

海岸保全施設の維持管理計画の改善のための課題

丹治肇* 桐博英* 中矢哲郎* 安瀬地一作*

*水理工学研究領域沿岸域水理担当

キーワード：LCC, 変状連鎖, パス, 費用対便益分析, 海岸保全施設の寿命

I 緒言

海岸保全施設については、既に、平成20年に「ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～」(農林水産省農村振興局他, 2008)(以下現行マニュアルと呼ぶ)が公開され海岸管理者の利用を促してきたところであるが、まだ、拡張の余地が大きい。このため、土木学会ではアセットマネジメント小委員会において、現行マニュアルの利用状況と問題点などが現地調査に基づいて調査され報告書(沿岸防災施設のアセットマネジメント研究小委員会, 2012)に取りまとめられた。筆者もこの小委員会のメンバーとして活動し、報告書作成にかかわった。筆者らは、既に、農業排水施設について、維持管理、費用対効果分析、性能設計は最終的には統合されるべき性質をもっていると主張してきた(丹治ら, 2013)。同様のことは海岸保全施設についてもあてはまると思われるが、これを整理した既往の文献はない。また、小委員会の調査の結果、現行マニュアルは、現場に応じた柔軟な運用がされていることがわかってきた。その原因については、明らかになっていない。恐らく、予算制約が大きな原因の一つであるが、それだけに限定できるかは不明である。また、現行マニュアルの1次点検項目は網羅的であって、実際の利用では、点検項目を絞込み、点検間隔を大きくとるなどの工夫がなされていた。この他に、逆に1次点検にない項目、工種を追加した沖縄県(2010)のような事例もある。このような状況を見ると、現状の維持管理点検作業の実態と現行マニュアルの偏差を説明するような仮説を提示し、それに基づいてマニュアルの内容と利用方法の改善方向を検討することを目的として、小論を作成することにした。

II 研究の方法

2.1 パスと変状連鎖の検討

海岸管理者が、点検項目を選別し、現行マニュアルを取捨選択する基準は、恐らく堤防の破壊経路(パス)または、堤防の劣化が破壊に至る連鎖過程(変状連鎖)を念頭に置いていると考える。現行マニュアルは変状連鎖図を示して

いるが、現実の破壊過程が、変状連鎖図に表されない場合には、現行マニュアルの取捨選択が起こっている可能性がある。事例を基にこの点を考察する。

2.2 統合手法の検討

丹治ら(2013)が排水機場で検討したような、性能設計、LCC、費用対効果分析を統合的に適用する技術的可能性を各手法の技術的な特徴を踏まえて検討する。

2.3 解析手法の補足

ストックマネジメントの現場では、施設寿命の推定方法について、統計手法の誤用の事例もある。ここでは、代表的な手法について、留意点を記載した。

2.4 維持管理計画の改善方向の検討

現行マニュアルの利用率の低い理由は、パスの問題を除けば、点検費用が大きな要因と思われる。費用問題を解決するには、予算措置により費用を増額すること、点検方法を変えて必要な費用を節減する方法がある。この点を、経営工学で使われるポジション図を使って考察する。

III パスと変状連鎖の検討

海岸堤防が規定の性能を満足しなくなり、破壊される原因には、複数のルートがあり、これは、パスと呼ばれている。海岸施設設計便覧では、パスは変状連鎖と呼ばれている。現行マニュアルも便覧(海岸施設設計便覧小委員会, 2000)から、Fig.1～4を引用している。Floodsiteでは、海岸堤防について、破壊にいたるパスについて詳細な分析があるが、これは、土構造物の緩傾斜堤防に、アスファルトフェーシングや草生被覆をしている場合が主で、我が国のように、コンクリート被覆護岸は少なく、参考にならない。しかし、パスの数は便覧より多く、現行マニュアル変状連鎖は網羅的なものではなく、見落とされているパスも多い。そこで、考えられるパスを示す。

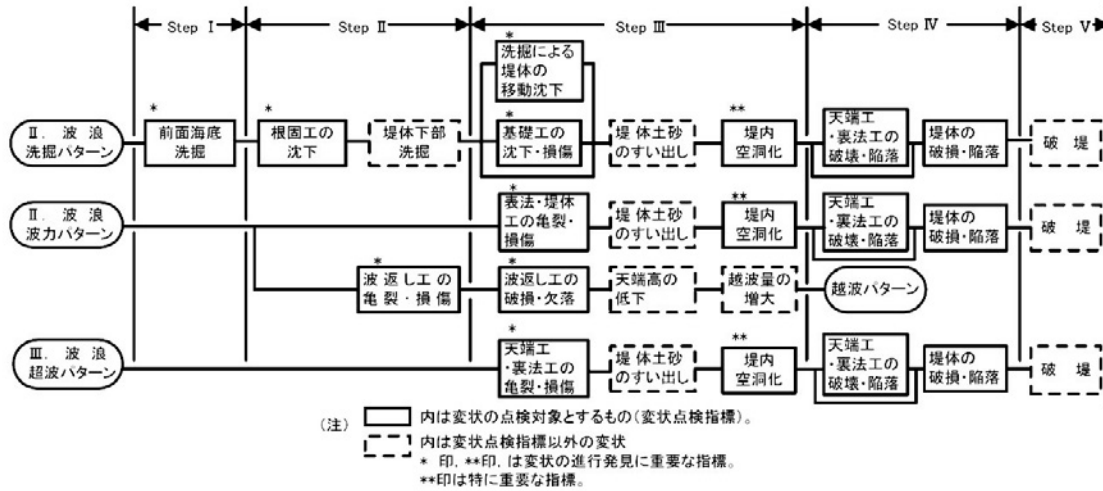


Fig.1 堤防（消波工なし）の主要変状連鎖
Main transition of degradation of coastal dykes without armor units

