

# 報告 港湾施設に対するコスト最小の維持補修計画の立案手法について

中川 将秀\*1・末岡 英二\*2・佐野 清史\*3・福手 勤\*4

**要旨**：本稿は、主に塩害劣化した複数のコンクリート構造物から構成される港湾施設に対して、供用期間中の維持補修コストが最小となる維持補修計画を導き出す一手法を示したものである。また、検討の過程で得られた劣化度判定、劣化進行予測、補修計画選定およびコスト算定に関する今後の検討課題についても示した。

**キーワード**：維持補修計画、港湾施設、コンクリート構造物、塩害、コスト

## 1. はじめに

港湾施設は、規模が大きくなると建設年の異なった複数の構造物で構成されることが多く、環境条件や使用条件も異なるため、劣化の進行は構造物ごとに異なってくる。したがって、このような施設の性能評価は構造物ごとに行うことになり、現状の事後保全をもとにした維持管理手法では対策案も構造物ごとの個別対応となる。このため、補修時期、補修方法、補修範囲等の設定を含む適切な維持補修計画の立案にあたっては、施設の費用対効果を最大とするために、供用期間中の施設全体に要する維持補修コストが小さく、かつ無理のない計画が求められている。本稿では、主に塩害劣化した複数のコンクリート構造物から構成される港湾施設に対して、外観目視調査の結果から、劣化診断、劣化進行予測および補修計画選定とコスト算定等を行い、コスト最小となる維持補修計画を導いた。また、この過程の中で得られた知見および今後の課題を抽出した。

## 2. 検討概要

### 2.1 対象構造物

対象とした港湾施設を図-1に示す。この施設は、栈橋、ドルフィン、渡橋橋脚の構造物で構成され、建設から15~34年経過したものが混在

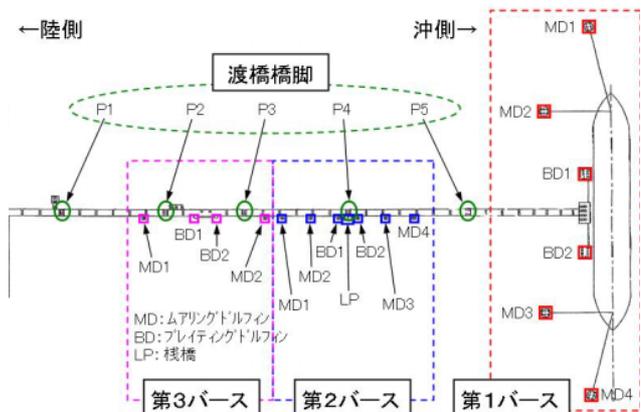


図-1 対象港湾施設内の構造物

していた。なお、本検討では、RC部分を対象とし、鋼管杭、鋼製部材は対象としていない。

### 2.2 維持補修計画の考え方

#### (1) 供用期間

本検討では、調査時から25年経過時を機能的あるいは経済的耐用限界<sup>1)</sup>と考え、何らかの改良が必要な状態とした。また、供用期間は今後25年とした。

#### (2) 要求性能

本検討では、「安全性能」「使用性能」「第三者影響度に関する性能」「美観・景観」「耐久性能」の要求性能<sup>2)</sup>のうち、「安全性能」と「使用性能」を重視した維持管理を行うこととした。

#### (3) 維持補修費用（コスト）

本検討では、補修時期、補修方法、補修範囲

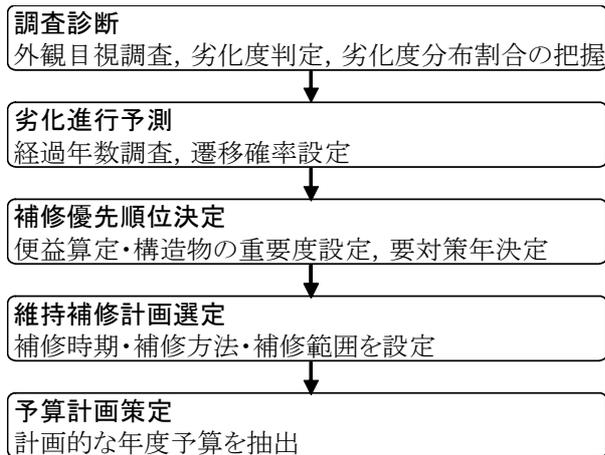
\*1 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所 構造研究室主任研究員 工修 (正会員)

