

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：33903

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15079

研究課題名（和文）複合要因による損傷を有した鋼・コンクリート接合部の耐荷性能および危険性評価

研究課題名（英文）Assessment of load bearing capacity and risk of damage in Steel-Concrete joints affected by compound factors

研究代表者

宗本 理（Munemoto, Satoru）

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70737709

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、鋼・コンクリート接合部を対象に、力学的要因と環境的要因による損傷度を統一かつ定量的に評価可能な解析手法の開発を目的とした。その結果、まず環境的要因としてコンクリートの乾燥収縮と鋼材の腐食に着目したFEMによる解析的検討より、乾燥収縮ひずみやコンクリートのひび割れ進展を定量的に評価可能な簡易モデルを提案し、解析手法の妥当性を確認した。さらに、PBL（孔あき鋼板ジベル）のせん断耐荷性能評価に対する腐食した配筋の位置や方向による影響を明らかにするとともに、本解析手法における今後の課題を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、乾燥収縮や鋼材の腐食などの環境的要因が鋼・コンクリート接合部の耐荷性能に及ぼす影響を力学的観点から明確にすること、さらに環境的要因と力学的要因による損傷の関連性を把握するとともに統一的に評価可能な手法を提案することを主な目的としていた。鋼・コンクリート接合部といった複合構造を対象に、力学的要因による損傷度と材料劣化などの環境的要因による損傷度を同時に定量的に評価可能な解析手法は国内外問わず開発されていないため、学術的意義を有している。さらに、目視できない鋼・コンクリート接合部の適切な維持管理手法に向けた重要な研究であり、社会的意義も有している。

研究成果の概要（英文）：In this study, the development of an analytical method capable of uniformly and quantitatively evaluating the damage degree of steel-concrete joints due to mechanical and environmental factors was aimed for. As a result, through analytical examination using FEM focusing on environmental factors such as drying shrinkage of concrete and corrosion of steel, a simplified model capable of quantitatively evaluating drying shrinkage strain and crack propagation in concrete was proposed, confirming the validity of the analytical method. We clarified the influence of corroded reinforcement position and direction on the shear load-bearing performance evaluation of PBL (Perforated Steel Plate Beams) and identified future challenges in this analysis methodology.

研究分野：構造工学

キーワード：鋼・コンクリート接合部 乾燥収縮 腐食 FEM 孔あき鋼板ジベル 耐荷性能

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 高度経済成長期以降に建設された土木構造物は今後 20 年間で老朽化が進み、築 50 年を経過するものが急速に増加する見込みである。そのような状況下で、地震や台風など自然災害の多い我が国では、既設構造物を合理的かつ効率的に維持管理していくことは重要課題の 1 つと言える。その目的を達成するためには、様々な影響要因により劣化・損傷した既設構造物の現有性能を定量的に把握することが非常に重要である。維持管理に向けた構造物の耐荷性能評価に関する研究は幅広い視点から実施されているが、環境的要因による劣化や損傷といった経時的に耐荷性能が変化する既設構造物に対して、力学的要因である外力(特に動的荷重)が作用した際の耐荷性能評価や余寿命予測に関する知見は少ないのが現状である。

(2) 多くの土木構造物に存在する鋼・コンクリート接合部に関しては、付着や摩擦といった複雑な事象が絡み合う、破壊性状を目視できないといった理由から破壊メカニズムの把握が難しく、研究データも十分とは言えない。さらに、コンクリートや鋼材はひずみ速度効果により載荷速度に応じて強度の向上が期待できる一方で、脆性的な破壊性状が生じる可能性が高いといった静的荷重と異なる性質を有していることや様々な環境に起因した劣化(鋼材の腐食、コンクリートの乾燥収縮や塩害、ASR など)による経時的变化を捉える必要があることなどが挙げられる。よって、材料劣化に伴う損傷と自然災害に起因した外力による損傷の蓄積を考慮した耐荷性能や変形性能といった力学的性能評価に関する取り組みが急務である。