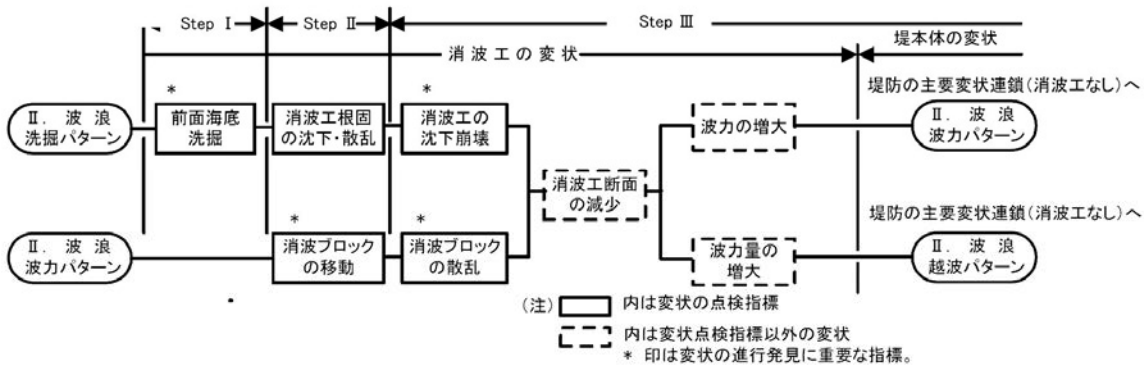


Fig.2 護岸・堤防（消波工被覆）の主要変状連鎖
Main transition of degradation of seawalls and coastal dykes with armor units

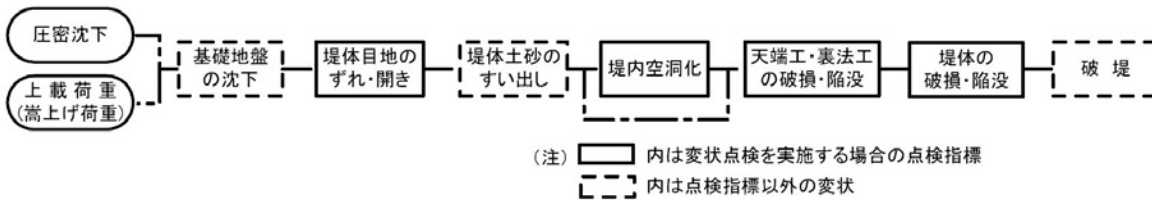


Fig.3 護岸・堤防の進行型変状連鎖
Progressive transition of degradation of seawalls and coastal dykes

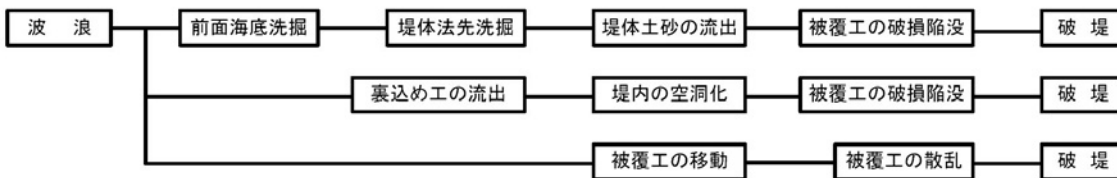


Fig.4 緩傾斜護岸の変状連鎖
Transition of degradation of gentle slope revetment

3.1 沈下

沈下は農地海岸に多い干拓地堤防の劣化の主な原因である。農地海岸である有明海周辺は有明粘土による沈下が著しい。その他、沿岸では東京湾、伊勢湾、大阪湾でも沈下が見られる。環境省(2010,2011)は平成23年の全国の地盤沈下地域をまとめているが、これには東日本大震災による沈下量が含まれているため、地震の影響のない平成22年をみると、最大の沈下は柳川市で年間2cmである。海岸堤防の沈下では、こうした広域の地盤沈下の他に堤防の自重による沈下、隣接する消波工の重量による沈下が加わるため、沈下量が年間10cm以上になることもある。沈下で堤防が破壊されることはないが、堤防高さが低下するので、所定の性能を満足できなくなる。また、不等沈下により、堤防スパンの継ぎ目の隙間が拡大して、海水が侵入することがある。これに対しては、事後保全で隙間を埋めて海水の侵入を防止する対策が取られている。Fig.5に類似の海岸堤防と樋門の継ぎ目の補修の例を示す。



Fig.5 海岸堤防と樋門の継ぎ目補修 (熊本県)
Repair of a gap between a coastal dyke and a base of sluices
by a filling plate (Kumamoto prefecture)

3.2 吸出しと空洞

2001年12月30日の明石市の大蔵海岸の事故以来、堤防の利用上の問題点として、吸出しと空洞の防止が堤防管理上の重要事項になっている。これは、防災性能ではなく、海岸利用の安全性の確保のためである。堤防からの吸出し(または、堤防からの砂等の噴出し)は、現象が干潮時に目視可能な場所で急激におこる場合には、目視による点検が可能である。そのような例外を除けば、吸出しの結果としての空洞の有無の点検が可能な安全対策になる。空洞の点検方法としては、堤防に予め検査孔を設けておくなどの方法も今後考えられる。既に建設済みのコンクリート堤防については、レーダー探査が必要な精度が得られる唯一の可能な方法である。ハンマーによる打音による判定は、打音の差が小さく、一般には困難である。



Fig.6 陥没の発生 (福井県)
Occurrence of a cave-in (Fukui prefecture)

また、空洞の発生を超えた大規模な吸出しが発生すれば、これは堤防の崩落の原因になる。

Fig.6は福井県の海岸堤防背後の道路の陥没である。このように陥没が目視で確認出来る状態になった時点では、内部の空洞がかなり成長している場合が多いので、地表に穴があく前に、レーダー探査などの点検方法で内部の空洞を見つけることが重要になる。

一方、吸出しによる空洞の発生と拡大は広い範囲でみられる。特に、Fig.7のような石積み堤防護岸は、吸い出しを生じやすく、陥没が発生しやすい。

3.3 コンクリートの劣化

これは現行の維持管理マニュアルで重点的に点検の対象となっている事項であるが、波力は圧縮応力であり、堤体の自重も大きく、次の事例に見るようにコンクリートの劣化が強度不足を引き起こし、堤防が崩落することは考えにくい。

