

# 農業水利施設の劣化状況の分析とライフサイクルコストを考慮した補修計画

- 国営造成農業用水路の一事例 -

蘭 嘉宜\*

## 目 次

緒 言 .....	141	LCCを考慮した補修計画 .....	145
劣化の状況と進行予測 .....	141	1 LCCの算定手法 .....	145
1 機能診断調査の内容.....	141	2 施設区分別の試算結果 .....	146
2 劣化予測手法 .....	142	結 言 .....	148
3 施設区分別の劣化の特徴 .....	143	参考文献 .....	148
		Summary .....	149

## 緒 言

全国で農業水利施設の整備が進み、支配面積100ha以上の基幹的な農業用排水路だけで延長45千kmに達している。新たな整備が進む一方で、早くに整備された施設においては老朽化が顕在化してきている。近年では、財政事情の逼迫と相まって、既存の施設を最大限活用すべく、適切な維持管理と長寿命化のための各種施策が進められつつある。すなわち、施設の将来の劣化状況を予測し、ライフサイクルコスト(LCC)を最小化させるような維持管理計画の策定が求められている。

この場合、まず、重要なことは農業水利施設の劣化状況を把握するとともに、将来の劣化の進行を精度よく予測することである。しかし、残念ながら、これまで農業水利施設の維持管理・劣化の状況等に関するデータは蓄積されてきていない。現在、農林水産省では、基幹的土地改良施設の点検・機能診断に関するデータベースの作成に向けて作業が進められている。

一方、LCCの最小化を図るため、予防保全対策の必要性が言われているものの、実際に農業水利施設について、予防保全対策の有効性が確認された事例は少ない。ここでは、ある国営農業水利事業で整備された農業水利施設の機能診断調査をもとに、劣化モデルを作成して劣化予測を行うとともに、補修工事費に着目したLCCの試算を行い、適切な補修工事計画の検討を行う。

## 劣化の状況と進行予測

### 1 機能診断調査の内容

分析の対象とした地区では、昭和40年代から50年代にかけて国営農業水利事業によって、農業水利施設が整備された。Fig.1に示すとおり、主要施設は頭首工1箇所(県営造成施設で国営事業により一部改修された)、幹線水路28kmであり、この施設により水田と畑地あわせて約400haに農業用水を供給している。幹線水路は、開水路、暗渠、パイプライン、トンネルで構成されている。施設整備から四半世紀が過ぎて、施設の老朽化と農業情勢の変化に対応して、施設改修と農業用水の再配分を目的とする国営二期事業が実施されている。

国営二期事業が開始されて、幹線水路の機能診断調査が実施された。この調査は、施設の現在の劣化状況を詳細に把握して、要改修箇所を特定し、詳細な工実施計画を作成することを目的としている。用水路1パレル

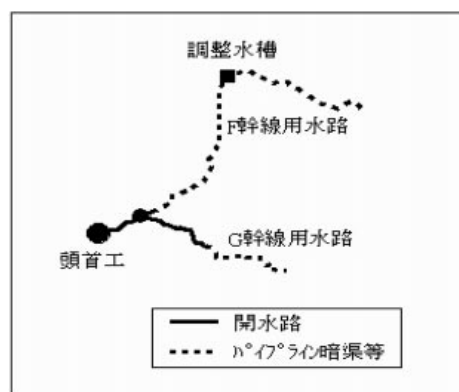


Fig.1 施設概要図  
Schematic diagram of facilities

\*農村計画部事業評価研究室

平成19年3月1日受理

キーワード: ライフサイクルコスト, マルコフ連鎖モデル, 劣化, 農業水利施設

(調査単位で、開水路、暗渠等では9m、パイプラインでは4m)ごとに、ひびわれ、変形、磨耗等の変状の状況と、漏水、湧水、目地や継手の状況が調査された。なお、ここでは、調査結果が得られたG幹線用水路全区間と、F幹線用水路上流部の一部区間のデータをもとに分析した。

劣化状況の評価について、項目と劣化レベル区分をTable 1に示す。劣化の項目としては、事業所で行った機能診断調査の分類を基本としたが、F幹線PC管と開水路、暗渠の水密性について若干の修正を加えた。

F幹線PC管では、これまで継手部の漏水事故が発生し、毎年のように補修が繰り返されてきた。このことが反映できるようレベルを修正した。即ち、既に補修された継ぎ手は劣化が著しかったところであり、現状の劣化レベルは補修済みのためCであるが、これをAレベルとした。また、Bレベルは継ぎ手間隔が施工管理値以上のものとした。