\*2 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所 材料研究室長 工修 (正会員)

\*3 東洋建設(株) 技術本部美浦研究所 副所長 工博 (正会員)

\*4 東洋大学 工学部環境建設学科 教授 工博 (正会員)

表-1 維持補修計画の検討手順



等の維持補修計画を設定して、できるだけコスト最小に努めることとした。また、無理のない維持補修計画とするため、各年度毎の維持補修費をできるだけ平滑化することとした。

### 3. コスト最小の維持補修計画の検討

検討手順を表-1に示す。本手順は2.2を踏まえ、既報告の<sup>3)</sup>手順を一部改良したものである。

#### 3.1 調査診断

##### (1) 外観目視調査の結果

目視や打音により各構造物の上面を除く全域の劣化損傷状況をスケッチや写真に記録した。P1の劣化状況を図-2に示す。P1は建設後34年が経過し、設計かぶりが10cm、H.W.Lから底面までの距離が0.8mであり、ひび割れや浮き、はく離等の変状が側面と隅角部に集中していた。底面は常時湿った状態にあるものの目立った変状は認められなかった。その他のドルフィンにおいても同傾向であった。

##### (2) 劣化度判定

劣化度判定は図-3のように構造物を分割した部材毎に、筆者らが設定した表-2に示す劣化度判定基準<sup>3)</sup>に従って、劣化度0~Vの6段階に判定した。ここで、使用制限が必要と思われる時点(劣化度V部材が発生した時点)を安全性能低下開始、耐荷力低下が開始した時点(劣化度IV部材が発生した時点)を使用性能低下開始と仮定した。

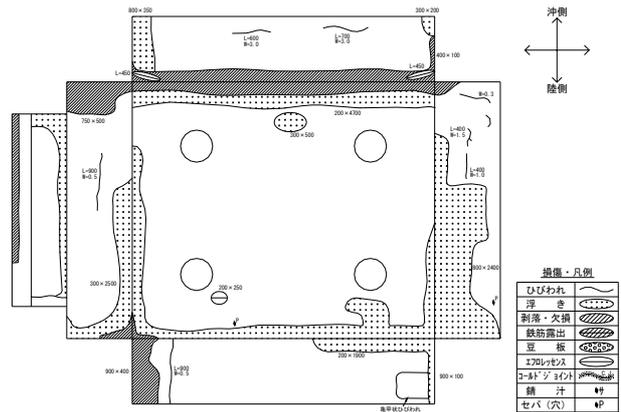
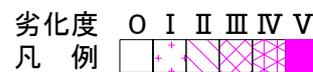


図-2 P1の劣化損傷スケッチ



栈橋の例

ドルフィンの例

図-3 部材の分割例

##### (3) 劣化度分布割合の把握

各構造物の上面を除く全域を100%とした分割部材数に対する劣化度部材の占める割合(以下、劣化度分布割合と称す)として把握した。

#### 3.2 劣化進行予測

現状の劣化度分布割合から経過年数と遷移確率で表現するマルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルを用いて将来の劣化度分布割合を算出した。用いた劣化進行モデル<sup>3)</sup>は、土木学会が示す塩化物イオン濃度拡散式<sup>4)</sup>や鉄筋腐食断面減少率の推定<sup>5)</sup>をもとに各劣化度の期間比率を推定し、各劣化度の期間に対応した重みを遷移確率に与える方法を適用したものである。