高知県の菜生海岸事故では、まず、越波が発生し、その後、波がパラペット部にあたって、パラペットが飛散している。東日本大震災の津波でも、Fig.8のようにパラペットの飛散が広く見られた。沖縄県の海岸では、琉球政府時代に、琉球石灰岩を使った石積み堤防が建設された。琉球石灰岩はコンクリートではないが、一部にサンゴも含まれ、強度的には、コンクリートがもっとも劣化した状態に相当するともみなすことができる。沖縄県はリーフが発達しているため、堤防にかかる波力が本土より小さくなる利点がある点を割り引かなければならないが、堤防の破壊の状況を見ると、強度不足で、堤防が崩落する場合は、Fig.9のようにパラペットの崩落にとどまっている。これらから、パラペットについては、強度の確保が必要である。ただし、東日本大震災の津波被災から今後はパラペットを津波に耐えられるように設計するか、津波の弱点となるパラペットのない堤防を設計することが望まれる。



Fig.7 石積み海岸堤防の崩落（沖縄県）
Cave-ins on stone wall coastal dykes (Okinawa prefecture)



Fig.8 津波によるパラペットの飛散（岩手県）
Dispersion of parapet by a tsunami (Iwate prefecture)



Fig.9 パラペットの崩落（沖縄県）
Dispersion of parapet (Okinawa prefecture)

これを参考にすると、コンクリートの劣化で堤防が破壊されるパスには、コンクリートの強度不足で、堤防の一部（特にパラペット）が崩落するパスと、前述の吸出しを経て堤防が崩落するパスの2つがある。

3.4 高潮・高波

海岸堤防の災害に、防災機能が十分に発揮されない典型的な例として、高潮・高波における堤防の崩落がある。高潮・高波では、越波・越流がおり、流れが堤防裏に回り込んで、裏側から堤防が崩壊することが多い。前述のように堤防前面から、波力により堤防が破損する例もあるが、

事例は少ない。海水が堤防裏に回り込む経路には、この他に、沈下の項で述べた堤防のスパンの継ぎ目の隙間が拡大する場合がある。

Fig.10 は越流が起これ、堤防背後から堤防が破壊され、堤防が崩落した事例である。



Fig.10 越流による堤防背後からの崩落（福島県）
Collapse of coastal dykes by overflow from behind (Fukushima prefecture)



Fig.11 矢板護岸の破壊（石川県）
Collapse of embankment of sheet piles (Fukushima prefecture)

3.5 鋼矢板の錆

海岸堤防に鋼矢板を用いる場合には、錆による劣化が発生する。**Fig.11** は矢板の錆による劣化の事例である。栈橋の錆による劣化については、横田らによるマルコフチェーンを使った劣化予測の研究（横田ら,2003）があり、この手法が鋼矢板にも利用できる。

農林水産省仕様では、軽量鋼矢板を排水路や海岸堤防などの恒久施設にも使っているが、国土交通省仕様では、軽量鋼矢板の利用は仮設構造物に限定される。この点についての改善が望まれる。

3.6 コンクリート構造物の鉄筋の腐食劣化

堤防に鉄筋が使用され、鉄筋が塩水で腐食劣化した場合

には、鉄筋の腐食劣化、コンクリートの剥離が起こる。**Fig.12**は鉄筋の腐食劣化の事例である。



Fig.12 堤防の鉄筋の劣化（静岡県）
Degradation of reinforcement bars in banks
(Shizuoka prefecture)

3.7 パスと変状連鎖の関係

以上のように、被災事例からみれば、現行マニュアルの4枚の変状連鎖では表せない場合がある。特に、実際の被災では、変状連鎖のフェーズがきれいに現れることは少ない。例えば、鉄筋の劣化を4つの変状連鎖に適用することは困難である。以上の事例は、あくまで筆者らの限られた経験を元に論じたので、これ以外のパスも多数あると思われる。今後、パス事例を広く集めることで、変状連鎖の追加改訂が望ましい。

IV 統合手法の検討

4.1 LCCの拡張

海岸堤防の維持管理の目標のひとつに、LCCによるトータル費用の節減がある。LCCでは、建設する海岸保全施設を限定した上で、費用を次のように分ける。

$$\text{費用} = \text{初期費用} + \text{維持管理費用} + \text{撤去費用}$$

毎年の維持管理費用は、施設が老朽化するにつれて増加する。i年目の維持管理費用を $m(i)$ とすると建設後、1,2,...,i年目までの積算費用は次式になる。

$$\text{費用} = \text{初期費用} + \sum m(i) + \text{撤去費用}$$

海岸保全施設の所定の性能により実現される便益は、経年変化により性能が低下するので、i年目の便益を $B(i)$ で表す。

$$\text{便益} = \sum B(i)$$

ここで、便益が費用より大きい場合には、海岸保全施設を維持管理して利用することが合理的である。この条件は $\text{便益} > \text{費用}$

であるが、上式を代入すると、次式が得られる。

$$\sum B(i) > \text{初期費用} + \sum m(i) + \text{撤去費用}$$

ここで、右辺と左辺が近似的に等しくなる年数は、最も経済的な更新間隔になる。

4.1.1 便益比に対する補足

便益が経年変化により減少することの解釈としては、海岸保全施設の破壊確率が経年変化により、増加すると解釈することもできる。あるいは、沈下により海岸堤防が経年的に高さを減ずると考えることもできる。

4.1.2 過疎化に伴う補足

海岸堤防の受益地域の過疎化により、人口と資産が減少する場合は、便益の経年減少として評価することができる。また、逆に、受益地の人口と資産が経年的に増加する場合は、便益の経年増加として評価することができる。

