの外皮の環境をモデル化し、打放しコンクリートの状態を200年間に亘って解析した結果、RCP8.5は外気中のCO₂濃度の履歴に即して、3次曲線状に推移する旨、シナリオ間の差が100年以降に拡大し、RCP8.5では有意になる旨を確認し、放物線則を補正したRCPシナリオ対応の中性化の簡易式を示した。

第5章では、建築学的アプローチとして、前章の劣化モデルを部材、建築物、建築物群単位に拡張した。まず、コンクリート表層の仕上材は、透過性が劣化する機構毎に①仕上材自体の劣化、②仕上材とCO₂の反応、③仕上材の剥離・剥落、④検討不要の四体系に大別してモデル化し、非定常反応型拡散方程式による検討を経て、前章の簡易式に統合する方法を示した。部材の特性は、壁の乾燥収縮、床の曲げによるひび割れを起点に等価付着消失領域の鉄筋の保護機能が失われる前提で、一般部とひび割れ発生部の鉄筋の腐食過程をモデル化した。建築物の基本計画は、対象を非住宅系に限定して、敷地面積、建蔽率、容積率の統計量に基づいて、スパン長と階高を統一したグリッドを配し、部材単位の解析結果の重みづけに供した。各部位の仕様の選定は、力学的安定性、視覚、耐久性、経済性に対する建物所有者の志向の選定確率を群のシナリオとして与え、意思決定の都度配点し、累積点により当該時点の志向を評価し、志向毎の基準で躯体・仕上材・修繕の仕様を採用するものとした。この際、世代交代時に配点をリセットし、ハードコアが徐々に成長する人間活動の時間軸も与えた。また、具体的な仕様は、群単位の考察に特化すればフォーサイトは不要と判断し、現在の標準的な仕様を与えた。以上の方法で推奨する志向の異なる3シナリオを設定し、RCP8.5に則した環境下の鉄筋の加速期到達率を群単位で解析した結果、同率の平均が修繕の有無によらず漸増し、シナリオに則した定性的相関を再現することを確認した。その上で、Spatialな定義のない本解析結果の個々の建築物とのフラクタル性から、修繕する一建築物の躯体の劣化リスクが漸増する可能性についても言及した。

第6章では、総合科学的アプローチとして、前章のモデルを社会的影響と関連付けるために、鉄筋の腐食モデルを日本建築防災協会の耐震診断の二次診断法に導入し、所定の地震を与えた際の被害の推移に変換した。地震動は、新築時の建築物群の地震による人的被害をシナリオとして設定し、行政の調査に基づいて、同シナリオを実現する構造耐震判定指標の統計量を逆算して得る、被害に基づく確率論的アプローチに依った。なお、鉄筋の腐食による物性の低下は、降伏点強度と付着強度を鉄筋の重量減少率の関数とし、同設定を入力するため、せん断終局強度のみトラス・アーチ理論に依った。新築時の被災で群内に1名の死者が発生する地震を与え、直近の出費や手間を抑制する経済志向の修繕シナリオに則して劣化する過程の人及び建築物の被害の統計量の推移を試算した結果、修繕の影響を可視化出来ることを確認し、群内の死者数、重傷者数が閾値に達した時点で、修繕の厳格化により更新に誘導する、群単位の間接的な耐用年数の概念を示した。更に、地震時被害だけでは、耐用年数から想起する建築物群の街たたみに至らない事実を照らし、本法の具体的な用途を確認するため、中性化確率、加速期到達率と構造耐震指標の対初期値比からなるマルチプルなリスクの指標を比較し、超長期では建築物単位の変状だけで棄却するのは不合理で、群単位で修繕周期や仕様の指針を定め、予算と人員を確保して、個々の建築物の都度の修繕を徹底した上、総合的に棄却を判断するのが望ましく、本法に示す解析的手法が有効であることを示した。

第7章では、本研究で得られた成果を章ごとに整理し、今後の課題と展望を記した。