開水路、暗渠の目地については、機能診断調査では、湧水・漏水がないものをCレベルとしていたが、これで

は目地の劣化が反映されないもので、目地が劣化しているものをCレベル、劣化がないものをDレベルとした。

なお、変状と水密性の項目は複数の小項目から構成されている。どちらも、各項目のうち最も劣化が著しいレベルをそのパレルの劣化の代表値とした。

また、工種、路線、使用環境を勘案して、Table 2に示すとおり、施設を9区間に区分した。F幹線の変状と下流水密性のデータは入手できなかった。

2 劣化予測手法

Table 1の項目とレベル区分により調査データを整理した結果をTable 2に示す。施工年度の違い(4年以内)もあるものの、施設区分によって劣化状況に差があることが分かる。このような劣化状況は、施設の構造、周囲の環境等の違いを主たる要因として生じていると考えられる。しかし、同じ施設区分の中でも、パレルによって劣化の状況にバラツキが見られる。これらは、個々のパレルの構造の違い、材料の品質のバラツキ、施工状況の違いによる品質のバラツキ等によって生じていると考えられる。そこで同じ施設区分の中のパレルでも、これら品質のバラツキ等を要因として、劣化の進行が確率的に進むものと考えてモデル化を図る。

このような劣化進行モデルを作るために、マルコフ連鎖を使った。マルコフ連鎖モデルでは、使用環境・条件

Table 1 劣化評価項目とレベル区分  
Items of deterioration and classification

項目	小項目	劣化の程度	レベル
変状	ひびわれ	1mm以上または構造上不安定	A
		0.2mm 以上	B
		0.2mm 以下	C
	変形	構造的に不安定な変形あり	A
		変形あり、構造的には問題なし	B
		変形なし	C
剥離・剥落	剥離あり、鉄筋露出	A	
	剥離あり、錆汁あり	B	
	剥離・剥落なし	C	
水密性	湧水・漏水	湧水・漏水あり、骨材洗掘	A
		湧水・漏水あり、骨材露出	B
		湧水・漏水なし	C
	目地損傷	目地劣化、湧水・漏水顕著	A
目地劣化、湧水・漏水少		B	
目地劣化あり、湧水・漏水なし		C	
目地劣化なし		D	
水密性	継手損傷 (G幹線RC管)	継手に湧水・漏水あり、かつ継手間隔が施工管理値以上	A
		継手に湧水・漏水あり、または継手間隔が施工管理値以上	B
		継手間隔が施工管理値未満	C
	継手損傷 (F幹線PC管上流部)	漏水により補修	A
		継手間隔が施工管理値以上	B
		上記以外	C

Table 2 劣化レベル別パレル数  
Number of barrel classified

施設区分、劣化項目区分	パレル数(割合)				
	D	C	B	A	計
F幹線PC管上流部水密性	-	294 (53.2)	182 (33.0)	76 (13.8)	552
G幹線開水路変状	-	97 (38.5)	151 (59.9)	4 (1.6)	252
G幹線開水路水密性	131 (52.0)	116 (46.0)	5 (2.0)	0 (0.0)	252
G幹線暗渠変状	-	132 (74.6)	18 (10.2)	27 (15.2)	177
G幹線暗渠水密性	28 (15.8)	139 (78.5)	10 (5.7)	0 (0.0)	177
G幹線RC管サイホン変状	-	414 (71.0)	163 (28.0)	6 (1.0)	583
G幹線RC管サイホン水密性	-	478 (82.0)	94 (16.1)	11 (1.9)	583
G幹線トンネル変状	-	80 (54.4)	46 (31.3)	21 (14.3)	147
G幹線トンネル水密性	-	95 (64.6)	50 (34.0)	2 (1.4)	147

が同様の施設において劣化レベルがある分布でバラツキ、かつ時間の経過とともに劣化レベルごとに一定の遷移確率で劣化が進行する過程が表現できる。ここで用いた劣化進行モデルは式(1)で表される。

$$x_{i,k} = x_{i-1,k} \times \left(1 - \frac{p_{k,k+1}}{100}\right) + x_{i-1,k-1} \times \frac{p_{k-1,k}}{100} \quad (1)$$

ここで、

k: 劣化レベル (劣化の度合いは1<k<2・<k-1<kとする)

$x_{i,k}$ : 経過年 i年目における劣化レベルkの割合 (%)

$p_{k-1,k}$ : 劣化レベルk-1からkへの遷移確率 (%)

である。なお、施設建設直後は劣化していないため、

$$x_{0,1} = 100\% \text{ である。}$$

マルコフ連鎖を使った劣化予測手法は、新都市社会技術融合創造研究会インフラ試算評価・管理の最適化に関する研究プロジェクトチーム(2006)によるBridge Management Systemや小牟禮ら(2004)が開発した栈橋劣化進行モデル等に使用されている手法である。

Table 3 施設区分別遷移確率  
Transition probability of facilities 単位: %

	D	C	B	A
F 幹線 PC管上流部水密性			1.89	2.06
G 幹線開水路変状			2.69	0.133
G 幹線開水路水密性	1.85		0.22	0
G 幹線暗渠変状			0.84	6.01
G 幹線暗渠水密性	5.13		0.32	0
G 幹線 RC管サイホン変状			1.06	0.223
G 幹線 RC管サイホン水密性			0.62	0.701
G 幹線トンネル変状			1.83	2.23
G 幹線トンネル水密性			1.31	0.23