4.1.3 海面上昇に関する補足

温暖化により海面が上昇する場合は、経年便益の変化として評価することができる。

4.1.4 財政制約に関する補足

LCC解析により、n年目が、最適な更新時期と判断されても、n年目には、更新のための建設費用が手元がない場合がある。このように単純なLCCは財政制約条件を考慮しないため、最適更新時期が現実的にならないこと（財政制約）がある。この問題に対しては、資金の借入れと割引率をLCCに組み入れることでより、現実に近づけた検討が可能である。

以上のようにLCCによる解析では、経年変化を考慮し、最適な更新時期を求めることが重要である。

4.2 費用対便益分析と拡張

市場供給されない財は、市場の失敗により、供給量が最適より過少になる。公共事業は、こうした公共的な財を供給する手段を与える。しかし、公共事業で供給される財は、市場による需要と供給の均衡という効率化の制約条件を受けないため、非効率で不必要な財が供給される政府の失敗の可能性を内包している。この政府の失敗を回避するために模擬的な代替市場を作成することで、効率性の評価と改善ができる。費用対便益分析はそのための手法である。費用対便益分析では、効率性の評価指標として、次のいずれかを用いる（農林水産省他、2004）。

$$\text{費用対便益比} = \text{便益} / \text{費用}$$

$$\text{費用対便益差} = \text{便益} - \text{費用}$$

LCCは費用対便益分析からみた場合には、便益を一定とした場合に費用を最小化する手法になる。これに対して、費用対便益分析では、双方をパラメータにとる。すなわち、費用対便益分析では、複数の事業案を比較し、費用対便益が最大の事業案を選択する。LCCは選択された事業案に対して、複数の維持管理案を比較し、最適な維持管理案によって、最適な更新時期を推定する。この点では、費用対便益分析がLCCを包含する関係にある。しかし、通常費用対便益分析では、複数の維持管理案が比較されることはまれであるので、費用対便益分析がLCCを包含するために、通常費用対便益分析に対して拡張をする必要がある。

4.3 性能設計法と拡張

性能設計法では、海岸保全施設の性能を確率分布関数として与える。

海岸保全施設の性能とは、防災施設の外力に対する抗力、堤防の高さ、越波の減少能力などが考えられる。海岸堤防が規定の性能を満たせなくなり、破壊される原因には、複数のパスが作用することを示した。性能評価項目は、堤防が破壊されるパスに対応していると考えられる方法が簡単である。

海岸保全施設では、ある外力を超えると性能が維持できなくなり崩壊する。例えば、高潮の潮位は堤防天端以下の場合には、崩壊は生じないが、これを超えれば崩壊する可能性が高くなる。海岸堤防が安定を保てない条件は次に示す。

崩壊条件 = (外力 > 抗力) の場合

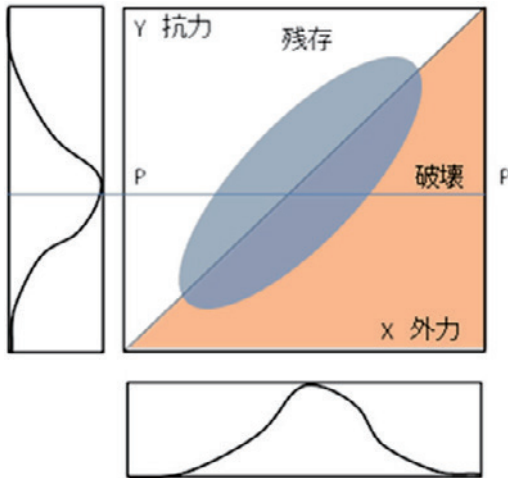


Fig.13 崩落条件
Collapse condition

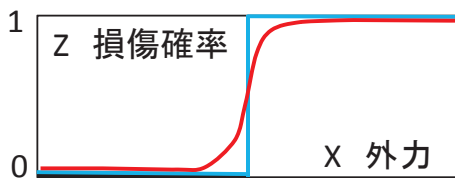


Fig.14 損傷関数
Damage function

この条件は、Fig.13 では右下のオレンジ色の三角形の部分になる。今、Fig.13 で崩壊確率が紙面に垂直な z 軸方向に示されている場合に、P-P 断面で切断した図が、Fig.14 の青い折れ線である。現実には、ここまで急激に、崩壊と安定が分かれることはないので、この図は不自然である。そこで、Fig.14 では青線を連続関数で置き換えたものも示してある。この赤線は損傷関数と呼ばれる。これから外力と、性能である抗力と、損傷関数が与えられれば、堤防が崩壊するか否かの判定ができ、寿命が推定できる。

4.4 維持管理点検と性能

ここで述べたすべての手法は、費用対便益分析を拡張することで統合化も可能である。また、各手法はあるパラメ

ータを一定として、最適値を求める手法になるので、数学的には局所最適解を求める計算になる。これに対して、費用対便益分析を拡張する方法は、大域的な最適解の導出になり、望ましい。ただし、費用対便益分析に統合化するためには、すべての操作変数は、最終的には費用または便益に変換される必要がある。

維持管理点検の直接的な調査項目は健全度であるので、維持管理点検を費用対便益分析の拡張に入れ込むためには、健全度を便益に変化する必要がある。

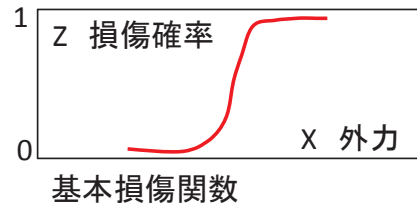
海岸保全施設の便益は、with-without で考えれば、次のように定式化される。

海岸保全施設の便益 = 海岸保全施設がある場合の便益 - 海岸保全施設がない場合の便益

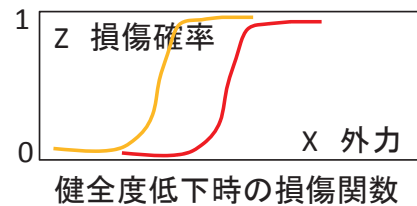
既に老朽化して、施設寿命を迎えている堤防のような海岸保全施設がある場合には、with-without は施設の更新を行うか否かになる。実際問題には、前者より本パターンが多いと思われる。この場合には、海外保全施設の便益は次式で与えられる。

