無筋コンクリート海岸構造物のひび割れ幅に基づく新しい劣化度判定基準の提案

古谷 宏一¹・横田 弘²・橋本 勝文³

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: furuya-koichi@eng.hokudai.ac.jp

²フェロー 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: yokota@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学大学院助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: hashimoto.k@eng.hokudai.ac.jp

本論文では、無筋コンクリート胸壁を対象とした現地調査からひび割れ性状に関する情報を蓄積し、確率統計手法に基づき劣化状況を把握することにより、目視により簡易に測定できる鉛直ひび割れ幅から施設の耐力低下に大きな影響を及ぼすと考えられるひび割れ深さを推定する式を提案した。また、得られた知見に基づき、ひび割れの生じた胸壁を解析モデルに置換え、ひび割れ深さ、ひび割れ本数、構造部材の寸法および想定する荷重を変化させた非線形有限要素解析を行い、構造性能の低下を評価した。その結果、劣化状態と構造性能（耐力）との関係を定量的に明らかとし、無筋コンクリート海岸構造物の耐力低下に基づいて、鉛直ひび割れ幅およびひび割れ本数を指標とする新しい劣化度判定基準を提案した。

Key Words : un-reinforced concrete structure, crack, FEM, structural performance

1. はじめに

高度経済成長期に整備された多数の社会基盤施設は既に建設後40年以上経過し、老朽化が年々深刻になっている。そのため、今後、更新・維持補修費がますます増大していくと予測される。一例として、高橋ら¹⁾の試算によれば、2003年以降の港湾施設における全体事業費の伸び率を-2%と仮定した場合、2025年において、全体港湾施設の事業費の概ね80%を更新・維持補修費が占めると予測されている。したがって、より低コストで、効果的かつ効率的な維持管理手法を確立し、必要な性能を保持した状態で施設を長期間利用することが求められる。そのためには、施設の保有性能評価および性能低下の将来予測を適切に行う必要がある。我が国のコンクリート構造物における保有性能評価および維持管理に関する研究は、大部分が鉄筋コンクリート構造物を対象としたものである²⁾。しかしながら、海岸構造物においては、多数の無筋コンクリート構造物が整備されている。それにもかかわらず、無筋コンクリート構造物を対象とした検討が希少であるため、維持管理計画に際して、当該施設の保有性能評価および精度の高い性能低下の将来予測が不十分である。さらに、東日本大震災において、海岸コン

クリート構造物の重要性が再認識され、既設構造物の適切な保有性能評価ならびに維持管理が重要であるとの提言がなされている⁴⁾。以上の背景の下、本研究では、無筋コンクリート海岸構造物である胸壁を対象に、劣化指標となる鉛直ひび割れの発生と構造物の耐力の定量的な関係を得ることを目的とする。これにより得られた知見に基づき、目視検査で簡易に測定可能なひび割れ幅を指標とし、胸壁の構造性能（耐力）に基づく新しい劣化度判定基準を提案する。なお、本論文では、胸壁に生じる劣化として、性能に最も影響を与えられと考えられる鉛直方向に発生したひび割れを対象とする。

2. 現地調査

(1) ひび割れ幅およびひび割れ深さの測定

調査は、海岸構造物の胸壁を対象とし、ひび割れ幅、ひび割れ深さおよび胸壁寸法について測定を行った。胸壁に発生していたひび割れの例を図-1に、胸壁の外観を図-2に示す。ひび割れ深さの測定には、衝撃弾性波法を用いた⁵⁾。ひび割れの測定は、胸壁に作用する外力あるいはコンクリートの乾燥収縮に起因するものと推定される鉛直方向のひび割れを対象とした。各ひび割れに対し