2. 研究の目的

(1) 本課題の 1 つである鋼・コンクリート接合部の耐荷性能に対する環境的要因として、乾燥収縮がコンクリートや鋼・コンクリート間の付着や摩擦に関する力学的特性に及ぼす影響を把握すると同時に、その力学特性を定量的に評価可能な手法を提案する。さらに、鋼・コンクリート接合部の耐荷性能に対する乾燥収縮の影響について評価することを目的とする。

(2) 鋼・コンクリート接合部ではコンクリートのひび割れから水が浸透し、コンクリート母材内部に配筋された補強筋が腐食するといった劣化メカニズムを想定し、鋼材の腐食が鋼・コンクリート接合部の耐荷性能に及ぼす影響を把握することを目的とする。

(3) 鋼・コンクリート接合部の合理的かつ効率的な維持管理に向けて、環境的要因と力学的要因が作用した複合要因による損傷下における残存耐荷性能を適切に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) コンクリートの乾燥収縮が鋼・コンクリート接合部の耐荷性能に及ぼす影響を把握するため、実験的・解析的検討を実施する。実験的検討では、早強モルタルブロック(150×150×150mm)に異形鉄筋 D25 (材質 SD345) を貫通させた供試体を対象とし、乾燥養生による期間を 14, 28, 56 日, 112 日, 168 日と 5 種類変えた試験ケースを用意した。なお、試験体内部のボルト定着部および試験体表面にひずみゲージを貼付することで養生期間中の乾燥収縮ひずみをモニタリングした。養生後、その試験体を対象とした両引き引張試験を行い、鋼・コンクリート定着部の付着性能について検討する。解析的検討では、熱膨張ひずみの理論を用いて乾燥収縮ひずみを簡易的に表現する手法について検討し、本解析手法の妥当性を実験値と比較することで検証する。さらに、

(2) 鉄筋の配筋間隔に着目して腐食した鉄筋がかぶりコンクリートのひび割れ性状に及ぼす影響について検討する。この研究ではかぶりを固定し配筋間隔を変えた試験体を対象に電食試験を実施し、コンクリート内部に発生する鉄筋間のひび割れがコンクリート表面のひび割れ進展挙動に及ぼす影響を把握する。解析的検討では、RC 梁を対象に熱膨張による鉄筋の腐食表現や異方性損傷によるコンクリートひび割れモデルを用いた FE 解析より、本解析手法の妥当性を検証する。

(3) 鋼・コンクリート接合部としてずれ止め的一种である PBL(孔あき鋼板ジベル)を対象に、せん断耐荷性能に対する環境的要因の 1 つである鋼材の腐食と力学的要因である荷重の複合要因の影響について検討する。具体的には、せん断耐荷性能に影響を及ぼす母材コンクリートの拘束効果に着目し、母材コンクリート内部に配置された補強筋の腐食状況を変えた場合におけるせん断耐荷性能について FE 解析で評価する。なお、腐食の表現には(2)で記述した解析手法を用いる。

4. 研究成果

(1) 環境的要因の 1 つであるコンクリートの乾燥収縮が鋼・コンクリート定着部の付着性能に及ぼす影響を把握することを目的に、実験的および解析的検討を実施した。その研究成果として、

実験的検討では早強モルタルブロック (150×150×150mm)に異形鉄筋 D25(材質 SD345)を貫通させた供試体を対象とし、乾燥養生による期間を 14, 28, 56 日, 112 日, 168 日と 5 種類の試験ケースについて両端引張試験を行い、付着性能について検討した。鋼・コンクリートの付着性能として、付着応力度の低減率 - 時間(養生期間)の関係を図 - 1 に示す。この図より、本研究で仮定した付着破壊時における最大付着応力を乾燥収縮期間別に比較すると、乾燥収縮期間が長くなるにつれて、付着応力が徐々に低下し収束する傾向が得られた。