海岸保全施設の便益 = 海岸保全施設が更新される場合の便益 - 海岸保全施設が更新されない場合の便益

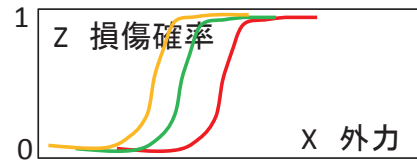
海岸保全施設では、防災施設を特定すれば、堤防等が崩壊しない確率は損傷関数で計算できることは既に述べた。次に、施設が劣化した場合や、適切に維持管理された場合の施設寿命の計算方法を示す。Fig.15 の上段は Fig.14 から、損傷関数だけを抜き出したものである。施設が老朽化して行くと、中段のオレンジの線のように、損傷関数が左にシフトする。適正な維持管理が、損傷関数を改善すれば、下段の緑の線のように、損傷関数が右にシフトする。これら



基本損傷関数



健全度低下時の損傷関数



健全度低下+維持管理時の損傷関数

Fig.15 劣化・維持管理と損傷関数
Degradation, maintenance and damage function

のシフト量のモデル化ができれば、性能劣化と維持管理を施設寿命予測に組み込める。

4.5 統合化の方向と標準偏差リスク

以上の3つの手法は、Fig.16のような包含関係にある。したがって、計算手順としては、Fig.16の箱単位でループを回せば統合化は可能である。統合化には、各手法の整合性が図れる理論的な長所があるが、実用的なプログラムを提供するまでには、今後多くの時間と労力が必要になる。このため費用対便益を考えながら統合化の検討を進めることになる。

この3つの手法のうち、性能設計では、変数を確率変数とみなして、分布を想定している。一方、LCCと費用対便益分析では、変数の確率分布を考えることは少ない。LCCにおいて変数の確率分布を検討した事例に赤石沢(2006)がある。費用対便益分析において確率分布を検討した事例にMechlarら(2008)がある。これらでは、Mrkovitzの標準分散モデルが使われている。このモデルは金融工学でも使われるもので、分散または標準偏差が大きくなると推定値が外れるリスクが大きくなることから、分散または標準偏差をリスクと呼び、リスクを最小化する方法を検討している。ここでは、防災のリスクとの混乱を避けるため、標準分散モデルにおけるリスクを標準偏差リスクと呼んで区別する。LCCと費用対便益分析においても、標準偏差リスクが大きくなると、推定の幅が広がってしまう。このことから、仮に予算制約があり、点検可能項目を絞り込まなければならない場合には、被害額・性能・寿命を左右する重要なパラメータのうち、調査前の標準偏差の期待値の大きなものから点検により、標準偏差を小さくしていく戦略が有効である。この条件にもっとも当てはまるパラメータは空洞の密度分布であると思われる。なお、ここでは確率計算が事前確率と事後確率を直接に扱うのでベイズ統計手法との相性が良くなる。



Fig.16 統合化の概要
Outline of integration

V 解析上の注意事項

維持管理の目的は、破壊パスに伴う性能と便益によって、重みづけられた健全度を、重要性に従って点検し、その寿命をできるだけ長く保つことと寿命の予測をすることである。寿命の予測は、次の2点で重要である。

第1に、LCCによる適切な更新時期を予測するために不可欠な条件になる。第2に、維持管理点検にかけられる資源（労力、時間、資金等）に制約がある場合には、すべての維持管理点検をおこなうことはできない。その際には、優先順位付けが必要になるが、これには、点検の1単位の資源当たり寿命の延長年数を重みに使うことが合理的である。このためには、維持管理点検においても寿命予測が重要になる。

いずれにしても、寿命予測関数（損傷関数のシフト量推定関数）の作成が、基本的な課題になる。そこで、ここでは解析方法について概観する。

5.1 マルコフ連鎖モデル

マルコフ連鎖モデルは、非線形性が簡単に表現できること、一旦モデルができれば、利用が容易な長所がある。一方欠点としては、健全度の劣化過程をマルコフ連鎖でモデル化する妥当性の検証と、モデルパラメータの妥当な同定方法の選出がある。この2つは、厳密性を考えるとモデルの利用に比べ困難である。しかし、工学的に考えれば、代替案がない場合には、第1次近似にマルコフ連鎖モデルを用いることは合理的である。逆に言えば、マルコフ連鎖モデルより、推定精度の高いモデルがある場合には、それを用いるべきである。

5.2 回帰モデル

回帰モデルはすべての統計モデルの中で、最も利用率の高いモデルである。一方では、最も誤った利用が多くなされているモデルでもある。回帰モデルの利用において留意すべき点は、回帰モデルの因果の変数選択を行う場合と、因果関係が既知である場合で大きく異なる。なお、回帰モデルでは説明変数として、時間（建設後の経過年数）以外のパラメータをとることが必要な場合もある。ただし、時間以外の説明変数を設定した場合には、LCCや寿命予測には説明変数を時間に変化させる必要がある。例えば、説明変数に通過した累加台風の数を取ることは因果関係としては、合理的であるが、その場合には、経過年数による性能劣化は台風の数と経過年数の変換を行う必要が出てくる。回帰モデルの場合には、因果関係に持ち込めれば、他モデルより優位になる。逆に言えば、説明変数に経過年を取った回帰モデルには、実際の原因である隠れ変数が残されている可能性が高く、誤用法である可能性が高い。