### 3 施設区分別の劣化の特徴

分析の結果得られた施設別の遷移確率をTable 3に示す。また、Fig.2~10にモデルによる50年間の劣化予測を示す。施設区分によって劣化の進行パターンに次のような違いが見られた。なお、ここでは、機能診断調査の時系列データが得られなかったために、遷移確率の妥当性は確認できなかった。

#### a F幹線PC管

直径1650~1200mmのPC管からなるクローズドタイプのパイプラインである。延長は16.3kmであり、調整水槽より上流部が約9.1km、調整水槽より下流部が約7.2kmである。需要主導の水管理がなされており、上流部においては、空気の流入、ウォーターハンマー等によって、継手部での漏水が発生し、補修が繰り返されてきた。Fig.2の劣化予測を見ると、他の施設区分の水密性の劣化に比べて、Aレベルの増加が早く、延長が長いことと相まって、これまでの維持管理費の増高の主たる要因となっている。

#### b G幹線開水路

B=1400mm~2100mm, H=1250mm~1450mmの鉄筋コンクリートフリームで、延長約2.5kmの開水路である。小さなひびわれ等は多く見られるが、著しい変状の劣化は少なく、一部にコンクリートの剥落、鉄筋露出等が見られる程度である。目地の損傷はあるが、止水板の働きにより漏水は生じていない。

Fig.3・4の劣化予測を見ると、他の施設区分と比較して、変状については、Bレベルの増加は早い、Aレベルの増加は遅い。水密性については、Cレベルの増加は早い、Bレベルの増加は遅い。止水板が効いており、これまでのところ、Aレベルまで進行しているレベルはない。

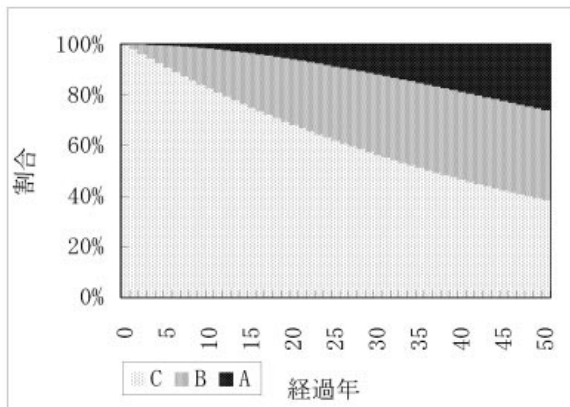


Fig.2 F幹線PC管水密性劣化予測

Deterioration prediction of F line PC pipes watertightness

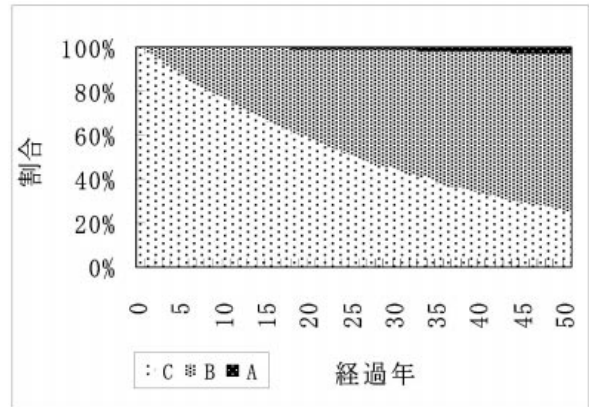


Fig.3 G幹線開水路変状劣化予測

Deterioration prediction of G line open channels deformation

c G幹線暗渠

B=1400mm~1650mm, H=1400mm~1650mmの鉄筋コンクリートボックスで、延長約1.6kmの暗渠である。ひびわれ、鉄筋露出が見られ、Aレベルに至っている部分も多い。開水路と比較して、劣化が進んでいる。目地については、開水路と同様に、損傷しているが、漏水は無い。

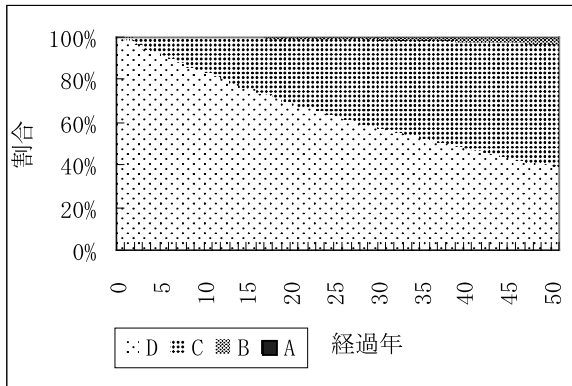


Fig.4 G幹線開水路水密性劣化予測

Deterioration prediction of G line open channels watertightness

Fig.5・6の劣化予測を見ると、変状については、Bレベルの増加は遅いが、BレベルからAレベルへの劣化進行が早いため、Aレベルの増加は早い。水密性については、開水路と同様であるが、Cレベルへの進行が若干早い。

d G幹線サイホン

直径1350~1200mmのRC管で、延長約2.3kmのサイホンである。不同沈下、草木根の進入等によって、欠損、剥離等の劣化があり、滞砂も生じている。また、継手部の開きも見られ、一部では漏水も見られる。

