

令和元年6月24日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06466

研究課題名(和文) 寒冷塩害地域における既存鋼板・コンクリート合成床版の概略・詳細性能評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation method of structural performance for steel-concrete composite slab in cold region subjected to salt damage

研究代表者

高橋 良輔 (Takahashi, Ryosuke)

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10371783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：塩害を受け鋼板腐食した合成床版の有限要素解析を実施し、腐食鋼板のモデル化について妥当性の検証を行った。その結果、適用した腐食モデルは概ね妥当であることがわかった。妥当性を検証した有限要素解析プログラムを用いて、腐食分布をパラメータとした合成床版の押抜きせん断破壊のパラメトリック解析を行い、合成床版の押抜きせん断耐力に影響する腐食分布を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において妥当性が確認された腐食合成床版のモデルを用いて、有限要素解析により腐食した合成床版の詳細な構造性能評価を行うことができる。また本研究におけるパラメトリック解析の結果として示した、押抜きせん断破壊に最も影響を及ぼす腐食分布は、目視点検結果を用いた概略性能評価に役立てることが可能である。ただし、実験等による検証が不足しているため、今後、さらなる検証の蓄積が必要である。

研究成果の概要(英文)：FE model of steel concrete composite slab subjected to corrosion was verified. As the result, it was confirmed that the model could simulate appropriate behavior of punching shear failure of the slab. Parametric analysis of corroded steel - concrete composite slab subjected to punching shear was conducted by the FE program verified in this study. The distribution of cross sectional area loss of steel plate was used as a parameter. Corrosion distribution most influencing to punching shear capacity of the slab was confirmed from the results of analysis.

研究分野：コンクリート構造工学

キーワード：合成床版 腐食 押抜きせん断

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼板・コンクリート合成版は鋼板とコンクリートをずれ止めにより一体化した版部材であり、鋼板を型枠ならびに引張補強鋼材として利用する。施工面や力学面の長所により、現在、橋梁やケーソンなど多くの構造物で利用されている。道路橋に用いられている鋼板・コンクリート合成床版（以下、合成床版）では、コンクリートのひび割れと鋼板の腐食が、その構造性能に影響を及ぼす変状として維持管理上の問題となっている。ひび割れは主に、交通荷重による疲労作用とコンクリート中の水分の凍結融解作用により生じる。これらの対処を含む鉄筋コンクリート（以下、RC）道路橋床版の維持管理については、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）をはじめ多数の研究が精力的になされている。鋼材腐食に関しても以前から多数研究されており、例えば、RC 部材では鉄筋の腐食分布が耐荷挙動に及ぼす影響などが明らかとなっている。一方、鋼材腐食した合成床版については、鋼板が露出しており、変状観測・管理が比較的容易で耐荷性が低下する重大な状況には至らないとして、その研究は RC 部材のように盛んではない。

RC 道路橋床版では、交通荷重による疲労だけでなく、少ない交通量でも寒冷地では凍結融解によるひび割れが維持管理上の問題となっている。合成床版でも同様の現象が発生すると考えられ、凍結防止剤と雨水による高濃度塩水がひび割れから床版内部に浸透して床版内側で鋼板が腐食する可能性がある。合成床版では施工時に鋼板とコンクリートの接触面に空隙が生じる恐れがあり、浸透した塩水が空隙に溜まることで腐食が一樣ではなく局所的に激しくなる可能性もある。この場合、変状が外観から観測できず腐食が内側で大きく進展する。このような腐食は現在報告されていないが、鋼板内側まで詳細な点検を行っている合成版は少なく、今後発生する可能性がある以上、予め対応策を用意する必要がある。

現在は外観目視により、構造物の状態を健全時からの変化に応じて分類し、その状態を性能とみなす半定量的な評価が行なわれている。この方法では腐食位置が考慮されない場合が多い。鋼板、スタッドの腐食位置、コンクリートのひび割れ領域と耐荷力の関係が整理されれば、点検時の重要点検箇所や、腐食箇所の合成版の構造性能への影響度を考慮した評価が可能となる。この方法も半定量的なものであるが力学的根拠に基づいたより合理的な概略性能評価となる。