一例としてP1の劣化進行予測結果を図-4に示す。ここで、安全性能や使用性能が低下開始する時点(劣化度IVや劣化度Vの曲線が点線

表-2 劣化度判定基準

部材劣化度項目		0	I	II	III	IV	V
表面錆		なし	コンクリート表面に点錆が見られる(鉄筋腐食発生)	一部に錆汁が見られる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
露出鉄筋		なし	なし	露出した鉄筋が数箇所見られるが、断面減少は見られない	鉄筋の腐食が見られ、5%未満の断面減少が見られる	鉄筋の腐食が著しく、5~20%未満の断面減少が見られる	鉄筋の腐食が著しく、20%以上の断面減少が見られる
ひび割れ	床版	なし	1方向にひび割れが見られる	2方向に幅1mm未満のひび割れが見られる	2方向に幅1~3mm未満のひび割れが見られる	2方向に幅3mm以上のひび割れが見られる	-
	梁	なし	軸直角方向にひび割れが見られる	軸方向に幅1mm未満の腐食ひび割れが見られる	軸方向に幅1~3mm未満の腐食ひび割れが見られる	軸方向に幅3mm以上の腐食ひび割れが見られる	-
遊離石灰		なし	なし	遊離石灰の溶出が数箇所見られる	遊離石灰の溶出が広い範囲に見られる	-	-
浮き剥離・剥落		なし	なし	20%未満の小規模な浮き、剥離・剥落が見られる	20~50%未満の浮き、剥離・剥落が見られる	50~70%未満の浮き、剥離・剥落が見られる	70%以上の浮き、剥離・剥落が見られる



(全部材から1部材を引いた割合)と交差する時点に設定した。同様にして全構造物に対し、安全性能や使用性能の低下開始時点を求めた。これらを整理したのが図-5である。この図から各構造物の性能低下開始時期は一目瞭然であるが、構造物の重要度を考慮して補修優先順位を決定する必要がある。

### 3.3 補修優先順位の決定

補修優先順位決定の手順を図-6に示す。補修優先順位は対策が必要となる時期  $y$  (以下、要対策年と称す)の早さによって決定した。要対策年は使用性能低下開始年  $a$  から安全性能低下開始年  $b$  までの期間で設定し、各構造物の重要度  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ) に応じて式(1)から求めた。すなわち、重要度が1の場合には使用性能低下開始年に必ず対策を行うものとし、重要度が小さくなるにつれて安全性能低下開始年まで対策時期を先送りすることができる考えた。

$$y = b - \alpha(b - a) \quad (1)$$

ここで、各構造物の重要度は第1バース：第2バース：第3バース：渡橋橋脚 = 1 : 0.8 : 0.2 : 1とした。これらの結果を要対策年の早い順に並び替え、要対策年が供用期間内にある構造物に対して維持補修計画を検討した。