Fig.7・8の劣化予測を見ると、変状については、G幹線暗渠の変状と反対に、Bレベルの増加は早い、BレベルからAレベルへの進行は遅い。水密性については、F幹線と比較して、Bレベル、Aレベルへの進行とも遅い。

e G幹線トンネル

R750mmの鉄筋コンクリートトンネルで、延長約1.4kmである。ひびわれ、目地劣化等が多く見られる。

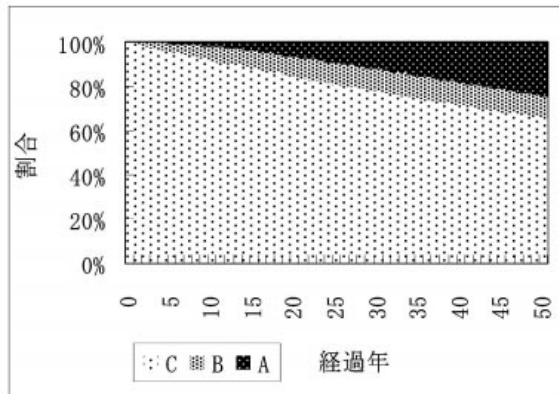


Fig.5 G幹線暗渠変状劣化予測

Deterioration prediction of G line box culverts deformation

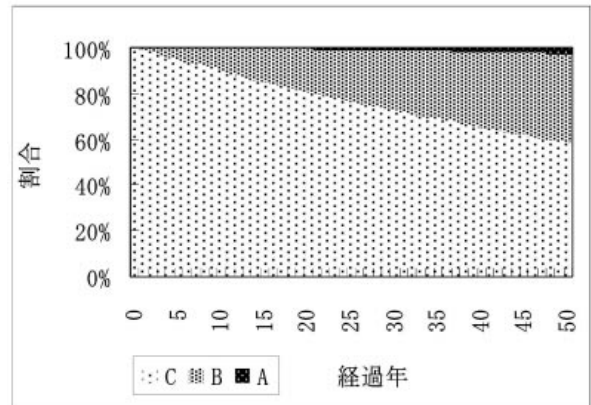


Fig.7 G幹線サイホン変状劣化予測

Deterioration prediction of G line RC pipes deformation

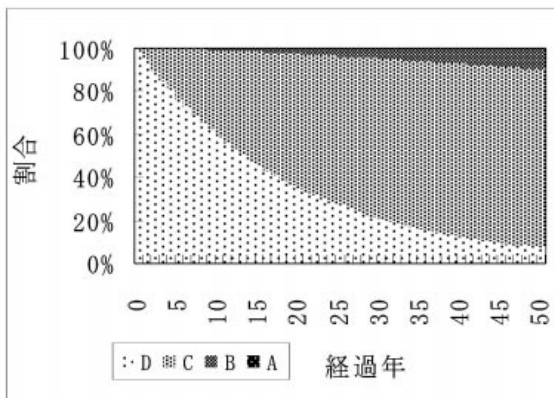


Fig.6 G幹線暗渠水密性劣化予測

Deterioration prediction of G line box culverts watertightness

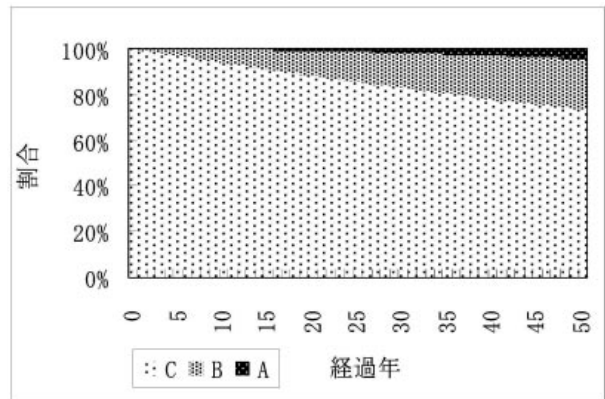


Fig.8 G幹線サイホン水密性劣化予測

Deterioration prediction of G line RC pipes watertightness

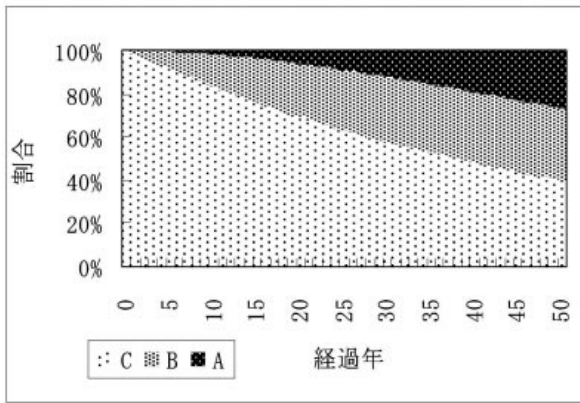


Fig.9 G幹線トンネル変状劣化予測  
Deterioration prediction of G line tunnels deformation

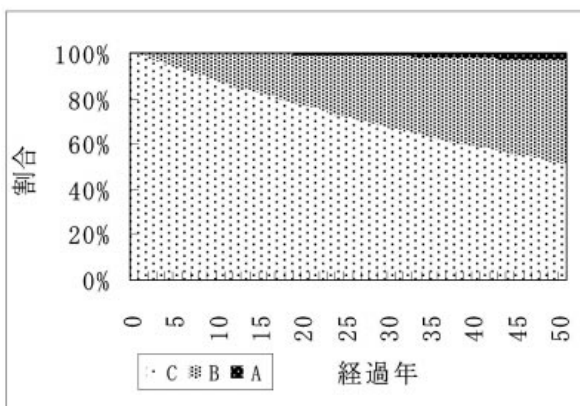


Fig.10 G幹線トンネル水密性劣化予測  
Deterioration prediction of G line tunnels watertightness

変状、水密性とも暗渠より劣化が進んでいる。

Fig.9・10の劣化予測を見ると、変状については、他の施設区分と比べて、Bレベル、Aレベルの増加とも早い。水密性については、開水路、暗渠と比べて劣化が早く、漏水が生じているAレベルのパレルもある。

### LCCを考慮した補修計画

#### 1 LCCの算定手法

施設区分によって劣化の進行パターンに差があったため、必要な補修工事の内容、実施の適期も異なってくる。機能診断調査で設定された劣化区分で、Aレベルは基本的に補修を要するレベルとして設定されているので、Aレベルまで劣化したパレルについては、該当するパレルの補修が必要である。しかし、劣化の進行パターンによっては、Aレベルまで劣化が進行していないうちに、Bレベルで補修を行う場合の方がコストが小さくなることも考えられる。そこで、劣化の進行パターンが異なる次の三つの施設区分について、補修費を含むLCCを試算して、最適な補修計画を検討する。