2. 研究の目的

腐食した合成床版の定量的な詳細性能評価のためには、腐食による鋼板厚さ分布や腐食・破断により変化するスタッド分布を考慮する必要がある。現在の合成床版の設計耐力式はスタッド分布や鋼板厚さ分布を考慮できない。非線形有限要素解析（以下非線形 FEA）はこれらを考慮できる可能性があり、複合構造標準示方書などの設計・維持管理に関する基準においても標準化されてきている。床版の諸元を最も左右する破壊形態の一つが押抜きせん断破壊であるが、研究代表者は、合成床版の押抜きせん断破壊を精度よく解析可能な非線形有限要素解析プログラムを開発している。そこで、本研究では、腐食による鋼板厚さ分布や腐食・破断により変化するスタッド分布を考慮可能な非線形有限要素解析プログラムの開発を行い、腐食した合成床版の力学性能に対する詳細な性能評価を可能とすることを目的とする。

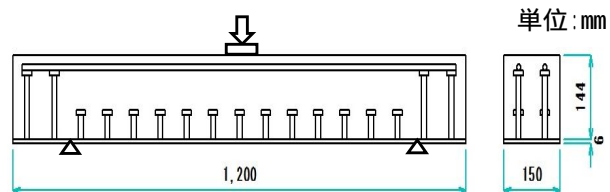


図1 健全モデルの形状寸法

表1 健全モデルの材料特性

コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鋼板			スタッド	
	厚さ (mm)	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
31.5	6	313	206	313	206

表2 解析ケース

モデル	鋼板厚さ (mm)	スタッド基部の鋼板		スタッド基部以外の鋼板	
		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
No.1	4.2	313	206	313	206
No.2	3	313	206	313	206
No.3	6	219	144	219	144
No.4	6	157	103	157	103
No.5	6	219	144	313	21400
No.6	6	157	103	313	21400

3. 研究の方法

(1) 鋼板腐食モデルの妥当性検証

図1に示す既往の実験供試体（以下、健全モデルとする）に対して、腐食を与えた解析を行った。供試体の材料特性を表1に示す。本解析には、研究室で開発中の3次元非線形有限要素解析プログラムを用いた。ずれ止めであるスタッドによる鋼板へのせん断伝達挙動への腐食の影響を見るため、スタッドは形状を簡略化したものの6面体要素でモデル化した（図2）。コンクリートと鋼板、スタッド

ドの接触面には平面接合要素を用いた。  
ひび割れ前のコンクリート構成則には、拘束効果を考慮した三次元弾塑性破壊モデルを適用した。ひび割れ判定は実験に基づくコンクリートの破壊基準により行い、ひび割れ後はひび割れ面を基準とした座標系で、ひび割れ直行方向と平行方向にコンクリートの一軸の応力-ひずみ関係を適用した。せん断方向には、ひび割れ間コンクリートとひび割れ面の平均せん断剛性を適用した。鋼材の応力-ひずみ関係は2直線とし、降伏判定にはミーゼスの降伏基準を用いた。鋼材とコンクリートの接触面では、鉛直方向を剛結とした。摩擦による解析結果への影響は極めて大きく、また、十分に確立したコンクリートと鋼材間の摩擦モデルも無いため、今回はせん断方向の剛性を小さく(1kgf/cm<sup>3</sup>)し、摩擦の影響を無視した。

腐食は鋼板の断面減少のみをモデル化し、接合面付着への影響は考慮しなかった。6面体要素であれば、腐食による断面減少は単純に要素断面積を減少させればよい。しかし、スタッド周辺部のみの腐食など、腐食分布や局所的な腐食を考慮する場合、隣接する要素間で節点を共有する有限要素解析では、単純に断面積減少を考慮できない。剛性マトリクスなど、プログラム内部で考慮する方法は考えられるが、今回は汎用プログラムでも容易に適用可能で実用できる降伏強度と弾性係数を断面減少分だけ低減させる方法で腐食を表現した。この方法では、断面2次モーメントの減少による影響は考慮できない。スタッドによって鋼板は局所的に大きな曲げを受けることとなるが、鋼板腐食した場合厳密には断面2次モーメントに影響を受けると考えられる。この影響については今後の検討課題である。