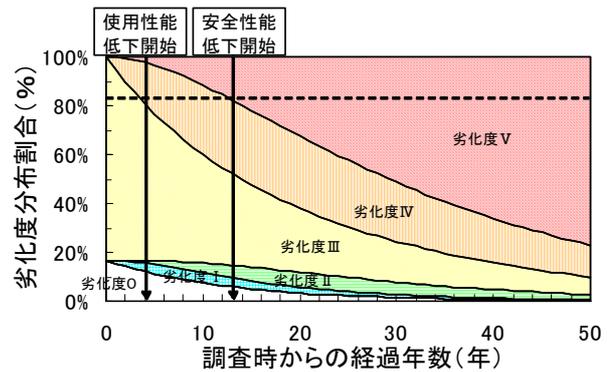


図-4 P1の劣化進行予測結果

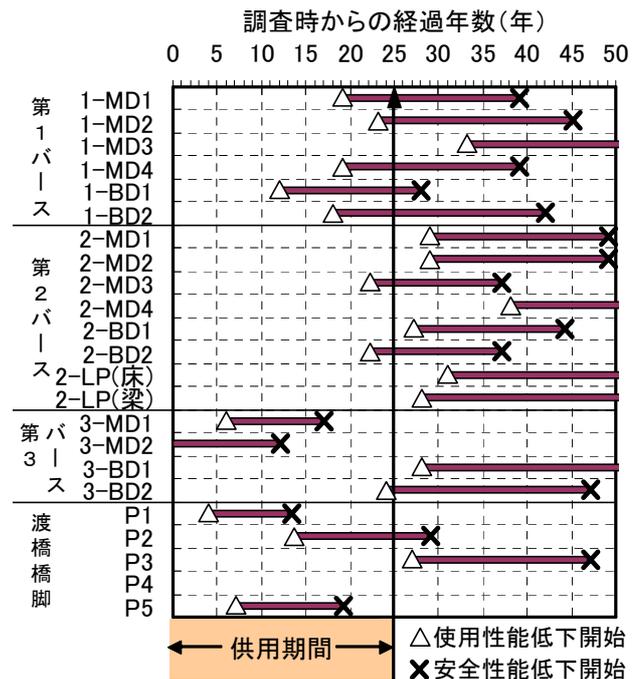


図-5 各構造物の性能低下と経過年数の関係

構造物名	使用性能 低下開始年	安全性能 低下開始年	重要度	要対策年
1-MD1	19	39	1	19
1-MD2	23	45	1	23
1-MD3	33	58	1	33
1-MD4	19	39	1	19
1-BD1	12	28	1	12
1-BD2	18	42	1	18
2-MD1	29	49	0.8	33
2-MD2	29	49	0.8	33
2-MD3	22	37	0.8	25
2-MD4	38	62	0.8	42
2-BD1	27	44	0.8	30
2-BD2	22	37	0.8	25
2-LP(床)	31	53	0.8	35
2-LP(梁)	28	51	0.8	32
3-MD1	6	17	0.2	14
3-MD2	0	12	0.2	9
3-BD1	28	53	0.2	48
3-BD2	24	47	0.2	42
P1	4	13	1	4
P2	14	29	1	14
P3	27	47	1	27
P4	0	0	1	0
P5	7	19	1	7

構造物名	要対策年
P4	0
P1	4
P5	7
3-MD2	9
1-BD1	12
3-MD1	14
P2	14
1-BD2	18
1-MD1	19
1-MD4	19
1-MD2	23
2-MD3	25
2-BD2	25
P3	27
2-BD1	30
2-LP(梁)	32
1-MD3	33
2-MD1	33
2-MD2	33
2-LP(床)	35
2-MD4	42
3-BD2	42
3-BD1	48

並び替え

補修計画の検討

点検維持管理

供用期間 25年

※表内の年数は調査時からの経過年数

図-6 補修優先順位決定の手順

### 3.4 維持補修計画案の策定

維持補修計画案の策定にあたり、補修範囲はマクロセル腐食による再劣化の危険性等を考え全面とした。また、補修時期は要対策年より前になるよう設定し、補修方法は各劣化度に応じた標準的な工法<sup>4)</sup>から組み合わせて選定した。今回検討した補修方法を表-3に、期待される補修効果を表-4に示す。ここで、断面修復の耐用年数は補修前の遷移確率を用いた劣化進行予測により推定し、表面塗装やFRP接着の性能低下は耐用年数まで考慮しないものとした。

これらに基づいて、P1の維持補修計画メニューを表-5のように5ケース設定した。計画1と計画2は補修方法を同じにして補修時期を比較した。計画3~5は補修方法を比較した。

P1の維持補修計画選定結果を図-7および図-8に示す。図-7は要求性能低下範囲の割合と経過年数との関係を示している。図中の太点線は対策を必要とする時点、すなわち、全部材のうち1部材が要求性能を下回る時点（以下、維持管理レベルと称す）を示している。ここで、要求性能低下範囲の割合は構造物の劣化度IV以上の占める割合とした。ただし、使用性能低下

表-3 補修方法

記号	補修方法
A	大断面修復+補強鉄筋+FRP接着
B	大断面修復+FRP接着
C	大断面修復+表面塗装
D	大断面修復
E	小断面修復+電気防食

表-4 補修効果

補修方法	耐用年数	補修効果
大断面修復	再予測	劣化度が健全に回復
小断面修復	再予測	回復なし(準備工)
表面塗装	15年	耐用年数まで劣化度の進行なし
電気防食	20年 <sup>注)</sup>	
FRP接着	30年	

注)配電設備の耐用年数

表-5 P1の維持補修計画

計画	補修方法	補修時期	補修範囲
1	D	翌年	全面
2	D	3年後,17年後	
3	B	3年後	
4	E	翌年,21年後	
5	C	翌年,16年後	

開始直前に断面修復のみを施す計画2については、1回目の補修時に既に鉄筋断面が減少している部分が多いと考え、2回目以降の補修は鉄筋断面が減少する前に再補修を施すこととし、劣化

