

ECC 合成鋼床版に水が介在する状態における ECC の損傷推定

Damage Estimation of ECC Overlay Reinforcement on Steel Deck Plate with the Presence of Water

北海道大学大学院工学研究科 学生員 山崎 洋紀 (Hiroki Yamazaki)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

近年、既設鋼床版の損傷事例が増加しており、その対策工法として、優れた引張性能を有する高靱性繊維補強セメント複合材料(Engineered Cementitious Composite, 以下ECC)を鋼床版の上面増厚材料とし、ECCと鋼床版のずれ止めに薄層においても設置が可能であるFRP製のプレート型ジベルを用いる上面増厚補強工法が考案された¹⁾。ECCは繊維の架橋効果により引張応力を伝達してひび割れを拘束するとともに応力を分担するため、ひび割れ幅抑制効果と合成鋼床版としての補強効果により、鋼床版の応力・ひずみを低減し、疲労耐久性の向上が期待できる。一方でコンクリート床版の耐久性は水の影響により低下することが知られているため、ECC上面増厚工法においても水の影響による耐久性への影響を知る必要がある。

ECC上面増厚補強工法についてはこれまで、水没環境下における疲労の実験的検討が実施されている²⁾。その結果、ECC - 鋼床版間に水が介在しECCの上面まで水が満たされた状態で移動荷重が作用する場合、載荷部分近傍の水には載荷荷重を設置面積で除した圧力が発生し、その水圧による曲げモーメントがECCのひび割れ強度・破壊強度を上回るときに、ECC表面にひび割れ及び破壊が生じるとのメカニズムが考えられている(図1)²⁾。

しかし、ECC - 鋼床版間の水の流動の実態がつかめていないこと、どの程度の水圧でECCが損傷するかがわかっていないことから、これらの現象の妥当性を検証するために、ECCに損傷が発生するときの水圧を把握する必要がある。

本研究では、ECC - 鋼床版間に水が介在する状況でECC上面に車両荷重が作用すると想定し、車両荷重(載荷位置)の影響でECC - 鋼床版間の載荷部分近傍に作用すると考えられる水圧(分布荷重)を与えることで、ECCに発生する損傷を有限要素解析により明らかにすることを目的とする。

2. 解析手法

本章では解析に用いる材料の材料特性、材料構成則の説明をすると共に、解析対象について紹介し、解析対象の解析ケースについて述べる。

2.1 解析条件

鋼床版及びFRPジベルは弾性体と仮定している。ECC

の引張領域の挙動としては、弾性挙動に続いて初期ひび割れが生じる点で剛性が低下し、その後終局点まで応力が漸増しながらひずみが大きく増加する現象が見られる。また圧縮領域では圧縮強度に達した後、ひずみ増加に伴い応力が減少する。以上のECCの特性を材料設計・施工指針案に基づき図2に示すように定義する³⁾。圧縮領域のピーク前の挙動は図2中の式を用いる。また表1には、既往の研究²⁾に基づく材料特性値を示す。

解析モデルには3次元8節点ソリッド要素を用いる。ECC - ジベル間とジベル - 鋼床版間は完全剛結とした。本解析では解析対象の全体にわたりECC - 鋼床版間に水が存在することを仮定し、両者の間の付着がないこと