健全モデル以外の検討ケースを表2に示す。今回の腐食モデルであり、降伏強度と弾性係数を30%、50%減らしたケースがNo.3とNo.4である。また、腐食モデルの検証用に鋼板要素厚さを直接30%、50%減らしたNo.1とNo.2も用意した。そして、スタッド基部周辺鋼板が局所的に腐食した場合を検討するため、腐食モデルを導入し、30%、50%の腐食量としたケースも用意した。

#### (2)腐食分布のパラメトリック解析

図3に示すスタッドをずれ止めとした合成床版の実験供試体に対して、(1)の腐食モデルを用いてパラメトリック解析を実施した。供試体の材料特性は表3に示すとおりであり、引張補強鋼板は厚さ6mm、スタッドは高さが50mm、軸径13mmで、配置間隔は70mmである。

解析メッシュを図4に示す。解析には自作の3次元非線形有限要素解析プログラムを用いた。腐食による断面減少は(1)の方法によりモデル化した。

解析パラメータは引張補強鋼板の腐食分布である。検討した腐食分布の例を図5に示す。腐食位置の鋼板の断面減少率はいずれも90%とした。

## 4. 研究成果

### (1)鋼板腐食モデルの妥当性検証

解析から得られた荷重-変位関係をそれぞれ図6に示す。荷重-変位関係のグラフの他に、主ひずみ分布図、主ひずみベクトル図を基に破壊挙動を考察した。健全モデルの最大荷重は139kNであった。ひずみ分布の推移から想定される破壊挙動はスタッド位置でひび割れが生じた後、スタッドのヘッドにそって水平に進展し、その後、スタッドヘッドから載荷板に向けた斜めひび割れと水平ひび割れの開口により大きく荷重が低下した。この破壊性状と荷重変位の関係が

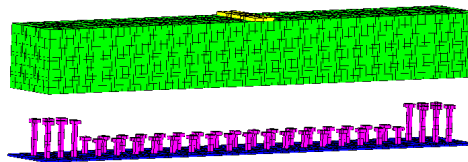


図2 解析メッシュ(はり)

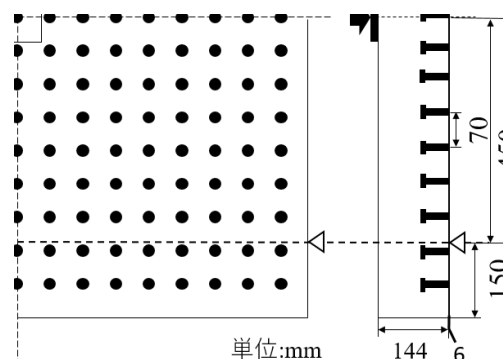


図3 腐食分布解析供試体の形状寸法(1/4)

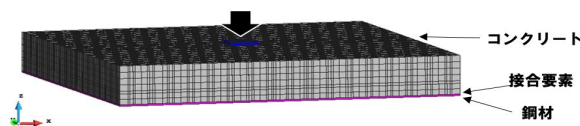


図4 解析メッシュ(床版)