LCCとは本来、計画から建設、維持管理、廃棄までの一連の過程に要する全費用である。農業水利施設は農業

生産が放棄されない限り必要な施設であるので、ここでは廃棄費用は考慮しない。そして、LCCの検討期間は今後50年程度として2060年度とした。その理由は、事業計画作成時に使用されている社会的割引率4%の場合、50年後の費用は基準年の14%に換算され、それ以降は更に金額的影響が小さくなるためである。

維持管理費としては、土地改良区の人件費を含めた事務費、電気代等の施設の運転経費、点検経費、補修工事費がある。施設の劣化にともなって施設機能が低下し、維持管理費が増加することが考えられる。また、場合によっては、用水不足により損害が生じることもある。LCCは本来、便益は変わらないことを前提としているため、損害が生じる場合には、それを費用として適切に算定する必要がある。

対象施設を管理する土地改良区からの聞取りでは、湧水調整によって頭首工からの取水量が10~20%以上減った場合には、番水等の用水配分の変更、井戸等の補助水源の使用等の用水不足への対応が必要である。

パイプラインの漏水が生じて周囲に悪影響を及ぼし、直ちに補修工事を行ったケースあったが、その場合は2~3日通水を遮断した。

用水不足の場合、特に花卉栽培、ハウス等に影響が大きく、井戸等の補助水源が使われるところもある。

漏水等によって、補修工事費がかかるが、その他の維持管理費用が増加したり、損害が発生したりすることは、極めて希であり、その程度も小さい。

とのことであった。そこで、対象地区における、劣化に伴う維持管理費用の増として、補修工事費のみを考慮した。

対象施設の劣化予測モデルにより補修工事の必要なパレル数を予測して、施設区分、補修計画ごとに式(2)によりLCCを試算した。なお、ここでは補修工事以外の経常的な維持管理費は算定していないが、それは施設区分、補修計画ごとの比較を目的とするためである。

$$LCC = (IC \times f_i) + (UC \times R_i \times q \times f_i) \quad (2)$$

ここで、  
LCC：施設区分のLCC  
IC：施設区分の当初事業費（測量試験費等も含む）  
UC：補修工事単価  
 $R_i$ ：i年度の補修パレル数  
 $q$ ：1パレル当たり補修数量  
 $f_i$ ：2004年を基準年としたi年度のGDPデフレータまたは社会的割引率（事業計画作成時の割引率と同じ4%とする）による現価係数である。

補修計画の工事実施パターンは、次の2ケースとした。

補修計画 1：2004年度から、Aレベルのパレルを補修

する。

補修計画 2：2004年度から、Aレベルのバレルが発生したら、AレベルとBレベルのバレルを補修する。ここで、補修計画 1は事後保全型補修、補修計画 2は予防保全型補修を意味している。