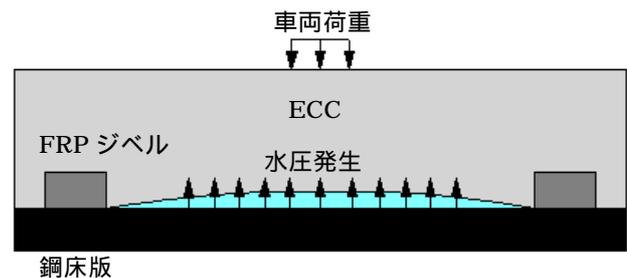


図1 予測される破壊メカニズム

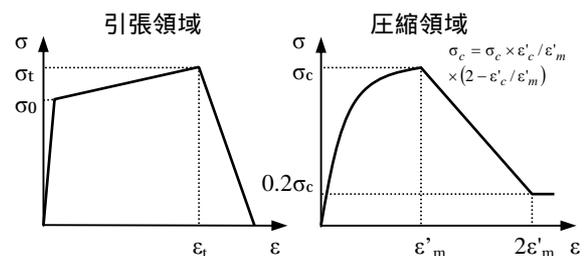


図2 ECCの材料構成則

表1 材料特性

| | | |
|-------------|--|--------|
| ECC | ヤング係数(N/mm ²) | 16400 |
| | ひび割れ強度 σ ₀ (N/mm ²) | 2.9 |
| | 引張強度 σ _t (N/mm ²) | 4 |
| | 圧縮強度 σ _c (N/mm ²) | 32.1 |
| | ポアソン比 | 0.23 |
| FRP ジベル部 | ヤング係数(N/mm ²) | 15943 |
| | ポアソン比 | 0.3 |
| 鋼床版 | ヤング係数(N/mm ²) | 212000 |
| | ポアソン比 | 0.3 |

を仮定して、ECC - 鋼床版間を接触条件とした。また本研究では水と構造の間の連成は考慮しておらず、解析ソフトウェア MSC.Marc を用いた静的構造解析を行っている。

2.2 解析対象

解析対象である ECC 合成鋼床版は既往の研究¹⁾で用いられた供試体を参考にし、図3に示すとおりと定める。鋼床版の厚さは12mm、ECCの厚さは40mmであり、両材料の間にはずれ止めのために薄層でも設置が可能であるFRPジベルを設置している。

2.3 解析概要

本研究では車両荷重が作用し、荷重の影響でECC - 鋼床版間に水圧が発生することを想定した解析を行う。解析ケースとしてはジベル列上に荷重が作用する場合、ジベル間上に作用する場合に分け、更に水圧が作用する領域を変化させることにより解析ケースを分けた。

図3は解析モデルであり、具体的に解析を行うケースとしては、ジベル間中央に荷重が作用するケース、ジベル端部付近に荷重が作用するケースを考える。更にそれらのケースにおいて、異なる3ケースの領域に水圧を作用させるケースを考え、以下の合計12ケースを考える。ジベル列上に荷重が作用

- Case1 荷重がジベル間中央に作用する場合
 - C1-1 300mm×300mmの領域で水圧が作用
 - C1-2 420mm×400mmの領域で水圧が作用
 - C1-3 500mm×500mmの領域で水圧が作用
- Case2 荷重がジベル端部に作用する場合
 - C2-1 300mm×300mmの領域で水圧が作用
 - C2-2 420mm×400mmの領域で水圧が作用

C2-3 500mm×500mmの領域で水圧が作用
ジベル列間に荷重が作用

- Case3 荷重がジベル間中央に作用する場合
 - C3-1 300mm×320mmの領域で水圧が作用
 - C3-2 400mm×400mmの領域で水圧が作用
 - C3-3 520mm×500mmの領域で水圧が作用
- Case4 荷重がジベル端部に作用する場合
 - C4-1 300mm×320mmの領域で水圧が作用
 - C4-2 400mm×400mmの領域で水圧が作用
 - C4-3 520mm×500mmの領域で水圧が作用

境界条件としては鋼床版下部を完全固定とし、ECCに作用する荷重の大きさは84kN(2.1MPa)、荷重が作用する領域としては、車両荷重を想定して200mm×200mmの領域とする。また、解析モデルは対称性を考慮する1/2モデルとする。

解析手順としては、水圧が存在しない状態で徐々に車両荷重を増加させ、84kNに達したところでその状態を保持させながら水圧を徐々に増加させる。z軸方向の変位が最大となる点を着目点として、水圧を増加させ始めてからの水圧 - 変位関係を示し、ひび割れが発生するときの水圧を確認する。