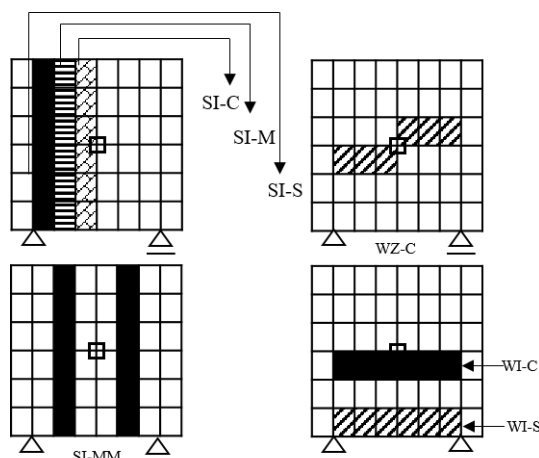
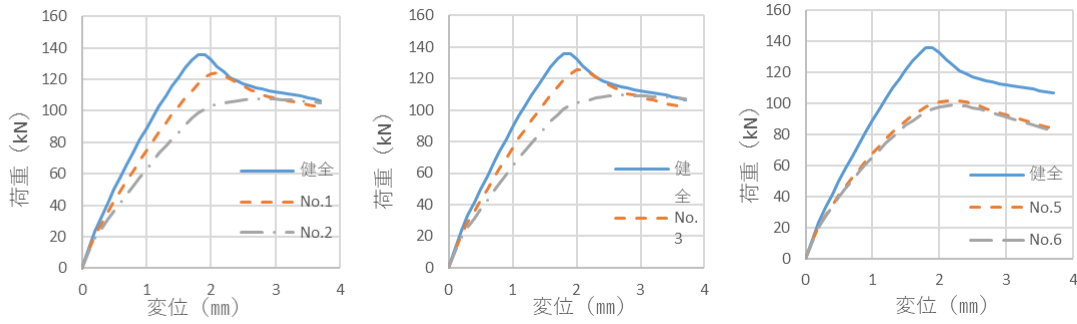


図5 検討した腐食分布の例



(a)鋼板断面を直接減少 (b)弾性係数と降伏強度を減少 (c)スタッド基部のみ腐食

図6 荷重 - 変位関係

らせん断破壊と断定した。既往の実験結果は最大荷重 92kN でせん断破壊であり、耐力を過大評価するが破壊性状は概ね一致している。

図 6(a) に示す鋼板厚さを直接減少させた場合では、厚さが薄いほど最大荷重が減少する。厚さ 30%減少の No.2 は健全モデルから最大荷重が 11%低下した。厚さ 50%減少の No.3 は最大荷重が 23%低下し、さらに支間中央での鋼板降伏による曲げ破壊となり破壊モードも変化した。図 6(b) に示す腐食モデルとして鋼板の降伏強度・弾性係数を低減した場合は、鋼板厚さを直接減少させた結果にほぼ一致した。また破壊モードの変化も一致した。

図 6(c) に示す、スタッド基部の鋼板のみ腐食モデルを導入した結果では、腐食量 30%の No.5 と 50%の No.6 の最大荷重がそれぞれ 102kN、98kN となり、健全時の 40%程度と最大荷重が大幅に低下するが、腐食量による違いは無かった。破壊挙動は、スタッドヘッドから載荷板に向けた斜めひび割れが健全モデルよりも小さく、不完全なせん断破壊であった。

降伏強度と弾性係数の低減率と等しい鋼板断面積低減率の結果がほぼ一致したため、降伏強度と弾性係数を低減する腐食モデルは、腐食による断面減少を概ね評価できたと言える。また、スタッド基部の局所的な腐食により、同じ腐食率で一樣に鋼板が腐食する場合よりも大幅にせん断耐力低下することがわかった。これは鋼板よりも先に多くのスタッドが降伏することにより一体性が失われるからだと考えられる。ひずみ分布からは、どちらもほぼ等しい位置と範囲でスタッド基部が降伏していることが示されており、その結果せん断耐力も等しくなったと考えられる。このことから、点検時においてはスタッド基部の腐食に重点を置くべきである。

## (2)腐食分布のパラメトリック解析

解析で得られた荷重-変位関係を図 7 に示す。健全時の破壊形態は押抜きせん断破壊であった。幅全域が腐食しており支間方向の腐食位置がそれぞれ異なる SI-C、SI-M、SI-S を比較すると、腐食位置が支承から支間中央となるに従い最大荷重が低下し、急激な荷重低下が見られなくなる。また、いずれも最大荷重時には腐食位置で降伏していた。図 8 は最大荷重時の最大主ひずみコンターであるが、SI-S で見られる斜めひび割れが、SI-C では見られず曲げひび割れが発達している。よって、腐食位置が支承から支間中央となるに従い押抜きせん断破壊から曲げ破壊へ移行したとみられる。また SI-M も曲げ降伏の性状がみられるが、主ひずみ分布では斜めひび割れが観察でき、両方の破壊形態が混在していると考えられる。