試算に用いた補修工事の工法と単価、1バレル当たりの補修数量をTable 4に示す。1バレル当たりの補修数量は、事業所の機能診断調査の資料により設定した。なお、補修により回復するレベルと補修後の再劣化パターンは、補修工法によって異なると考えられるが、このデータが得られないため、ここではすべてC（またはD）レベルに回復し、かつ再劣化パターンも同じと仮定した。

2 施設区別の試算結果

a G幹線開水路の変状

補修による各劣化レベルの割合の推移を、補修計画 1の場合をFig.11に、補修計画 2の場合をFig.12に示す。

Table 4 補修工法等  
Repair working methods

施設区分	劣化レベル	補修工法	補修単価	補修数量
開水路変状	B	リフリート	12 千円/㎡	0.60 ㎡
	A	リフリート	12 千円/㎡	1.1 ㎡
暗渠変状	B	リフリート	12 千円/㎡	1.4 ㎡
	A	リフリート	12 千円/㎡	2.9 ㎡
トンネル	B	Uカットシーリング	65 百円/m	7.0 m
水密性	A	残留応力目地	17 千円/m	7.0 m

注)単価は直接工事費，経費率は1.7とした。

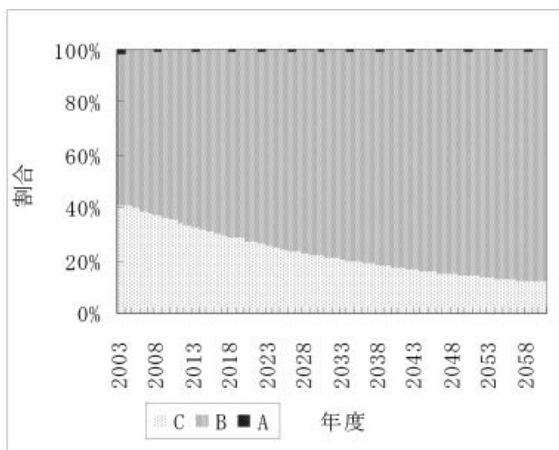


Fig.11 補修計画 1の劣化推移

Deterioration prediction of repair work case 1

また、両補修計画のLCC（当初事業費と補修費用の現価の累積値）の推移をFig.13に示す。補修計画 2では、Bレベルの補修数量が多いために、補修計画 1に比較してLCCが大きい。特に、初回の補修の2004年度の数量が大きい、2回目以上の金額差が小さくなるのは、数量の変化ではなく、社会的割引率によるものである。

b G幹線暗渠の変状

補修による各劣化レベルの割合の推移を、補修計画 1の場合をFig.14に、補修計画 2の場合をFig.15に示す。また、両パターンのLCC（当初事業費と補修費用の現価の累積値）の推移をFig.16に示す。初回の補修数量は補修計画 2が非常に大きいものの、2回目以降は、Bレベルへの劣化が遅いために、Bレベルの数量は多くない。このため、Fig.16に示すとおり、当初は補修計画 2のLCCが補修計画 1に比較して大きいのが、その差は次第に縮まり、2033年度に逆転して小さくなる。

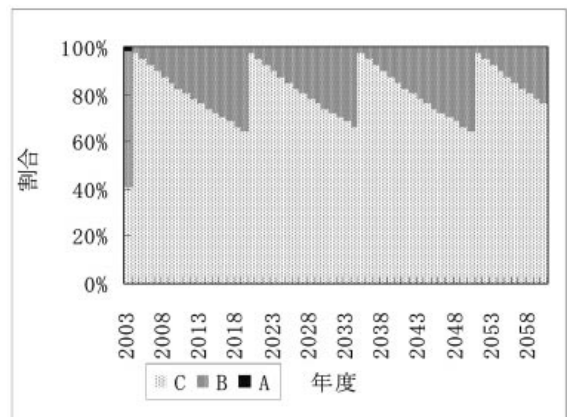


Fig.12 補修計画 2の劣化推移

Deterioration prediction of repair work case 2

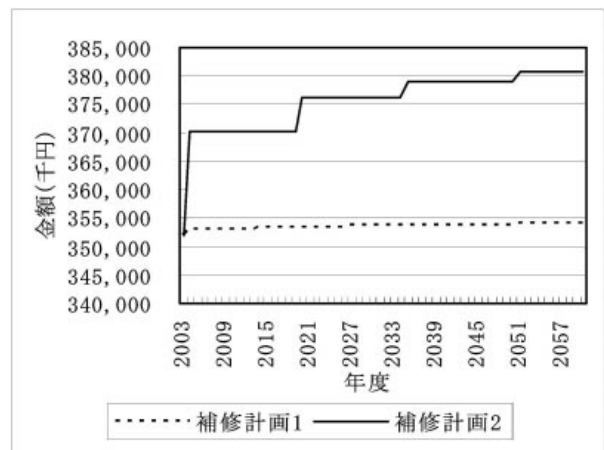


Fig.13 LCCの推移

Estimation of life cycle cost

c G幹線トンネルの水密性

補修による各劣化レベルの割合の推移を、補修計画1の場合をFig.17に、補修計画2の場合をFig.18に示す。また、両補修計画のLCCの推移をFig.19に示す。Bレベル