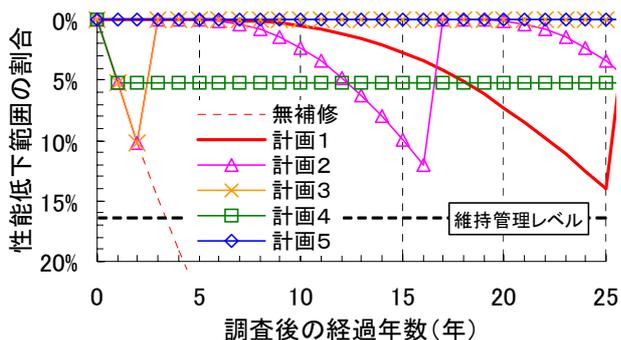


図-7 P1の性能低下曲線

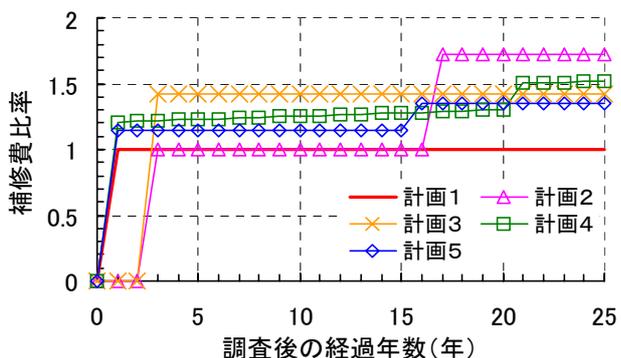


図-8 P1のコスト算定結果

度Ⅲ部材発生直前に対策を施すこととした。

図-8 は計画 1 を基準にした補修費比率と経過年数との関係を示している。ここで、補修費の算出にあたっては既往の文献<sup>6)</sup>に示す劣化度に応じた総面積に対する補修必要面積および補修単価を用いた。この図からこの構造物においては、供用期間 25 年までのコストでは計画 1 が最小となる計画であることがわかる。各構造物に対して、このような維持補修計画選定を行うことにより、施設全体のコスト最小となる維持補修計画が決定できる。

### 3.5 予算計画の検討

各構造物に対してコスト最小の維持補修計画選定を一義的に行うと、補修時期を調査後早い時期に設定する計画が選定される傾向にある。しかし、一方で年度予算を考慮に入れた無理のない維持補修計画を検討することも現実に重要な課題である。そこで、維持補修費を平滑化した上で年度予算を設定し、総予算がコスト高とならないように計画することとした。

表-6 予算計画策定のための維持補修計画

構造物名	計画 I	計画 II	計画 III
P4	A/1	A/1	A/1
P1	D/1	B/3	D/1
P5	D/1	B/6	D/1
3-MD2	C/1,16	B/8	B/5
1-BD1	D/1	D/11	D/6
3-MD1	D/1	B/13	B/7
P2	D/1	D/13	D/8
1-BD2	D/1	D/17	D/9
1-MD1	D/1	D/18	D/10
1-MD4	D/1	D/18	D/11
1-MD2	D/1	D/22	D/12

