

令和元年6月21日現在

機関番号：33903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18142

研究課題名(和文)動的繰返し荷重が作用する鋼・コンクリート接合部の残存耐荷性能評価

研究課題名(英文) Assessment of residual load bearing capacity of anchorage zone between steel and concrete under dynamic and cyclic loading

研究代表者

宗本 理 (MUNEMOTO, Satoru)

愛知工業大学・工学部・講師

研究者番号：70737709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震などを想定した動的繰返し荷重下におけるあと施工アンカーボルト定着部の残存耐荷性能について検討した。具体的には、ボルト定着部の損傷度合いと載荷条件の関連性を明らかにし、対象に対する超音波試験の適用範囲や損傷度と超音波試験による出力値の関連性を確認した。さらに、ボルトとコンクリートの付着に用いたエポキシ樹脂の動的付着特性を把握した。数値解析では鋼・コンクリート間に付着を模擬した要素を導入し、静水圧による影響を考慮することで拘束条件下や載荷方向の異なるあと施工アンカーボルト接合部の耐荷性能を定量的に把握可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度経済成長期に建設された土木構造物を合理的に維持管理し、長寿命化に向けた取り組みが今後増加していくことが予測される。その中で、目視点検が困難な接合部も含めて実構造物の現有性能を定量的に評価することは非常に重要である。

そのため、本研究で実施した鋼・コンクリート接合部の残存耐荷性能に関する実験的研究や定量的耐荷性能評価手法の確立に向けた解析的研究による成果は、土木構造物の合理的な維持管理に向けて現有性能の推測、補修・補強などの優先順位の設定などに役立つ有用なデータであり、本研究成果は社会的に十分意義があるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：In this paper, we conduct experimental study on load-bearing capacity of anchorage zone under dynamic cyclic load and numerical simulations with 3D FEM to a complex phenomenon such as corn failure and bond failure. The following conclusions are deduced from this study.

First, it is confirmed that pullout load depends on cyclic load, anchor bolt's displacement and loading direction. Moreover, It is found that it is potential application in non contact air coupled ultrasonic testing for failure condition of anchorage zone. Secondly, resin bond characteristic between bolt and concrete under the dynamic loading were different from the cases of the quasi-static loading. Lastly, we proposed mechanical model based on hydrostatic pressure. Consequently, failure condition of anchorage zone under various boundary condition could be simulated well using our proposed mechanical model.

研究分野：構造工学、構造解析学

キーワード：あと施工アンカーボルト 孔あき鋼板ジベル 残存耐荷性能 繰返し載荷 FEM

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

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、既設構造物の耐荷性能評価に関する研究は活発に行われているが、既設構造物の経時的な耐荷性能の変化に関する研究は少ないのが現状である。自然災害の多い我が国では既設構造物の耐荷性能の低下が懸念されており、合理的な維持管理に向けて既設構造物の現有性能を把握することが非常に重要である。

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、研究データも前者に比べて少ない。近年の被災事例では、東北地方太平洋沖地震（2011 年）、笹子トンネル天井板落下事故（2012 年）などボルト接合部の損傷による問題が挙げられる。今後、構造物の要求性能を満たすよう維持していくためには、ソフト対策はもちろん、ハード対策においても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と思われる。実務に用いられてきたこれらの設計では、一般的に静的荷重に基づいた試験を主体とし、数多くの有用な設計耐力式が提案されている。しかし、コンクリートや鋼材は必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。そのため、道路法施工規則により 5 年毎に定期点検を実施しているが、地震などの動的荷重が作用した場合には静的荷重を基準とした健全度評価を適用できない。

2. 研究の目的

本課題では鋼・コンクリート接合部を対象に、動的繰返し荷重に対する現有性能（構造性能の低下度合い）の把握および安全性・機能性を定量的に判断可能な構造性能評価法を確立することを最終目標とし、実験から載荷条件が耐荷性能に与える影響を把握すると同時に、解析からそれらの損傷度合いを考慮できる力学モデルを構築する。さらに、非破壊検査による出力値と実験結果との関係性を明確にすることで損傷を受けた接合部の定量的な耐荷性能評価手法を考案する。