への進行は開水路変状と暗渠変状の間であり、BレベルからAレベルへの劣化は開水路変状と同じく遅い。この場合も補修計画2ではBレベルの補修数量が大きく、補修計画1と比べてLCCが大きい。

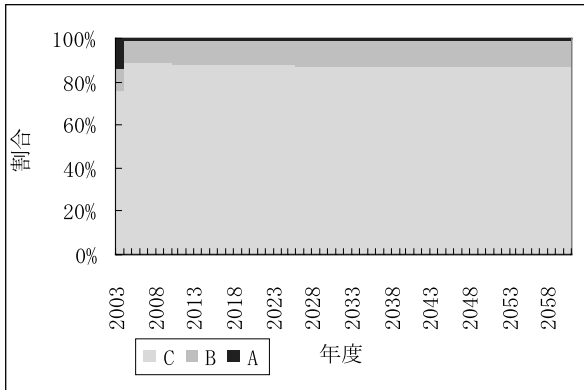


Fig.14 補修計画1の劣化推移  
Deterioration prediction of repair work case 1

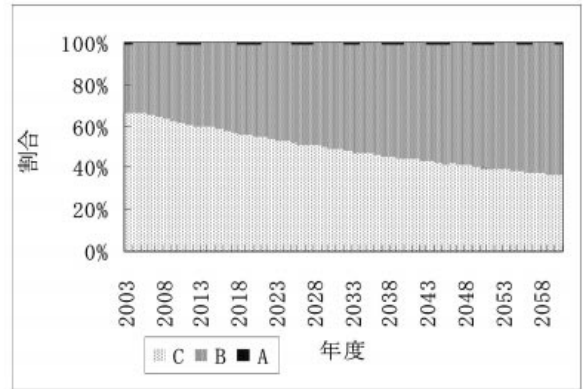


Fig.17 補修計画1の劣化推移  
Deterioration prediction of repair work case 1

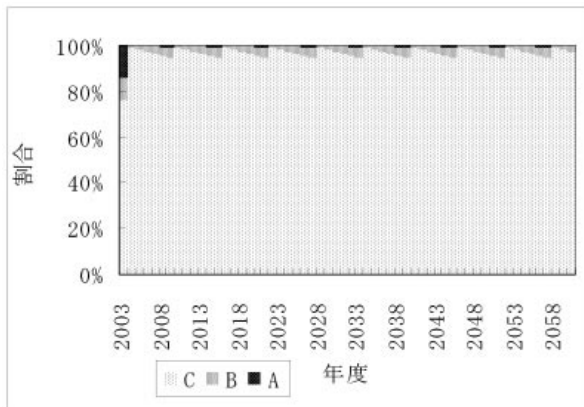


Fig.15 補修計画2の劣化推移  
Deterioration prediction of repair work case 2

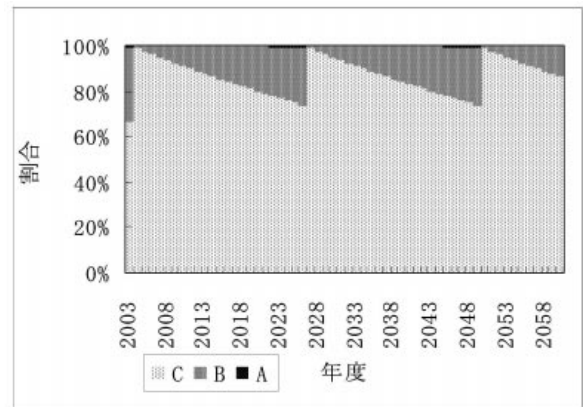


Fig.18 補修計画2の劣化推移  
Deterioration prediction of repair work case 2

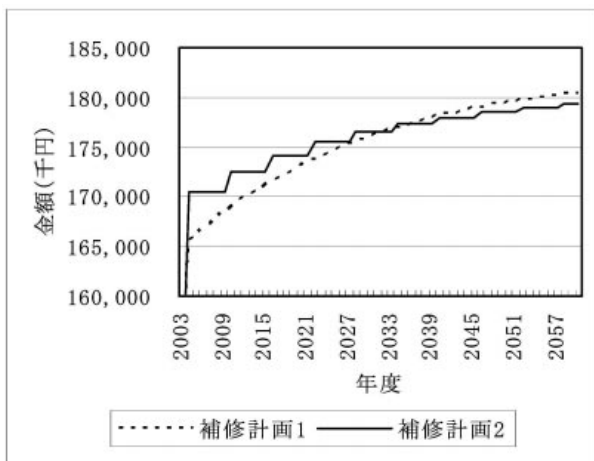


Fig.16 LCCの推移  
Estimation of life cycle cost

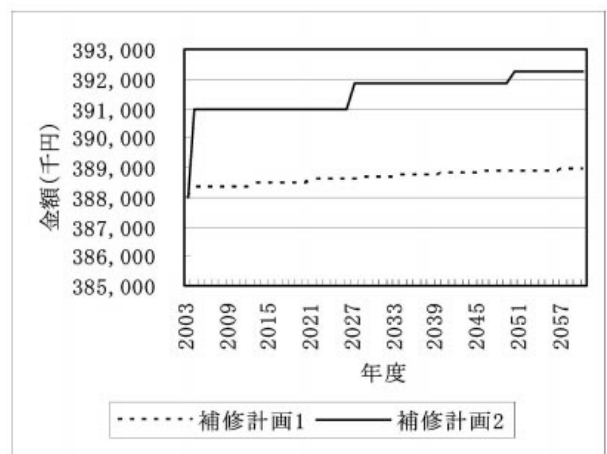


Fig.19 LCCの推移  
Estimation of life cycle cost

#### d 比較結果

劣化進行パターンの代表的な三ケースを比較した。開水路の変状とトンネルの水密性では、Aレベルに至った段階で補修を実施することが、LCCを小さくする結果となった。一方、暗渠ではBレベルのうちに補修する方がLCCを小さくする結果となった。これは、暗渠の変状の劣化進行パターンが、最初は劣化の進行が遅いものの、途中から急激に劣化が進むようなタイプであるためである。このように、劣化の進行パターンによっては、劣化の進行程度が軽いうちに予防保全的に補修する方が、長期的にはLCCを下げるケースがあることが分かった。

### 結 言

ある国営農業水利事業で造成された施設を対象として、施設の現在の劣化状況を把握し、改修計画の作成のために実施された、機能診断調査のデータを使って、劣化の進行状況を分析するとともに、マルコフ連鎖モデルを使った劣化予測モデルを作成した。その結果、施設構造や環境によって、劣化の進行に特徴が見られた。

また、そのモデルを使って、いくつかの施設区分について、事後保全的補修計画と予防保全的補修計画を取った場合の、各LCCを比較した。その結果、開水路の変状、トンネルの水密性については、事後保全的補修計画が経済性に勝るとの試算結果が得られた。一方、暗渠の変状に関する劣化については、長期的には、予防保全的補修計画が経済性に勝るとの試算結果を得た。これは、劣化の進行パターンが最初は進行が遅いものの、その後、早期に劣化が進むタイプであるためである。このことから、施設の劣化の進行パターンに応じて補修計画を作成することの必要性が確認できた。

この結果については、時系列データが得られないために、劣化進行モデルの遷移確率の妥当性のチェックができなかったが、農業水利施設について、予防保全的補修

の有効性が示唆された実際の事例として意味があると考ええる。なお、今後は時系列データの蓄積と分析によって、劣化進行パターンの予測事例を積み重ねていくことが重要である。

また、対象地区では劣化進行に伴う漏水等の機能低下により、補修費以外の維持管理費が増加することはなく、水量減による損害も認められなかったために、補修工事を考慮すればよかった。しかしながら、漏水に伴う損害の発生や、補修費以外の維持管理費の増を伴う場合には、これをコストとして考慮する必要があるので注意を要する。