図-1 胸壁に発生したひび割れの例

図-2 胸壁の外観

て、ひび割れ幅が異なる複数地点でひび割れ幅とひび割れ深さを測定した。現地調査を行った海岸施設は3施設、合計6スパンである。

(2) ひび割れ幅とひび割れ深さの関係

本論文では、耐力に大きな影響を与えると考えられるひび割れ深さを目視等で容易に測定可能なパラメータで推定することを試みる。調査した胸壁のひび割れ幅とひび割れ深さの関係を図-3に示す。線形回帰分析を行った結果、相関係数が0.679であった。したがって、ひび割れ幅とひび割れ深さの両者においては、いくらかの相関があることがわかった。これより、ひび割れ深さを推定する際、ひび割れ幅は重要な指標となり得ると考えられる。実務上、ひび割れ深さを測定しようとする、特別な装置と技術が必要であり、簡便に行えるわけではない。そのため、ひび割れ深さをひび割れ幅などの容易に測定できるパラメータで推定することができれば、実務上非常に有意義であると考えられる。しかしながら、ひび割れ幅のみを指標としてひび割れ深さを推定することは、上記のように両者間の相関係数が0.7程度であることか

図-3 ひび割れ幅とひび割れ深さの関係

図-4 ひび割れ幅×胸壁高さとひび割れ深さの関係

図-5 ひび割れ幅×胸壁厚さとひび割れ深さの関係

表-1 コンクリート部材の材料特性

圧縮強度 f_c (N/mm ²)	18
引張強度 f_t (N/mm ²)	1.8
ヤング係数 (N/mm ²)	25000
ポアソン比	0.15
終局ひずみ ε_u	0.000311
せん断保有係数 β	0.2

とがわかった。したがって、ひび割れ深さを推定には、ひび割れ幅のみでなく、構造物の寸法の影響が大きいことが確認された。そのため、今回の調査データの範囲内においては、ひび割れ幅×胸壁厚さのひび割れ深さに対する相関係数が0.863と大きいことから、本論文においては、ひび割れ幅×胸壁厚さでひび割れ深さを推定する式(1)を提案する。

$$D = A(w \cdot B) \quad (1)$$

ここで、

D : ひび割れ深さ(mm)

A : 回帰係数(0.0938),

B : 胸壁厚さ(mm)

w : ひび割れ幅(mm)

3. 鉛直ひび割れを有する胸壁の構造解析

(1) 概要

本解析では、初期状態として鉛直ひび割れを有する胸壁の構造解析モデルを作成し、非線形有限要素解析を行った。構造解析モデルパターンとして、ひび割れ深さおよび本数を変化させた。荷重載荷パターンとしては、波力を模擬したものおよび不同沈下を模擬したものとした。

(2) 胸壁の構造解析モデル

ひび割れを有する胸壁の構造解析モデル(Model 1)を図-6に示す。コンクリート部材を6面体ソリッド要素(100mm×100mm×100mm)でモデル化した。ひび割れは、ひび割れ挿入地点に界面要素を挿入することで表現し、要素挿入深さを変化させることでひび割れ深さの変化を再現した。また、ひび割れ本数による影響を考慮するために設定した、ひび割れを2本有する胸壁の構造解析モデル(Model 2)を図-7に示す。

コンクリート部材要素の材料特性を表-1に示す。載荷中に新たに発生するコンクリートのひび割れの進展については、分散ひび割れモデル⁹⁾により表現した。引張軟化挙動の開始に対し、線形応力カットモデルを採用した。ひび割れ発生に伴うひび割れ幅と引張応力の関係について

図-6 胸壁の構造解析モデル (Model 1)

図-7 胸壁の構造解析モデル (Model 2)

ら、推定誤差が大きくなる懸念がある。また、同図から構造物の寸法が大きい場合、同じひび割れ幅でもひび割れ深さが大きくなる傾向が見られた。そのため、胸壁の寸法がひび割れ深さの推定に与える影響を考慮する必要がある。