※表内は 補修方法/補修実施年 を示す

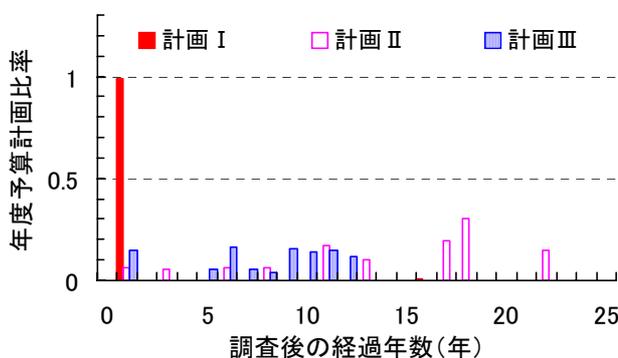


図-9 年度予算計画の平滑化

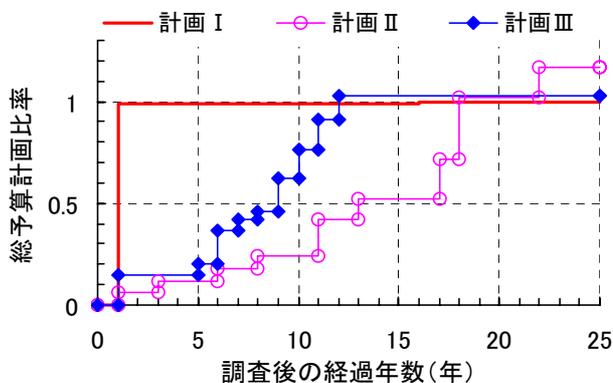


図-10 総予算計画の比較

年度予算計画策定のために比較検討した維持補修計画を表-6 に示す。比較検討した計画は、各構造物に対して調査の翌年に補修するコスト最小を検討した計画 I、要対策年の前年に順次補修を実施する計画 II、および、P4、P1、P5 を調査の翌年に補修し、その 5 年後から単年度ごとに順次補修を実施する計画 III とした。なお、計画 III で P4、P1、P5 を調査翌年としたのはそれ以降では補修方法が B となり、コスト高となる

ためである。また、5年後から順次補修としたのは上述と同様に1-BD1を6年後以降に実施すると補修方法がBとなるためである。

予算計画策定の結果を図-9および図-10に示す。図-9は計画Iの全補修費を基準とした単年度の補修費比率（年度予算計画比率）と経過年数との関係を示している。図-10は計画Iの全補修費を基準とした補修費比率の累計（総予算計画比率）と経過年数との関係を示している。ただし、インフレ率を考慮していない。この図から総予算がコスト最小となる計画は計画Iとなるが、要対策年まで待ってから補修を実施する計画IIでは総予算が17%のコスト高となり、比較的早い時期に補修を実施する計画IIIでは総予算が3%のコスト高で抑えることができる。

## 4. 今後の課題と方向性

### 4.1 劣化度判定基準について

維持補修計画を検討する際は、対象構造物の現状における劣化度を的確に把握し、その劣化度に応じて要求性能の低下度合を判断することが非常に重要となる。本稿では、前述した表-2のように外観目視調査による劣化度に応じて各種性能が低下開始するものと想定した。しかし、これらの関係は栈橋上部工を対象に仮定したものであり、設置環境や使用環境が異なる各種構造物ごとに多少異なることが予想される。今後、多くの調査記録を収集整理することにより、表-2の精度向上に努めることが必要である。

### 4.2 補修必要面積と補修単価について

コスト最小の維持補修計画を選定する際に、補修必要面積と補修単価を設定する必要がある。本検討では既往の文献<sup>6)</sup>に従って設定した。補修必要面積はマクロセル腐食や施工不具合等の補修後の再劣化を考慮した設定方法の確立が課題である。また、補修単価はできるだけ実施工費に近づくような設定に努め、各種補修効果の明確化が課題である。

### 4.3 便益算定手法の必要性について

年度毎に平滑化された予算計画を策定する際

には、補修優先順位を決定する必要がある。本検討では各構造物の重要度を設定して補修優先順位を決定した。各構造物の重要度を定量的に設定するには、各構造物の便益を査定する必要がある。また、便益算定が適確に実施されるならば、本稿で提案した手法は地域の異なる施設毎での補修優先順位を決定する際にも活用できると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、主に塩害劣化した複数のコンクリート構造物から構成される港湾施設に対して、供用期間中のコスト最小となる維持補修計画を導き出す手順の一例を示した。今後、抽出した検討課題を解決し、さらに多くの調査事例を収集して精度向上に努めることで、汎用性の高い港湾施設アセットマネジメントシステムの構築に繋げたい。

## 6. 参考文献

- 1) 土木施設のライフサイクル, 土木計画学シンポジウム, 土木学会, No.12, pp.130, 1978.1
- 2) コンクリート標準示方書 [維持管理編] に準拠した維持管理マニュアル (その1) および関連資料, コンクリート技術シリーズ 57, 土木学会, pp.120, 2003.11
- 3) 中川将秀, 末岡英二, 内藤英晴, 濱田秀則: 栈橋 RC 上部工における劣化進行モデルを用いた LCC 算定の一例, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.2067-2072, 2004.7
- 4) コンクリート標準示方書 [維持管理編], 土木学会, pp.111, 2001.1
- 5) コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.11, 1998.10
- 6) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No.1001, 2001.3