### 参考文献

- 1) 土木学会建設マネジメント委員会アセットマネジメント研究小委員会 (2005): アセットマネジメント導入への挑戦, 日本能率協会
- 2) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会 (2004): 社会基盤メンテナンス工学, 東京大学出版会
- 3) 小林潔司・上田孝行 (2003): インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望, 土木学会論文集, 744 ( -61 ), 15-27
- 4) 小牟禮健一・濱田秀則・横田 弘・山路 徹 (2004): RC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリート工学論文集, 15 ( 1 ), 13-22
- 5) 日本プラントエンジニア協会小委員会 (1981): ライフサイクル・コストリング手法と実例, 日本能率協会
- 6) 新都市社会技術融合創造研究会インフラ資産評価・管理の最適化に関する研究プロジェクトチーム (2006): Bridge Management System
- 7) W.R.Hudson, Ralph Haas, Waheed Uddin (2001): Infrastructure Management



# Analysis of the Irrigation Facilities' deterioration and Repairing Plan Considering Life Cycle Cost

- A Case Study of the Irrigation System Constructed in a National Project -

ARARAGI Yoshinobu

## Summary

The purpose of this paper is to analyze the aged deterioration level of the irrigation facilities constructed in a national project, and to make a repairing plan considering life cycle cost. A deterioration process model is made using Markov process model. It indicates that deterioration process is influenced by the facilities' type and circumstances. Life cycle costs are estimated in 3 cases of the facilities' deterioration type and in two cases of repairing plan (corrective maintenance type and preventive maintenance type). Comparison the cases shows that it is necessary to make repairing plan considering deterioration process type, in order to minimize life cycle cost.

**Keywords** : life cycle cost , Markov process model, deterioration, irrigation facilities