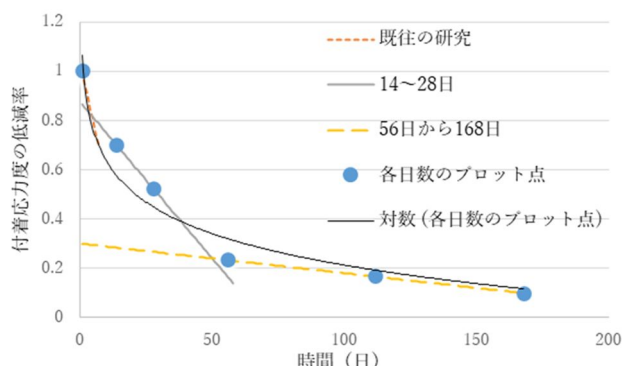


図 - 1 付着応力度の低減率 - 養生期間の関係

また、本研究で用いた供試体寸法では付着破壊が起きるタイミングや付着応力 - すべり関係における立ち上がり剛性に対する乾燥収縮期間の影響があまりみられない結果となった。

次に、解析的検討では単鉄筋を有したコンクリート角材を対象に乾燥収縮を表現するために適用した熱膨張の原理における熱膨張係数をパラメータとした熱応力解析による検討を実施した。なお、本研究では汎用解析ソフト MSC.MARC2023 を用いた。その結果、熱膨張係数と解析モデルの要素寸法を適切に設定することで簡易的に乾燥収縮ひずみを表現可能であることを確認した。ただし、乾燥収縮によるひずみが生じたコンクリートの縦弾性係数に関しては検討ができていないため、今後を検討していく必要がある。

上記で検討した乾燥収縮に関する本解析モデルを用いて、乾燥収縮が生じたボルト定着部と PBL を対象としたせん断解析を実施した。ボルト定着部を対象とした解析では、へりあき寸法を 80, 180, 240, 400mm の 4 種類設定し、既往の設計耐力式と比較することで乾燥収縮による影響について検討した。各へりあき寸法における最大せん断耐力について設計式から求めた実線と解析結果によるプロット点をまとめたものを図 - 2 に示す。この図より、設計と解析で比較した場合に Case3 のへりあき寸法 240mm では設計と解析結果で差異が生じており、解析モデルについて今後検討の余地が残っている。一方で、コンクリートのコーン状破壊から圧縮破壊へと切り替わる破壊性状は解析でも見受けられた。乾燥収縮の考慮の有無について解析結果を比較すると、乾燥収縮を考慮した場合に全ケースでせん断耐力が低下していることが見てとれる。特に、へりあき寸法 400mm の Case4 では、乾燥収縮による影響が大きく、圧縮破壊の発生を促進しせん断耐力が低下したと考えられる。

コーン状破壊 支圧破壊
乾燥収縮なし 乾燥収縮あり
case1 case2 case3 case4

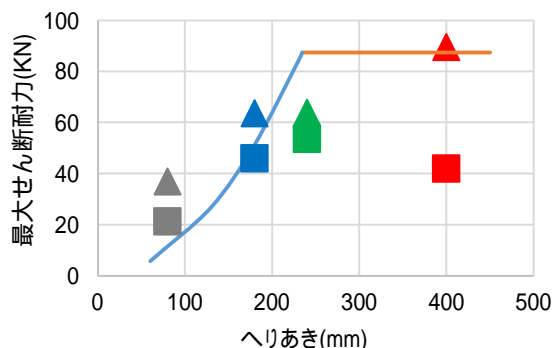


図 - 2 最大せん断耐力 - へりあきの関係

乾燥収縮を考慮した PBL の押抜きせん断解析では、せん断耐荷力に影響を及ぼす母材コンクリートの拘束効果に対して乾燥収縮は母材表面に乾燥収縮ひずみが生じる一方で、母材コンクリートの拘束を高める挙動も確認された。そのため、本研究では PBL のせん断耐荷力に対する乾燥収縮の影響は顕著に見られない結果となった。よって、PBL ではコンクリートの乾燥収縮によるひび割れから水が浸透し、コンクリート母材内部に配筋された補強筋が腐食するといった劣化メカニズムを想定し、コンクリート母材のひび割れと鋼材の腐食の関連性に関する研究へと方針転換を試みた。