(3) 胸壁寸法の影響

ひび割れ深さの推定誤差に関して、本論文では、胸壁の寸法の影響を検討した。胸壁の寸法として、高さ H 、厚さ B （本論文においては、胸壁の上辺厚さと下辺厚さの平均値）、横幅 W を考える。

ひび割れ幅×胸壁高さとしひび割れ深さとの関係を図-4に示す。これより、ひび割れ幅×胸壁高さとしひび割れ深さの相関係数が0.796となり、ある程度の相関を有していることがわかった。

ひび割れ幅×胸壁厚さとしひび割れ深さとの関係を図-5に示す。これより、ひび割れ幅×胸壁厚さとしひび割れ深さの相関係数が0.863となり、強い相関を有しているこ

図-8 斜め入射での荷重－変位曲線(Model 1)

図-10 不同沈下での荷重－変位曲線(Model 1)

図-9 斜め入射での荷重－変位曲線(Model 2)

図-11 不同沈下での荷重－変位曲線(Model 2)

ては線形引張軟化曲線を採用した。コンクリートのひび割れ発生に伴いせん断剛性を25%に低減した。なお、初期ひび割れの表現として用いた界面要素は、剛性およびせん断伝達応力を概ね0としたため、骨材のかみ合わせによるせん断抵抗については考慮していない。修正ニュートンラプソン法⁷⁾を用いて収束計算を行い、収束判定にはエネルギーノルムを用いた。

(3) 斜め入射波力による構造解析

外力として、波力を模擬した荷重を与えた際の解析を行った。荷重載荷条件としては、胸壁前面に垂直方向に与えた場合、ひび割れを導入しても2次元解析と同等となることから耐力低下が確認できなかったため、構造解析モデル前面に斜め45度方向に面分布荷重を与えた。境界条件としては、モデル底面を完全に固定とした。ひび

割れの界面要素深さを0mm, 200mm, 400mm, 600mm, 800mm, 1000mm, 2000mmと変化させて解析を行い、破壊に至るまでの最大荷重（ピーク荷重）を求めた。（図-6参照）。なお、界面要素は斜めに平行四辺形で挿入した。そのため、ひび割れの界面要素深さは平行四辺形の奥行辺の長さである。

Model 1の荷重－変位曲線を図-8に示す。ひび割れ界面要素深さが0mm, 200mm, 400mm, 600mm, 800mmの場合、荷重・変位曲線は概ね同等であった。また、ひび割れの増加に伴う、ピーク荷重および剛性の低下は見られなかった。しかしながら、1000mmでは0mmと比較すると3%程度のピーク荷重の低下が見られた。また、胸壁に貫通ひび割れが発生している2000mmでは、0mmと比較すると14%程度のピーク荷重の低下および7%程度の剛性の低下が見られた。

Model 2の荷重-変位曲線を図-9に示す。これより、Model 1と同様に、ひび割れ界面要素深さが0mm, 200mm, 400mm, 600mm, 800mmの場合、荷重-変位曲線は概ね同等であり、ひび割れ増加に伴うピーク荷重および剛性の低下は見られなかった。しかしながら、1000mmでは0mmと比較すると16%程度のピーク荷重の低下が見られた。また、胸壁に貫通ひび割れが発生している2000mmでは0mmと比較すると46%程度のピーク荷重の低下および7%程度の剛性の低下が見られた。Model 1と比較し、Model 2においてはひび割れ要素深さの増加に伴うピーク荷重低下量は大きかった。以上より、ひび割れ深さが増加するに従いピーク荷重および剛性が低下することがわかった。さらに、胸壁に発生したひび割れ本数がピーク荷重の低下に与える影響は大きく、ひび割れ深さが1000mmにおいては、Model 1とModel 2ではピーク荷重低下量に5倍程度の差異が生じた。