3. 解析結果

3.1 ジベル列上に荷重が作用

Case1(C1-1 ~ C1-3)のECC領域において変位が最大となる箇所は図3のAとなり、水圧 - 変位関係は図4となる。ひび割れが発生するときの水圧はC1-1においては0.524MPa、C1-2では0.172MPa、C1-3では0.088MPaとなり、水圧の作用面積が拡大するほどECCには低水圧でひび割れが発生することを確認できる。弾性領域であるが非線形挙動が確認できる原因としては、水圧が低い段

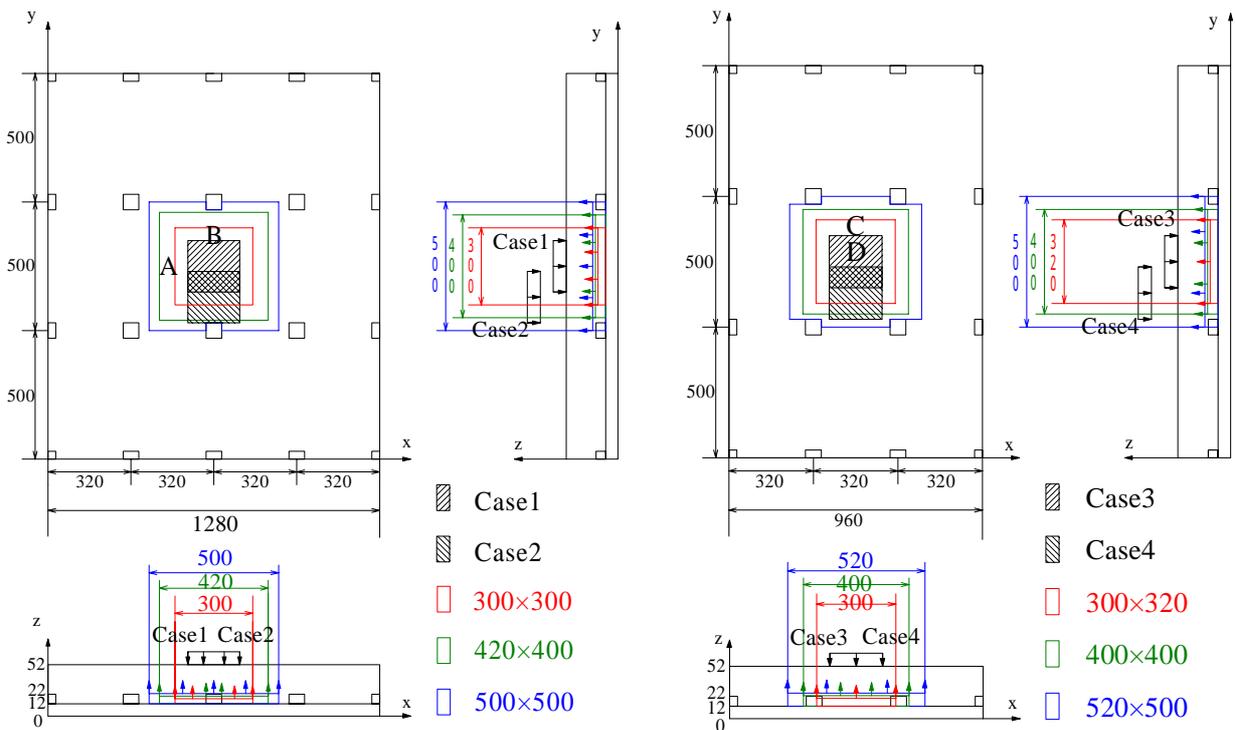


図3 解析モデル(単位 mm)

階では荷重により ECC と鋼床版が接触していたが、水圧が増加するにつれて接触領域の ECC が盛り上がり、ECC - 鋼床版間の接触切れが生じ剛性が低下したことが考えられる。特に C1-1 は水圧の作用領域が狭いため、ひび割れの進行が C1-2 や C1-3 と比べて遅く、非線形挙動が顕著に確認されたと考えられる。