(2)(1) で得られた研究成果を参考に、ここではコンクリートのひび割れに対する鉄筋の腐食による影響について実験的・解析的検討を実施した。具体的には、腐食ひび割れとして鉄筋軸方向ひび割れを誘発させるため、鉄筋を D13 とかぶり厚さ 30mm を採用した RC 供試体を用いて、電食試験による鉄筋の腐食を試みた。なお、鉄筋間にはひずみ計、各鉄筋のかぶりコンクリート表面にひずみゲージを等間隔に貼付することでコンクリート内部と表面のひずみを測定した。FEM による解析では主ひずみに基づいた等方性や異方性の損傷を考慮した材料構成則を用いることで、上記した実験結果と比較して本解析手法の妥当性を確認した。その研究成果として、コンクリートの表面および鉄筋間の内部におけるひずみと積算電流量の関係を実験と解析でまとめたものを図 - 3 に示す。この図より、実験による計測値としてかぶりコンクリート表面のひずみは積算電流量 30A・hr 付近から急激にひずみが増加する傾向が見られた。一方、鉄筋間に配置したひずみ計による内部ひずみは、積算電流量 40A・hr 付近から増加傾向に転じることが確認できた。それと同時に、表面ひずみは緩やかな増加に転じていることから、かぶりコンクリート

表面にひび割れが達するまでの区間とそれ以降の区間でひび割れの進展挙動が異なることが推測された。

次に、実験結果と解析結果で比較した場合、表面ひずみの進展挙動について、異方性損傷を考慮した A_D13_C30_R100_aniso のケースは等方性損傷を考慮した A_D13_C30_R100_iso のケースに比べてひずみが増加するタイミングは早い、鉄筋の腐食膨張によるコンクリート表面のひずみ値は実験と同様の傾向が得られていることが分かる。RC 供試体の内部ひずみの進展挙動に関して、等方性損傷を考慮した

A_D13_C30_R100_iso では積算電流量 45A・hr 付近から急激に内部ひずみが増加しているのに対して、異方性損傷を考慮した A_D13_C30_R100_aniso では積算電流量 45A・hr 付近から内部ひずみが実験と同様の勾配で増加している結果となった。よって、異方性損傷モデルを用いた解析結果は等方性損傷モデルよりも実験値を定量的に評価できていることから、鉄筋の腐食によるひび割れ挙動を定量的に評価するためには異方性損傷モデルが有用であることが認められた。

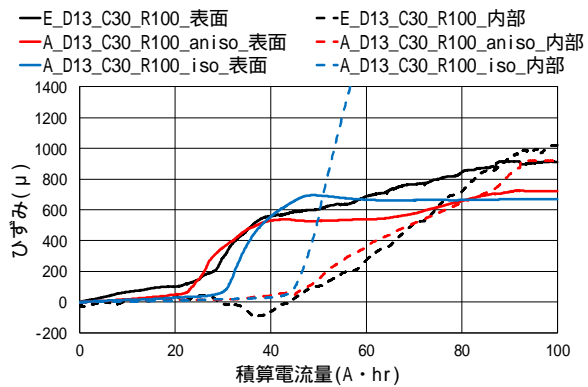


図 - 3 ひずみ - 積算電流量の関係

(3)(2)で検証した鋼材の腐食表現に関する本解析手法を用いて、PBLのせん断耐荷性能に対する鋼材の腐食による影響について検討した。本検討では、ジベル孔における二面せん断破壊よりも先行して母材表面のひび割れが生じる試験体を対象とした。具体的には、モルタルブロック(幅500mm×500mm、高さ400mm)にジベル孔径90mmの有孔鋼板が埋設された供試体で、モルタルブロックに配筋した帯鉄筋は上下のかぶりを50mmとし、100mm間隔で4段配置し、帯鉄筋と鉛直方向の縦補強筋にはD10、材質SD295を用いた。具体的な検討内容として、4段配置した帯鉄筋の腐食に着目し、腐食する帯鉄筋の方向(有孔鋼板の板幅方向と板厚方向)、さらに腐食する帯鉄筋の段を変えた解析ケースを用意した。なお、帯鉄筋の腐食はモルタルブロック一面のみの腐食を想定し、腐食率は10%を仮定した。