具体的には、まずボルト接合部および PBL を対象に、地震で発生しうる載荷速度による動的繰返し載荷試験を引抜き・せん断方向に実施し、損傷を有した状態で静的引抜き試験を行うことで耐力や破壊性状などの残存耐荷性能を明らかにする。それと同時に、非破壊検査の一種である超音波試験を用いて、その出力結果である超音波伝搬速度と損傷度の関係を定量的に把握する。次に、最終的には地震動のような動的荷重下における耐荷性能を定量的に評価するため、鋼・コンクリート間の動的付着特性を実験から明らかにした。最後に、その特性を考慮可能な力学モデルによる高度な数値解析手法を構築することを本来の目的としていたが、任意の条件におけるあと施工アンカーボルト接合部の静的耐荷性能評価手法を確立するためには鋼・コンクリート間におけるエポキシ樹脂の付着特性モデルの検討が必要であったため、そのモデルの妥当性に関する解析的検討を最優先事項とした。

3. 研究の方法

(1) 実験的研究の方法について以下の①～④に記述する。

①繰返し荷重下における孔あき鋼板ジベルの残存耐荷性能を明らかにするため、既往の研究¹⁾を参考に要素試験体を製作し、押抜き方向への繰返し載荷試験を実施した。試験体は孔径 60mm の有孔鋼板をモルタルブロックに埋設し、貫通鉄筋 D13 の有無による 2 種類の試験体である。載荷条件として、繰返し荷重やジベル孔径に対する有孔鋼板の移動量をパラメトリックに変えた上で損傷した試験体を準備した。残存耐荷性能の評価方法として、損傷した試験体の静的押抜き載荷試験を実施することで無損傷のケースと比較・考察した。なお、載荷試験には愛知工業大学が所有する疲労載荷試験装置（4830 形制御装置 SHIMADZU サーボパルサ）を使用した。

②繰返し荷重下におけるあと施工アンカーボルト接合部の残存耐荷性能を明らかにするため、要素試験体による繰返し載荷試験および静的引抜き載荷試験を実施した。さらに、数値解析の妥当性を検討するための実験データの蓄積を目的に、境界条件を変えたあと施工アンカー接合部の静的引抜き試験も実施した。本研究で用いた試験体は、設計に基づいた上でコーン状破壊と付着破壊が同時に生じる複合破壊を想定した試験体（モルタル母材（縦 500mm×横 500mm×高さ 300mm）、アンカーボルト（D29、全長 400mm、埋め込み深さ 200mm））とした。載荷条件としては、繰返し載荷方向を引抜き方向とせん断方向の 2 種類、載荷パターンを単調、漸増片振り、漸増両振りの 3 種類、さらに載荷速度を静的と動的の 2 種類とした。残存耐荷性能の評価方法として、①の実験と同様に予め各載荷条件による繰返し載荷試験を実施し、損傷した試験体を準備した。その後、損傷した各試験体の静的引抜き載荷試験を実施することで無損傷のケースと比較・考察した。なお、載荷試験に用いた試験装置は上記の①と同様である。境界条件を変えたあと施工アンカー接合部の静的引抜き試験では、ボルト近傍におけるコンクリート上面の固定方法を 2 種類変えた試験体を準備し、耐荷性能に与える影響について検討した。

③あと施工アンカーボルト接合部の動的耐荷性能を定量的に評価可能な手法を提案するためには鋼・コンクリート間の樹脂による動的付着特性を把握する必要があり、鋼・コンクリート間の動的付着試験を実施した。具体的には、鋼材であるアンカーボルトとコンクリート間をエポ

キシ樹脂により付着させた試験体を製作し、荷重速度をパラメータとした片側引抜き試験を実施することで、荷重速度が付着性能に与える影響やボルトの荷重方向の変化によるポアソン効果が付着性能に与える影響について検討した。なお、荷重試験に用いた試験装置は上記の①、②と同様である。