Case2(C2-1 ~ C2-3)の ECC 領域において最も変位が大きい箇所は図3のBとなり、水圧 - 変位関係は図5となる。ひび割れが発生する時の水圧は C2-1 においては 0.101MPa、C2-2 では 0.062MPa、C2-3 では 0.052MPa となり、水圧の作用面積が拡大するほど ECC には低水圧でひび割れが発生することが確認できる。Case1、Case3 と比較して剛性の変化が少ないことは、荷重が FRP ジベル周辺にあることで ECC の拘束が少なくなることで変形しやすくなり、ひび割れが少ない水圧においても発生するためと考えられる。

3.2 ジベル間上に荷重が作用するケース

Case3(C3-1 ~ C3-3)の ECC 領域において最も変位が大きい箇所は図3のCとなり、水圧 - 変位関係は図6となる。Case1 に類似した傾向が見られ、ひび割れが発生する時の水圧は C3-1 では 0.468MPa、C3-2 では 0.193MPa、C3-3 では 0.123MPa となり、Case1 と同様に水圧の作用面積が拡大するほど ECC には低水圧でひび割れが発生することが確認できる。また、非線形挙動が確認される

ことは、Case1 と同様に ECC の盛り上がりによる接触領域の接触切れの影響のためであると考えられる。

Case4(C4-1 ~ C4-3)の ECC 領域において最も変位が大きい箇所は図3のDとなり、水圧 - 変位関係は図7となる。Case2 と類似した傾向が見られ、ひび割れが発生する時の水圧は C4-1 では 0.101MPa、C4-2 では 0.06MPa、C4-3 では 0.045MPa となり、これまでの Case と同様に水圧の作用面積が増大するほど ECC の剛性が小さくなり、少ない水圧でもひび割れが発生することが確認できる。

3.3 両ケースの比較

今回の解析条件ではジベル列上に荷重が作用する場合 (Case1、Case2) と、ジベル間上に荷重が作用する場合 (Case3、Case4) を比較すると、ジベル間上に荷重が作用する場合のほうが少ない水圧でひび割れが発生することがわかる。

ECC の主応力分布図は図8となる。上段図が各ケースの ECC 上面における主応力の分布図、下段図が ECC 下面における主応力の分布図であり、水圧の作用領域が狭いケースと広いケースをそれぞれ載せた結果である。図の空白部は FRP ジベルの存在する箇所である。水圧の作用領域の狭いケースでは応力は局所化し、広いケースでは応力は広範囲に及んでいることが確認できる。また、全てのケースにおいて FRP ジベルにより ECC が拘束されている領域、荷重が作用している領域の ECC 下面の領