支間方向の腐食分布に対して、RC はりでは腐食後の曲げ耐力分布と曲げモーメント分布により曲げ破壊荷重が定まるが、合成床版も同様の性状であると言える。また鋼板腐食の曲げ耐力への影響はせん断耐力と比べて大きいと言える。

SI-M と SI-MM では SI-MM の方が最大荷重は小さい。理論的には SI-MM のように載荷点に対して支間方向に対称な位置が腐食しても曲げ耐力は変わらない。また図 8 では腐食側スパンでより斜めひび割れが発達する SI-M と違い両スパンで発達している。よってせん断耐荷機構に影響して最大荷重が低下したと考えられる。押抜きせん断破壊領域は載荷点中心にコーン状に広がるため、この領域に重なる腐食領域が大きいほどせん断耐力が低下すると考えられる。

支間方向全域が腐食し、幅方向の腐食位置が異なる WI-C、WI-S を比較するといずれも押抜きせん断破壊で荷重-変位関係の差はほとんど無いが、幅中央が腐食する WI-C が若干、せん断耐力の低下が大きかった。SI-M がせ

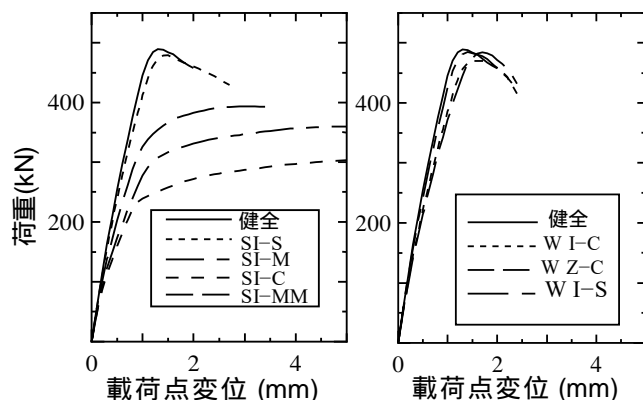


図7 荷重 - 変位関係

ん断破壊機構も含まれていることを考えると、より載荷点に近い領域の腐食がせん断破壊耐力に影響すると思われる。

幅中央において支間に対して  $45^\circ$  方向に対称となる位置が腐食している WZ-C も押抜きせん断破壊となるが、支間中央付近で同程度の領域が腐食している WI-C よりも耐力の低下が小さかった。したがって、力学的に同じ位置で腐食していても、部分的に腐食するより腐食領域が連続した場合に耐力への影響が大きいことが分かる。

これらの最大主ひずみコンターにはほとんど差は見られず、腐食分布により押抜きせん断破壊機構は影響を受けないことが分かった。

よって以下のことが明らかとなった。

- ・ 載荷点に近い領域が腐食するほど押抜きせん断耐力が低下する。
  - ・ 押抜きせん断破壊領域に対して、腐食領域が重なる範囲が大きいほど押抜きせん断耐力が低下する。
  - ・ 押抜きせん断破壊に対し力学的には対称な腐食領域であっても、部分腐食よりも連続領域で腐食するほうが押抜きせん断耐力は低下する。
  - ・ 部分的に腐食した場合の押抜きせん断耐力の低下はわずかである。一方、最大曲げモーメント位置の腐食が曲げ耐力へ与える影響は極めて大きい。
- これらの点に着目して点検を行うことにより、さらに合理化が図られると考えられる。

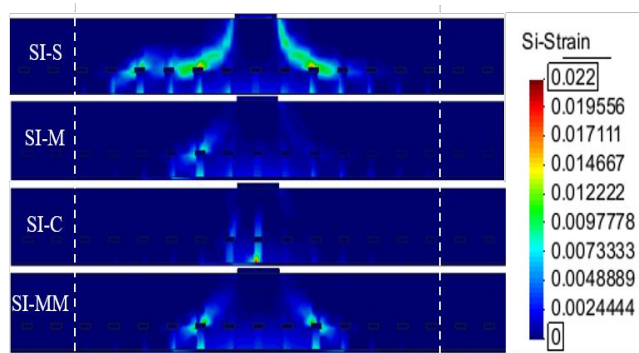


図 8 最大主ひずみコンター

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
なし

(2) 研究協力者  
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。