研究成果として、健全時と腐食する帯鉄筋の方向および段を変えた解析ケースによるせん断耐力 - 有孔鋼板の押抜き量の関係についてまとめたものを図-4に示す。この図より、腐食した帯鉄筋の段を変えたケースと健全時のケースを比較すると、帯鉄筋が腐食したケースは健全時に比べて降伏せん断耐力が約20%低下していることが確認できる。一方で、せん断耐力に対する腐食した帯鉄筋の方向や段による影響について明確に見られなかった。

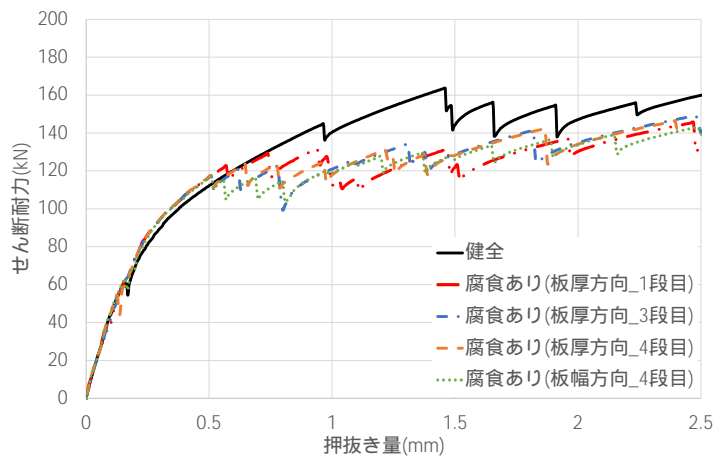


図 - 4 せん断耐力 - 有孔鋼板の押抜き量の関係

この理由として、本研究では鋼材の腐食表現に熱膨張による理

論を用いており、コンクリートのひび割れによる影響は反映できている一方、腐食した鋼材の有効断面積の減少を適切に評価できていないため、腐食した帯鉄筋の位置の違いが顕著に表れなかったものと考えられる。なお、PBLの最大主ひずみによるPBLの破壊性状では、腐食した帯鉄筋の方向によりひび割れが想定されるブロック面の傾向が異なることを確認した。

今後の課題として、帯鉄筋が腐食したPBLのせん断耐荷性能に関する検討に関して、腐食した鋼材の有効断面積を適切に評価できる手法への改良とともに、実験と比較した上でより定量的に評価可能な手法の構築について今後検討していく予定である。

<引用文献>

近藤錬真, 宗本理, 鈴木森晶, 鉄筋間隔が異なる RC 構造を対象としたひび割れ進展挙動と危険度評価に関する解析的研究, 土木構造・材料論文集, Vol. 39, 2023年, PP.113-121

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 近藤錬真、宗本理、鈴木森晶	4. 巻 39
2. 論文標題 鉄筋間隔が異なるRC構造を対象としたひび割れ進展挙動と危険度評価に関する解析的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 113-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.60345/kabse.39.0_113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤錬真
2. 発表標題 腐食したRC梁の定量的耐荷性能評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤錬真
2. 発表標題 鉄筋間隔が腐食ひび割れの進展挙動に及ぼす影響に関する解析的検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤錬真
2. 発表標題 腐食した RC 梁の定量的耐荷性能評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宗本理
2. 発表標題 補強筋による拘束条件が PBL のせん断耐荷性能に与える影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

土木工学科 構造研究室（宗本）のホームページ http://ai tech.ac.jp/~s-mune/study/index.html 土木工学科 構造研究室（宗本）のホームページ http://ai tech.ac.jp/~s-mune/study/index.html 研究関連 http://ai tech.ac.jp/~s-mune/study/index2.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------