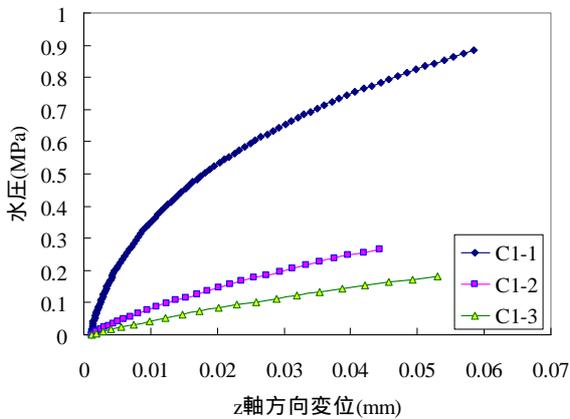


図4 Case1.Aの水圧 - 変位関係

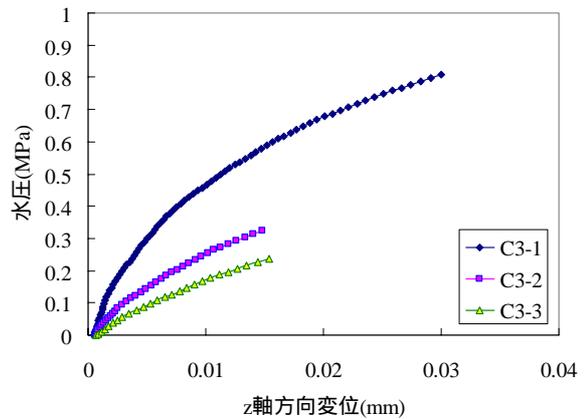


図6 Case3.Cの水圧 - 変位関係

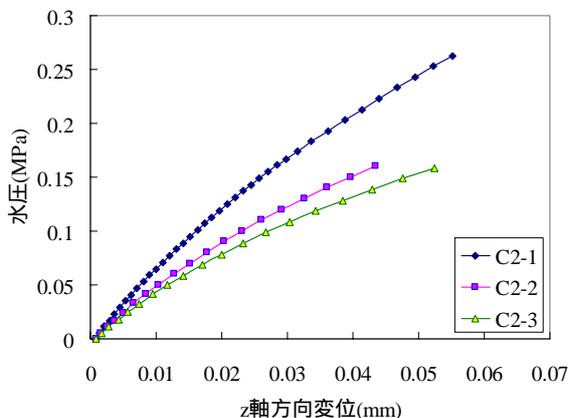


図5 Case2.Bの水圧 - 変位関係

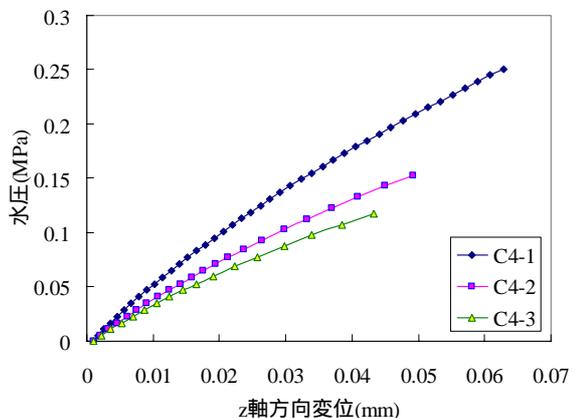


図7 Case4.Dの水圧 - 変位関係

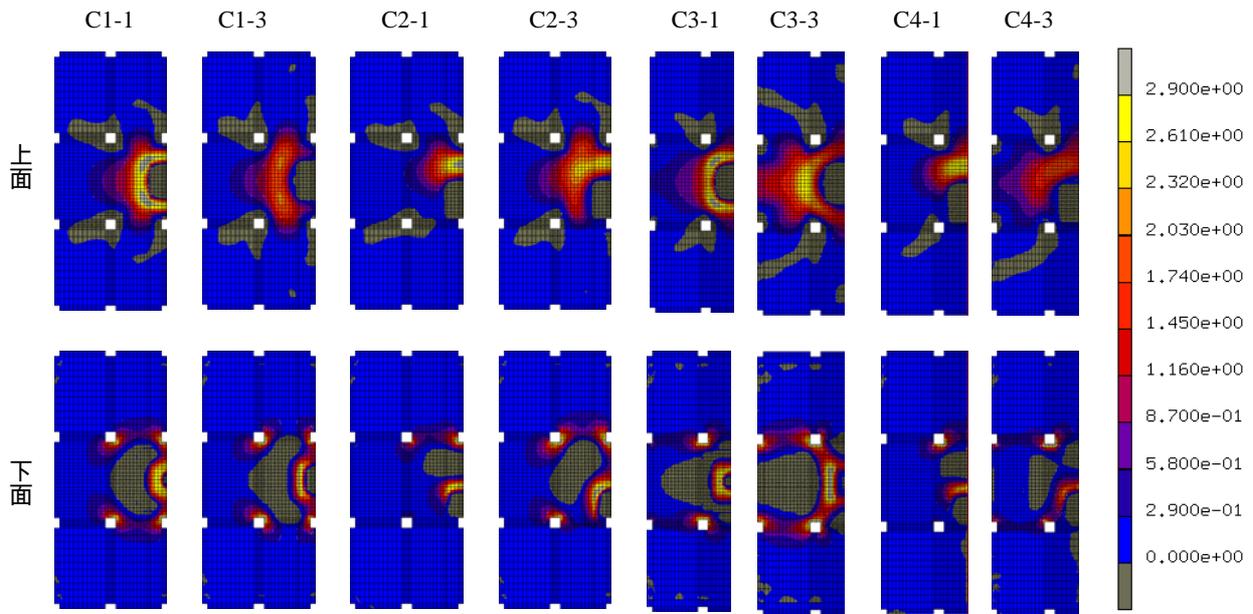


図8 ECC 上面下面の主応力分布図(単位 MPa)

域,荷重が作用している領域の周りの ECC 上部の領域において特に主応力の値が大きくなり,それらのいずれかでひび割れ強度に達していることが確認できる.

3.4 考察

3.2 節より今回採用した条件においては ECC - 鋼床版間に水圧が作用することで, 載荷荷重を設置面積で除した圧力(2.1MPa)が作用せずとも ECC に損傷が発生することがわかった. 12 ケースの解析のうち最もひび割れ発生時の水圧が高い C1-1 においても, そのときの水圧は 2.1MPa の半分以下である 0.524MPa となる.

しかし, 本研究では最も条件の悪い ECC - 鋼床版間の付着のない接触状態を仮定しているため, ECC と鋼床版の全剥離が起きていない状態では, 水圧の作用する部分のみを接触状態として定義し, 他の部分を完全剛結とした解析を行う必要がある. このような解析を行うことで, ひび割れの発生時の水圧は上昇する可能性がある.

既往の研究²⁾によると, 水で満たされている供試体に繰り返し輪荷重が作用すると, 水圧が 0.6MPa まで上昇する箇所が存在しひび割れが確認されている. また, 試験後の ECC には輪荷重直下部分だけではなく, 輪荷重周辺部において多くのひび割れが確認されている. 本研究の解析条件では 0.6MPa に到達することがなくとも, ひび割れが発生する解析結果を得た. また, 荷重付近に応力集中が見られることがわかった. 以上より定性的には実験で観察された結果と同様であることを確認した.