5.2.1 因果関係の推定

回帰モデルは、左辺の変数を目的変数（従属変数）、右辺の変数を説明変数（独立変数）として、説明変数で従属変数を予測する。

モデルの精度は、相関係数とP値で評価されるが、相関

係数が高いことは因果関係を意味しない。そこで、説明変数を原因、目的変数を結果に解釈できる条件が問題になる。古くは Hill の条件が使われてきたが、この条件では交絡条件を排除できない。現時点では、回帰モデルから因果モデルを作成する条件は、データサンプリングがランダム化され、交絡条件を考慮したモデル化を行う場合に限られる。詳しくは、Peal(2009)、星野(2009)、Angurist et al.(2009)を参照できる。現実問題として、海岸保全施設で回帰モデルから、因果関係を推定する変数の選択は難しい。この方法による因果モデルの作成は細心の注意と研究計画が必須である。

5.2.2 影響度合い

因果関係が事前にわかっている場合に、その影響の大きさを回帰モデルで推定する場合がある。この場合には回帰モデルを使うことは容易である。健全度は順序変数であることに注意すべきである。このため回帰モデルとしては一般化線形モデルを利用すべきである。因果関係が事前に分かっているとは、損傷過程が物理的または化学的に明示できる場合である。

5.3 生存時間解析

施設の寿命予測では、計測時点で、施設の寿命が終了していない海岸保全施設が、存在する。例えば、ある海岸堤防が建設されてから20年が経過して、ある堤防スパンが存している場合、スパンの寿命が20年以上であることは指摘できるが、そのスパンの最終的な寿命は不明になる。この時点で、既に寿命を終えた堤防スパンを集めて、平均寿命を推定することはできるが、その推定値は、全ての堤防スパンが寿命を迎えるまで観測して求めた平均値に比べれば、過小になってしまう。このように施設寿命を計測する上では、不完全データの存在は不可欠になる。このような不完全データに対して、施設の寿命を推定する手法に、生存時間解析がある。生存時間解析は、説明変数に相当するy軸に経過時間を取り、経過時間ごとの生存率を推定する。この方法の長所は生存確率を考えることで不完全データに対応した解析方法を提供する点にある。

VI 維持管理計画手法の検討の方向

III章で述べたように、理論的には、費用対便益分析を拡張して全ての手法を統合化することは、技術的には可能と思われる。また、この方向では、局所最適化問題が回避されるので、理論的な長所は明確である。しかしながら、現実の海岸堤防の維持管理では現行マニュアルの実用化に課題を残している。そこで、ここでは、「どのようにすれば、利用が拡大するか」あるいは「現実的に運用できる手法にはどのようなものがあるか」を考える。

6.1 各種法の特徴

現在使われている各種手法を、対象が部分：全体、計算が詳細：概算の2軸で Fig.17 にポジショニングした。この

図の第1、第3象限は、対象と費用の積が同じオーダーになり、安からず、高からずになる。一方、第2象限は過剰費用で実現性は低い。第4象限は、費用は安いが中身も少ない。実現可能な手法は、この図でいえば、第1、第3象限に表されなければならない。現在使われている費用対便益分析は、正確さより簡便さ（低価格）を重視している。費用対便益分析内容を細分化し、LCCを取り入れて、時間軸方向の検討を行うと、おそらく、検討が詳細になるので、費用対便益分析のポジショニングは第2象限に移動してしまい、使われることはなくなる。費用対効果分析の詳細か、時間軸報告の検討の追加は理論的には望ましいが、現実には、解析費用が低下した分を使って、徐々に拡張されるステップを踏むことになるとと思われる。

LCCは費用対便益分析に比べれば詳細な手法である。海岸堤防で現在点検されている主な項目は、コンクリートのひび割れ、亀裂、スパン間の隙間など限定された部分を対象にしている。現行マニュアルでは、全ての堤防スパンについて、詳細な原簿を作成し、変状について、追跡調査を求めているが、実際の管理の点検項目は限定されている。

設計は、従来は比較的簡単なものであった。最近では、性能設計を行うことが求められている。しかし、性能設計は潮位、波浪などの一部のパラメータにとどまり、多くの部分では従来設計法が使われている。

以上のように、実現可能な主張は、第1、3象限にポジショニングしている。

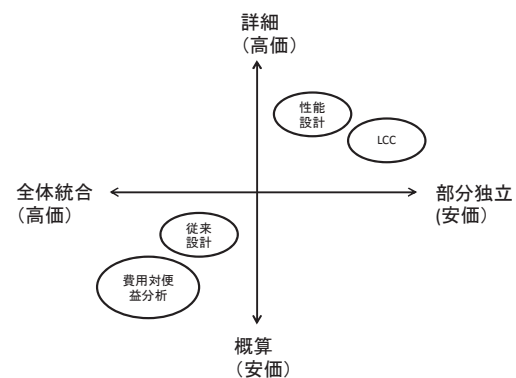


Fig.17 各種手法のポジショニング

Positioning of various methods

6.2 道路のLCCとの比較

LCCは舗装道路で多用されている。そこで道路との比較を試みる。まず、舗装道路では、健全度は道路の舗装厚が重要であり、修復は、舗装厚さを回復することが主眼になる。また、舗装厚さの減少原因は通過交通による摩耗である。このため交通量と車種（車重）を予測することで、舗装厚さの減少速度を予測するモデルが作られ、実用に供されている。これは、海岸堤防と比較すれば、摩耗による舗装厚の減少という特定のパスが卓越している。逆に言えば、海岸堤防のようにパスが複数あり、卓越したパスが見いだせない場合には、LCCは難しくなる。そこで、パスの数と点検の密度で、道路と海岸の転換のポジショニングを

Fig.18 に作成してみた。この図ではパスが少ないほど、点検密度が少ないほど安価になる。つまり、左上の第2象限が高価で、右下の第4象限が安価になる。第1、第3象限は程々の費用になる。

道路の場合には構造物が単純で、種類が少ないので、サンプル調査をしやすい。一方、海岸保全施設は、堤防だけでも形状、素材、構造が多様であり、間引いてサンプル調査を行っても調査ポイントを減らすことが困難である。現行マニュアルも、調査地点数を減らすことによるコストダウンは意識されており、点検を1次点検と2次点検に分けて行うことで、コストダウンを図っている。しかし、これは道路でも行われている手法である。海岸保全では、パスが多くなりがちなので、コストダウンのためには、更に、パスの絞込みをおこなうことが必要であると考ええる。