(4) 不同沈下による構造解析

不同沈下は底面に強制変位を与えて解析すべきであるが、本研究では沈下の影響を簡便に検討するため、不同沈下の作用を模擬した面分布荷重を構造解析モデル底面に下向きに与えた。境界条件としては、モデルの片側側面を固定とした。ひび割れの界面要素深さを0mm, 200mm, 400mm, 600mm, 800mm, 1000mmと変化させて解析を行い、破壊に至るまでの最大荷重（ピーク荷重）を求めた。（図-7参照）。

Model 1の荷重-変位曲線を図-10に示す。これより、ひび割れ要素深さが600mmまではピーク荷重の低下が見られなかった。その後、600mmを超えた時点からピーク荷重の低下が見られ、1000mmの場合ではピーク荷重が0mmの場合と比較し50%以上低下した。また、ひび割れの要素深さが増加するに従い剛性が低下することがわかった。

Model 2の荷重-変位曲線を図-11に示す。これより、ひび割れの要素深さが増加するに従い、ピーク荷重および剛性の低下が見られた。Model 1と比較すると、その低下量が大きく、ひび割れ本数が構造性能に与える影響が大きいことがわかった。以上より、本解析における条件内においては、斜め入射波力および不同沈下のどちらを想定した場合でも、ひび割れ本数が増加することにより、ピーク荷重および剛性の低下量が大きくなることがわかった。

4. 無筋コンクリート海岸構造物の劣化度判定基準の提案

解析結果より、既にひび割れを有した胸壁の荷重-変位曲線は、荷重に伴うひび割れが発生するまでは概ね線

図-12 ひび割れ幅と耐力比の関係

形の挙動を示し、その後、コンクリート要素に分散ひび割れが発生すると同時に急速に破壊が進行することがわかった。そのため、本論文では、荷重-変位曲線におけるピーク荷重を構造物の耐力として定義した。

3章ではひび割れ深さの変化とともに耐力の低下を求めた。式(1)を用いてひび割れ深さをひび割れ幅に逆算することで、ひび割れ幅と耐力低下の関係を得た。なお、式(1)のひび割れ深さは測定面から垂直距離のひび割れ深さであるので、ひび割れ要素深さを垂直距離のひび割れ深さに変換した後ひび割れ幅に変換した。図-12にひび割れ幅とひび割れが発生していないモデルでの耐力を1とした場合の耐力比の関係を示す。これより、斜め入射波力を想定した場合の耐力低下は、ひび割れ幅が7mmでは、Model 1において耐力が96%程度、Model 2において耐力が80%程度になった。不同沈下を想定した場合、Model 1ではひび割れ幅が4mmを超えた時点で、耐力が低下することがわかった。Model 2においては、さらにひび割れ幅が小さい段階で耐力が低下することがわかった。したがって、斜め入射波力に対して、ひび割れ幅の増加による耐力の減少量は、不同沈下と比較して小さいことがわかった。つまり、ひび割れ幅が同じでも、不同沈下を想定した場合、無筋コンクリート構造構造物の耐力に与える影響は大きいと推察される。また、Model 1とModel 2を比較した場合、ひび割れを2本有したModel 2において耐力低下量が大きくなった。したがって、無筋コンクリート海岸構造物における劣化度判定を行う際、ひび割れの幅、長さだけではなく発生しているひび割れの本数も考慮に入れて判断しなければならないことがわかった。

以上より、目視点検で簡易に測定可能なひび割れ幅と

表-2 本論文で提案する劣化度判定基準

劣化度	判定基準
<i>d</i>	変状なし
<i>c</i>	ひび割れ幅4mm未満
<i>b</i>	ひび割れ幅4mm以上6mm未満
	ひび割れが2本
<i>a</i>	ひび割れ幅6mm以上
	貫通ひび割れが発生している
	ひび割れ幅4mm以上のひび割れが2本