4. まとめ

本研究では, ECC により上面増厚補強された合成鋼床版の ECC - 鋼床版間に水が介在する状態において, 載荷荷重周辺の部分に水圧が作用する際の有限要素解析を行った. 以下に得られた結果のまとめを示す.

- 1) 解析モデル全体の ECC - 鋼床版間を接触状態とすることで, ジベル付近, 荷重の作用している周辺の ECC 上面, 荷重の作用している部分の ECC 下面において応力が増加することを確認した.
- 2) 今回行った水圧のパターンでは載荷荷重を設置面積で除した水圧が作用しなくとも, ECC にひび割れが発生することを確認した.

今後は, 水圧の作用している箇所のみを ECC - 鋼床版間の接触状態として考慮することや, 水圧の値は載荷荷重の速度の影響を受けることから, 移動荷重について考慮することなどを踏まえた解析を行い, 損傷のメカニズムをより詳細に把握することが必要である.

【参考文献】

- 1) 三田村浩, 須田久美子, 福田一郎, 今野久志, 松井繁之: 高靱性繊維補強セメント複合材料による鋼床版上面増厚補強に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62A No.2, 356-375pp, 2006.
- 2) 三田村浩, 石川博之, 福田一郎, 加藤静雄, 松井繁之: 高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の水中環境下の輪荷重走行試験, 第 5 回道路橋床版シンポジウム, 273-278pp, 2006.
- 3) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料, 設計・施工指針(案), 土木学会, 2007.