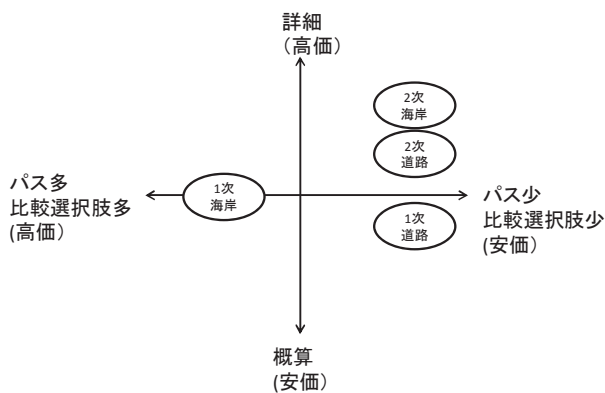


Fig.18 道路と海岸保全施設の点検のポジショニング
Positioning of road and coastal disaster prevention facilities

6.3 維持管理の現状の分析

現時点で、海岸堤防の維持管理点検が現行マニュアルに従って実施されない原因をポジショニングを使って考察する。

Fig.19 に現行マニュアルが想定しているポジショニングと実際に行われているポジショニングを示す。

現行マニュアルでは、まず1次点検では、考えられる点検項目を網羅的に列挙して落ちがないように心がけている。これに対して、まず、目視で、1次点検を行い、問題のある項目・地点を2次点検に送る。現実には、農地海岸では1次点検は行われているものの、Fig.19 に書いたように、現行マニュアルよりも簡略化されている。ここでは、枠なしが現行マニュアル、枠付きが実際に行われている点検である。その原因は、第1に、現行マニュアルがあまりに詳細なため現在の海岸管理者の労力と予算措置では現行マニュアル通りの点検が難しいことが挙げられる。第2に、地区ごとに重要なパスが異なるか、何が重要かを認識しているため、パスの選択が行われている。

例えば、佐賀、福岡、熊本などの有明海、八代海沿岸の干拓地堤防では、計画堤防高さ7.5mに対して、既に、沈下により、堤防高さが、これより低い地域も多い。この場合には、コンクリートのひび割れの補修よりも堤防高さの回

復が重要であるが、これは、維持管理時の補修レベルでは対応できない。仮に、コンクリートの強度が低下しても、有明海では、津波は想定していないし、海が浅いので、高知県の菜生で発生したような波浪によるパラペットの破壊の確率は低い。一方、沈下により堤防のスパンの間の隙間が拡大しやすい。実際に、Fig.9のように隙間を充填している例も多い。このため震度4以上の地震時の堤防の点検は重要であり、欠かさず行われている。

一方、石川県の七尾湾では、干拓地は一部で、仮に、堤防が崩壊しても高台の多い背後地では浸水するところはほとんどない。このため地震後の堤防の点検についても、有明海沿岸ほどの切迫感はない。

このように大きな被害を生じない範囲で、1次点検（目視点検）のパスを絞りこむ操作は、堤防建設が集中した伊勢湾台風直後から過去60年のノウハウとして、海岸管理者に織り込まれている。

これらから、Fig.20のように現行マニュアルの1次点検は絞込みを行うことができると考える。ただし、現行マニュアルの点検が、海岸保全施設の延命とトータルコストの縮小を目指しているのに対して、海岸管理者の経験的な絞込みは最小の1次点検費用で、とりえず重大事故を未然に防ぐことに重点が行われていると考えられる。このため、トータルコストダウンに繋がる項目については、1次点検費用を補助し、現行マニュアルほどではないにしても調査項目を確保すべきである。

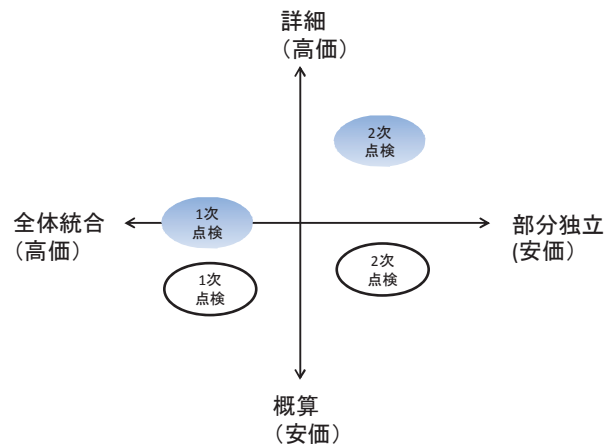


Fig.19 海岸保全施設の維持管理のポジショニング
Positioning of maintenance of coastal disaster prevention facilities

石川県や熊本県の過去のヒアリング事例では、2次点検については、1次点検でリストアップされたものについては、各海岸管理者は点検を希望していた。ただし、予算手当てがない場合には、2次点検はできない。また、1次点検が不十分な場合には、1次点検の対象漏れで本来は2次点検候補にリストアップされるべき個所が、リストに上がらなくなるのが想定される。

6.4 維持管理の改善案の検討

維持管理点検が適切になされる条件には、財政的、技術的な合理性が必要である。

1) 建設時にしか財政補助が配慮されなかった結果、LCCが最小でない維持管理が行われてきたと考えられる。具体的に言えば、財政的に点検と補修ができずに、破壊した場合に修理する事後修復対応である。建設と維持管理に対する財政措置の非対称性が解消されれば、この問題は解決可能と思われる。

2) 点検の内容で、標準偏差リスクを減少できるレーダー探査のような手法は、リスク管理の面からも有効である。

3) 理論的には、LCC、費用対便益分析、性能設計は統合化が可能である。ただし、これを実施するには、費用の制約があるので、局所最適化を避けるために技術的に有効な統合化も、各種法にかかる費用のコストダウンを見ながら順次進めていく必要がある。

