予防修繕戦略を考慮した鉄道橋のライフサイクルコスト評価

京都大学工学部　学生会員　○大和田　慶
京都大学大学院　学生会員　織田澤　利守
京都大学大学院　フェロー　小林　潔司

1. はじめに

我が国では，鉄道橋を始めとする社会資本ストックの高齢化が進んでおり，維持更新需要の大幅な増大が予想されている．一方，今後社会資本整備の財源基盤が一層縮減することも予想される．社会資本の効率的なアセットマネジメントが必要である．これまでの社会基盤施設の維持管理では，損傷が顕在化したものに対して事後的に対策を行ってきた．事後的修繕だけではなく，予防的修繕を考慮した維持管理を行うことにより，効率的なマネジメントを達成できる可能性が示唆されている．本研究では，不確実な劣化過程を有する施設の維持修繕問題に関して，アセットマネジメントモデルを定式化し，期待ライフサイクルコストを最小化する最適修繕政策を決定する方法論を提案する．その上で，実際の鉄道橋を対象にしたケーススタディを通じて，予防修繕を実施することの有効性を検証する．さらに，対象鉄道橋が民間企業によって保有・管理される社会資本であることに着目し，課税が維持修繕政策に及ぼす影響について分析を行う．

2. 本研究の基本的な考え方

社会資本のライフサイクルの各段階において発生する費用の総現在価値をライフサイクルコスト（以下LCCと称す）と呼ぶ．アセットマネジメントにおいて，LCCは単なる費用そのものとしてではなく，マネジメント施策の経済評価のための統一的な管理指標としての機能を有する．アセットマネジメントでは，LCCが最小となるような維持修繕戦略を立案・施行することにより効率的なマネジメントが達成される．

社会基盤施設の維持修繕には，大別して予防修繕戦略と事後修繕戦略の２つの戦略がある．予防修繕は，損傷が軽微であり，施設の供用には支障がないが，将来はさらに損傷が進行する恐れがある時に実施される修繕と定義され，事後修繕は，損傷が発見され，その損傷が施設を供用するにあたって支障をもたらしている時に実施される修繕と定義される．社会基盤施設の維持管理においては，仮に対策を先送りしたとしても，施設における機能上の不具合がすぐには生じないため，管理主体が当期の支出を削減するために対策が先送りされ，結果的にLCCを増大させている．予防修繕を考慮した維持修繕戦略を実施することで，一層効率的なマネジメントが達成できる可能性がある．

鉄道施設のように，民間企業が管理・保有する社会資本のアセットマネジメントを実施するにあたっては，対策に要する支出について，税務会計上の処理方法の相違（資本的支出であるか修繕費であるか）によってもたらされる効果（課税効果）を考慮する必要である．本研究では，課税効果について次の３点を考えている．

１．資本的支出を行った場合の固定資産税の増加額

２．資本的支出を行った場合，資産増額分に関して毎年減価償却費が発生し，損金として計上できる額の増加に伴う法人所得税の減額

３．修繕費としての支出により，当期に損金に計上できる額の増加に伴う法人所得税の減額

3. アセットマネジメントモデル

不確実性下における既存施設の修繕問題を定式化する．施設の管理者は，初期時点$i = 0$から無限に続く離散時点$i(i = 1, 2, 3, \cdots)$上で発生する施設の維持修繕に関わるLCCを最小にするように修繕政策を決定する．施設の各部位の劣化状態はK個の離散的な状態変数$j(j = 1, 2, 3, \cdots, K)$で表され，$j$の値が大きくなるほど劣化が進行していることを意味している．施設の管理者は，離散的時点iにおいて施設の劣化状態を観測して，修繕の実施を決定する．

修繕政策$d \in \mathbf{D}$（$\mathbf{D}$は修繕政策の集合）は施設状態jが観測された場合にその時点で実施する修繕アクションを規定する．修繕政策$d \in \mathbf{D}$の下で実施される修繕アクションη^dを，修繕アクション実施後の劣化水準$\eta^d(j) \in \eta(j)$（$\eta(j)$は施設状態jに対して定義される修繕アクションの集合）を要素とする列ベクトルで定義する．

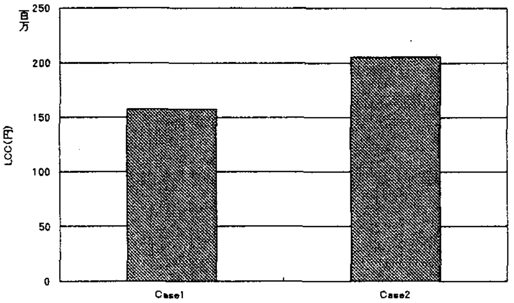
$\mathbf{S} = \{1, 2, \cdots, K\}$を離散的な$K(\geq 2)$個の状態で定義される状態空間とし，施設の劣化過程$\{h_i\}$は状態空間$\mathbf{S}$上で定義される斉時マルコフ連鎖に従うと仮定する．いま，時点iにおける劣化状態jから，時点$i+1$で劣化状態kに推移する確率を$Prob[k|j] = p_{jk}$と表すこととする．劣化状態の推移確率行列は

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_{KK} \end{pmatrix} \tag{1}$$