ひび割れは胸壁の鉛直方向に生じるものを対象

耐力低下の関係を示すことができた。これより、現行の無筋コンクリート海岸構造物の劣化度判定基準⁸⁾が4段階評価(*d*～*a*)であることを踏襲し、本論文での知見から提案する新しい劣化度判定基準も4段階評価とし、表-2に提案した。劣化度*d*は施設に変状が生じていないとした。劣化度*c*は不同沈下および斜め入射波力を想定した場合に耐力の低下が見られなかったひび割れ幅4mm未満とした。劣化度*a*は不同沈下を想定した場合にひび割れ幅が6mm程度で耐力が50%以下になり、さらにひび割れが2本においては、ひび割れ幅が4mm程度で耐力が50%を下回ることより設定した。なお、この基準は、鉛直方向のひび割れを対象としたひび割れ幅およびひび割れ本数を劣化度判定の指標としている。

5. まとめ

本論文において得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 無筋コンクリート海岸構造物である胸壁に発生していたひび割れの現地調査を行った結果、ひび割れ深さとひび割れ幅には強い相関があることがわかった。
- 2) 現地調査結果を確率統計手法で整理した結果、ひび割れ幅と胸壁厚さからひび割れ深さを推定する式を提案した。
- 3) ひび割れを有した構造解析モデルを作成し、不同沈下および波力を想定した非線形有限要素解析を行った結果、ひび割れ深さと構造物の耐力との関係を示

した。

- 4) ひび割れ性状と胸壁の耐力低下の関係を明らかとし、ひび割れ幅およびひび割れ本数を指標とする無筋コンクリート胸壁の劣化度判定基準を新たに提案した。

今後、データ蓄積および類似の構造物を対象とした調査を継続して行い、ひび割れ深さの推定式の精度および信頼性を向上させたいと考えている。さらに、無筋コンクリートを対象としたひび割れ面での骨材かみ合わせによるせん断伝達を考慮することで、構造解析モデルの精緻化をはかり、精度の高い構造性能評価を行う予定である。

謝辞：現地調査の実施に際して、(株)アルファ水工コンサルタンツ・吉野真史氏のご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋宏直, 後藤文子, 横田弘: 港湾施設の維持補修・更新費の将来推定(2005), 国土技術政策総合研究所資料, No.257, 2005.
- 2) 横田弘, 山内浩, 加藤絵万, 岩波光保: 既設栈橋のライフサイクルシナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1114, 2005.
- 3) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘: 栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第48巻, 第2号, 2009.
- 4) 日本コンクリート工学会: 東日本大震災に関するコンクリート工学の面からの提言, 2012.
- 5) 首藤浩一, 日比紀夫, 岩野聡史, 極壇邦夫: 衝撃弾性波法によるひび割れ深さ測定の基礎的研究, 土木学会第58回年次学術講演会, V-394, 2003.
- 6) JIP テクノサイエンス株式会社: DIANA9 ユーザーマニュアル日本語参考資料(材料ライブラリー), 2005.
- 7) JIP テクノサイエンス株式会社: DIANA9 ユーザーマニュアル日本語参考資料(解析ライブラリー), 2005.
- 8) 農林水産省農村復興局防災課ほか: ライフサイクルマネジメントのための海岸保全維持管理マニュアル(案), 2008.

STRUCTURAL PERFORMANCE ASSESSMENT OF UN-REINFORCED CONCRETE COASTAL STRUCTURES

Koichi FURUYA, Hiroshi YOKOTA and Katsufumi HASHIMOTO

This paper discusses the methodology on performance assessment of un-reinforced concrete structures with cracks. Inspection on un-reinforced concrete coastal structures has been conducted to quantitatively evaluate crack properties. The authors proposed an equation to estimate crack depths from their widths by the statistical analysis. Subsequently, an un-reinforced concrete parapet was modeled with various crack patterns by using the proposed equation considering the size of the structure. A finite element analysis was carried out to identify the relationship between crack patterns and structural performance of un-reinforced parapet. As a result, a deterioration grading criterion based on the surface crack width and the size of structure was newly proposed for assessment of structural performance of un-reinforced concrete coastal structures.