4) 現時点では、全体を大まかに評価する方法と部分を精密に点検評価する方法を組み合わせることが現実的である。費用が増大する要因は、破壊パスの多様性、海岸保全施設の多様性に原因がある。これらについて、評価パスを減少させ、評価箇所を制限することで費用を抑え、実施可能な維持管理計画が作成可能と考える。

5) 2次点検ではレーダー探査による空洞の探索が最も費用を要する調査になる。この調査も、財政支援は必要であるが、費用がかかることから、それだけでは、早急にすべての海岸堤防の調査を短期間に終了することは困難であろう。海岸保全施設の性能において、恐らく海岸の利用に関する性能が問題になる事項は、空洞が主体と思われる。この場合には、点検の終わっていない堤防については利用を抑制する方法も検討すべきである。

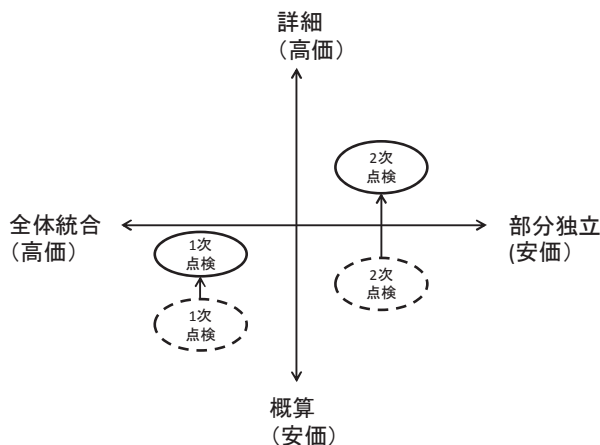


Fig.20 海岸保全施設の維持管理のポジショニングの改善案
Proposal on improvement of positioning of maintenance of coastal disaster prevention facilities

Ⅶ 結論

海岸保全事業の維持管理点検を対象にそのマニュアルの

実用性を図るために維持管理点検手法の実用化の方向を検討した。

1) 現行マニュアルで維持管理点検と健全度が寿命に変換される過程である変状連鎖とパスについて検討した。

2) LCC と関連する性能設計、費用対便益分析の関係について考察した。

3) 寿命予測手法について比較検討を行った。

4) 現在の海岸保全施設の維持管理点検の現状と現行マニュアルの期待している維持管理点検のギャップについて、費用に関連したポジション図を使って検討した。さらに、このギャップを解消する方法を提案した。

以上の検討から、今後、点検費用のレベルとパスを配慮した維持管理点検方法の改善を行うことが推奨できる。

参考文献

- 赤石 総光(2006):リスクマネジメント手法を利用した土木構造物の LCC 評価の応用技術に関する研究,早稲田大学理工学部, 学位論文, 190p.
- Angurist, J.D. and Pischke J.S.(2009): Mostly harmless economics: An engineer's computation, Princeton University Press, 392p.
- 海岸工学委員会.海岸施設設計便覧小委員会(2000):海岸施設設計便覧, 2000 年版,土木学会, 582p.
- 海洋開発委員会・沿岸防災施設のアセットマネジメント研究小委員会(2012):「沿岸防災施設のアセットマネジメントに関する現状と展望 成果報告書」, 土木学会
- 環境省(2011):平成22年度全国の地盤沈下地域の概況,平成23年12月, <http://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo22.pdf>
- 環境省(2012):平成23年度全国の地盤沈下地域の概況,平成24年12月, <http://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo23.pdf>
- Mechler, R. and The Risk to Resilience Study Team, (2008): The Cost-Benefit Analysis Methodology, From Risk to Resilience Working Paper No. 1, eds. Moench, M., Caspari, E. & A. Pokhrel, ISET, ISET-Nepal and ProVention, Kathmandu, Nepal, 32 pp.
- 農林水産省農村振興局,農林水産省水産庁,国土交通省河川局,国土交通省港湾局(2004):海岸事業の費用便益分析指針(改訂版)平成16年6月,103p.
- 農林水産省農村振興局防災課,農林水産省水産庁防災漁村課,国土交通省河川局海岸室,国土交通省港湾局海岸・防災課(2008):ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～,平成20年2月,105p.
- 沖縄県(2010):琉球政府護岸のライフサイクルマネジメントのための老朽化調査及び老朽化対策計画策定マニュアル(案),平成22年3月,230p.
- Pearl,J(2009): Causality – Models, reasoning, and inference, 2nd Ed. Cambridge University Press, 484p.
- 丹治肇, 桐博英, 中矢哲郎(2013):排水計画における水理機能の信頼性設計法の概念について, 農村工学研究技報,214,89-100
- 星野崇宏(2009):調査観察データの統計科学, 岩波書店, 245p.
- 横田弘, 岩波光保, 関根好幸(2003):海岸保全施設の老朽化実態と

その進行モデルの構築，海岸工学論文集，50，911-195，土木学会

受理年月日 平成25年11月05日

Problems on Improvement of Maintenance Plan of Coastal Disaster Prevention Facilities

TANJI Hajime*, KIRI Hirohide*, NAKAYA Tetsuo* and AZECHI Issaku*

Hydraulic Engineering Research Division, National Institute for Rural Engineering, NARO*

Summary

At maintenance of coastal disaster prevention facilities, a present maintenance of coastal disaster prevention facilities published by the government is not well used. This paper discussed about how to improve this manual and how to adjust actual maintenance. First, transitions of degradation or failure paths are selected as the main connection point of the manual and actual maintenance. The relation between actual failure and standard failure process on the manual is discussed. Integration of LCC related analysis methods are discussed. Life time expectation analysis methods are compared. Finally, the gap between actual maintenance and standard maintenance on the manual is discussed by positing chart based on the axis of cost and accuracy. Under increasing of some supported cost for maintenance, to decrease the cost of maintenance with the minimum accuracy decrease of estimation of life time of coastal disaster prevention facilities are proposed..

Key words : LCC, Transitions of degradation, Failure path, Cost benefit analysis, Life time of disaster prevention facilities