④目視できない鋼・コンクリート接合部の残存耐荷性能と非破壊試験による出力データの関連性について把握するため、本研究では非破壊試験の一種でボルトの施工不良やコンクリートのひび割れの有無などに定評のある超音波検査に着目した。超音波検査法ではあと施工アンカーボルト接合部に対して接触式と非接触式の2種類の方法による透過法を適用した。計測のタイミングは静的引抜き荷重試験における荷重前、最大引抜き荷重時、終局時の3種類とした。なお、接触式透過法に用いた試験機はマルイのUST、非接触式透過法に用いた試験機はジャパンプローブのJPR-600Cである。非接触式透過法による測定条件として、対象となる試験体には鋼材とコンクリートが含まれているためコンクリートの標準的な周波数の中で大きい100kHzとし、電圧はコンクリートのひび割れ時に透過波を確認できた条件である400Vを設定した。

(2) 解析的研究

既往の研究も踏まえて接着系あと施工アンカーボルト接合部を定量的かつ精度良く評価するためには、鋼・コンクリート間の付着特性を適切に評価する必要がある。そこで本研究では、FEMをベースとしたあと施工アンカーボルト接合部の耐荷性能評価手法について検討した。具体的には、まず鋼・コンクリート間におけるエポキシ樹脂の付着特性を表現可能なモデルを2種類提案した。1つ目は樹脂とコンクリート間におけるコンクリートのひび割れによるせん断破壊を表現したモデルである。2つ目は、ボルト接合部近傍の上面にプレートなどによる圧縮力が作用した場合にはコンクリートが圧縮場であることが予想されるため、コンクリートの静水圧の状況に応じて樹脂とコンクリートの付着強度が変化するモデルである。本研究では、様々な境界条件におけるあと施工アンカーボルト接合部の静的引抜き試験を実施しており、その実験結果と比較することで上記のモデルの有用性について検討した。

4. 研究成果

(1) 実験的研究による研究成果

①繰り返し荷重下における孔あき鋼板ジベルの押抜きせん断試験結果から、繰り返し荷重の大きさやジベル孔径に有孔鋼板の移動量が残存耐荷性能に与える影響について検討した。その結果、繰り返し荷重が大きいケースほど目標とする鋼板の移動量までの繰り返し回数が少ない傾向が得られた。図-1に示すように、ジベル孔径に対して鋼板を1/16程度押抜いたケース(PL60-R-P70-D5)では耐荷力がほとんど変化しなかったのに対して、鋼板を1/8程度押抜いた試験ケース(PL60-R-P100-D10)では貫通鉄筋の有無に関わらず耐荷力が約20%減少することが分かった。さらに、せん断耐力の初期剛性について比較すると、繰り返し荷重試験による影響から貫通鉄筋の有無に関わらず繰り返し荷重試験を実施したケースの方が実施していないケースに比べて高くなる傾向を確認した。ただし、各ケースでバラツキが見られることから、今後も様々な条件下におけるデータを蓄積していく必要がある。

②繰り返し荷重下におけるあと施工アンカーボルト接合部の残存耐荷性能に関する実験では、引抜き方向とせん断方向に対して繰り返し荷重試験を実施し、試験体を損傷させ、静的引抜き試験により残存耐荷性能を確認した。その結果、引抜き方向に関する実験結果では繰り返し荷重の周波数を0.2kHzと2.0kHzで実施した結果、残存耐荷力に対する荷重速度による違いはほとんど見られなかった。一方で、最大荷重時までの剛性に関しては、図-2に示すように荷重速度が速いケース(DT2シリーズ)ほど健全なケース(ST)に対する落差が大きいことを確認した。破壊性状は、実験ケースに関わらずコーン状破壊と付着破壊が生じる複合破壊が見られたが、繰り返し荷重の周波数が速いケースほどコーン状破壊高さの割合が増加し、付着破壊高さが減少することから脆性破壊の危険性が高まることが認められた。