と表すことができる．状態Kは，修繕がない限りマルコフ連鎖における吸収状態となる．

次に，対象部位の修繕政策$d \in \mathbf{D}$を実施した場合の

Kei OWADA, Toshimori OTAZAWA, Kiyoshi KOBAYASHI



図－１ LCCの比較
（予防修繕を考慮した場合としない場合）

劣化状態の推移確率について定義をする．修繕政策dに基づくアクションの内容は劣化状態jに対して，$\eta^d(j)$と表される．今，劣化状態jの時に修繕政策dを適用した時，施設の劣化状態の推移確率行列$\mathbf{Q}^d$のjk要素q^d_{jk}は，

$$q^d_{jk} = \begin{cases} 1 & \eta^d(j) = k\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (j = 1, \cdots, K) \qquad (2)$$

と表すことができる．劣化状態がKである場合，直ちに修繕されるので，常に$q^d_{KK} = 0$となる．修繕政策dの下で，時点iに劣化状態が観測された時点から，対策工事を経て次の時点$i+1$に劣化状態が推移する確率を表す推移確率行列$\mathbf{P}^d$は次式で定義される．

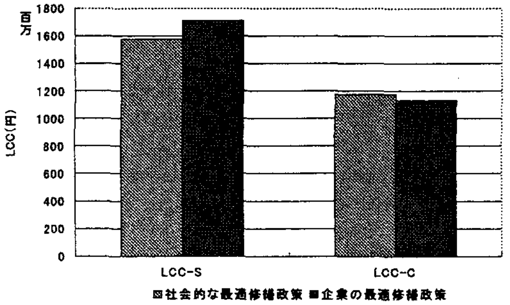
$$\mathbf{P}^d = \mathbf{Q}^d\mathbf{P} \qquad (3)$$

最適修繕モデルの定式化を行う．時点iにおいて，劣化状態jを観測したものとした上で，一期先の時点$i+1$を考えよう．時点$i+1$において施設の劣化状態kが観測され，時点$i+1$以降において最適マネジメント政策d^*を実施した時に生じる期待LCCの最小値を$\Psi(k)$と表すものとする．ここで，時点iにおいて修繕政策$d \in \mathbf{D}$を適用し，かつ時点$i+1$以降最適修繕政策を適用した場合を考えよう．この時，時点iにおいて劣化状態がjの時に生じる期待LCCは，

$$\Psi(j) = c^d(j) + \delta E^d_j[\Psi(k)] \qquad (4)$$

と表される．δは割引因子であり，$c^d(j)$は劣化状態がjであると時にマネジメント政策dが採用され，修繕アクション$\eta^d(j)$を行った時に生じる費用である．式(4)における$E^d_j[\Psi(k)]$は，時点iにおいて，劣化状態がjの場合に，マネジメント政策dのもとで，修繕アクション$\eta^d(j)$を適用することにより，時点$i+1$以降において発生する（時点$i+1$の当該期価値で換算した）期待LCCであり，$E^d_j[\Psi(k)] = \sum_{k=1}^{K} p^d_{jk}\Psi(k)$と表すことができる．時点$i$において発生する期待LCCの最小値を再帰的に定義すれば，

$$\Psi(j) = \min_{\eta^d \in \eta(j)} \{c^d(j) + \delta E^d_j[\Psi(k)]\} \qquad (5)$$
$$(j = 1, 2, \cdots, K)$$



図－２　LCC-SとLCC-Cの比較

となる．(5) は各劣化状態に対して定義される最小化問題であり，各劣化状態j毎に最適アクション$\eta^{d^*}(j)$を求める問題となっている．本研究では，最適修繕モデルの解法としてHowardの政策改良法を用い，最適修繕政策を導く．紙面の都合上，詳細は省略する．

4. ケーススタディ

本研究では，ある鉄道会社が所有する鋼鉄道橋（17部位）を対象としてケーススタディを行った．

（１）予防修繕戦略の経済効果

図-1は，予防修繕の実施を考慮した場合(Case1)と予防修繕の実施を考慮せずに事後修繕のみが実施可能な場合(Case2)のLCCを示す．Case1では，全17部位中8部位で予防修繕政策が実施されることにより，23.6%のLCC軽減が達成されることがわかった．

（２）課税制度のもたらす経済損失

社会的に最適な修繕政策をd_s，課税効果を考慮に入れた企業の最適修繕政策をd_cと呼ぶ．**図-2**は，d_sとd_cがそれぞれを実施された場合の社会的なLCC（以下LCC-Sと称す）と課税効果を考慮した企業のLCC（以下LCC-Cと称す）を算出したものである．分析の結果，課税効果により，企業は社会的に最適な修繕政策d_sではなくd_cを実施することがわかる．これにより，LCCの増大に伴う社会的な損失が発生する．

5. おわりに

本研究では，社会基盤施設の劣化過程に介在する不確実性を考慮した上で，最適修繕政策を求めるアセットマネジメントモデルを用いたLCC評価手法を提案した．その上で鉄道橋を対象としたケーススタディを通じて，予防修繕戦略の有効性について分析を行った．さらに，民間企業が保有する社会資本の維持修繕問題に着目し，課税効果を考慮した企業の維持修繕政策を導出し，その社会的な影響について分析した．