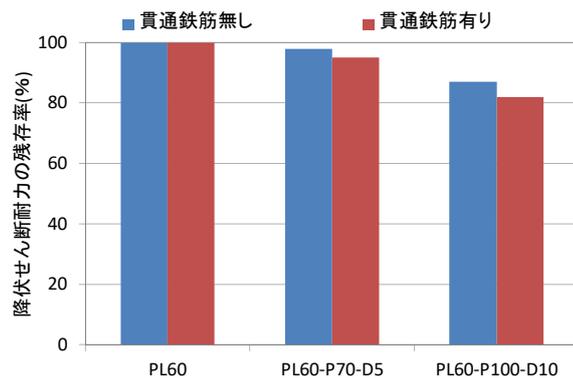


図-1 せん断耐力-鋼板の移動量の関係

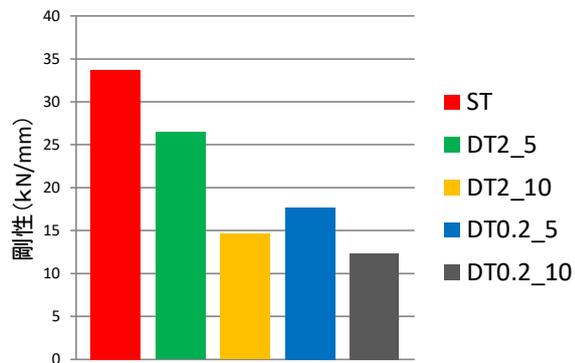


図-2 繰り返し荷重速度による剛性の比較

次に、せん断方向に関する実験結果では、荷重方法を単調荷重、漸増荷重（片振りと両振り）の3種類変え、静的および動的荷重速度によるせん断繰り返し荷重試験を実施した。その結果、引抜き方向の繰り返し荷重試験結果（0.2Hz5mmと10mm）と比較すると、せん断荷重試験結果ではボルト自体の塑性は見られたもののボルト定着部の耐荷性能には荷重方法に関わらず大きく影響しないことを確認した。（図-3を参照）さらに、残存耐荷性能として荷重-変位関係における初期剛性や最大荷重、さらに最大荷重後の減少率に着目し、実験データを分散分析により検討すると、初期剛性や最大荷重に対する荷重方法の影響は顕著に見られなかった。しかし、最大荷重後の減少率に関しては、漸増繰り返しによる両振り荷重試験は他の荷重方法に比べて急激に荷重が低下し脆性破壊する危険性が高いことが分かった。また破壊性状の観点から、単調荷重と漸増繰り返し荷重では試験体上面の破壊性状が静的荷重と動的荷重で顕著に異なることを確認した。

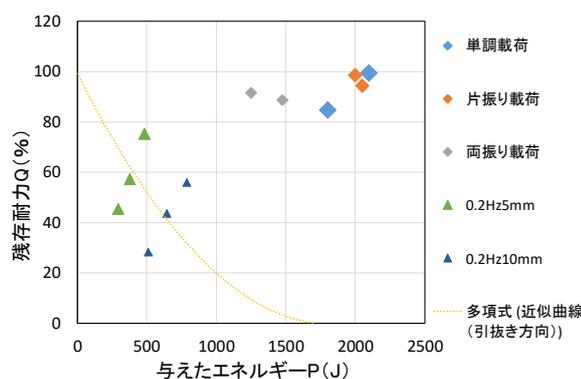


図-3 残存耐力と与えたエネルギーの関係

最後に、境界条件を変えたあと施工アンカー接合部の静的引抜き試験では、ボルト近傍におけるコンクリート上面の固定方法を上面端部の四辺支持とボルト近傍の上面固定で比較した場合、最大引抜き荷重はボルト近傍の上面固定したケースの方が上面端部の四辺支持のケースに比べて約1.6倍大きい結果となった。これは、上面端部の四辺支持のケースは破壊性状として付着破壊とコーン状破壊が表れたのに対してボルト近傍の上面固定のケースではコンクリートの圧縮力が作用する上で付着破壊のみが表れ、付着強度が高くなったものと思われる。ただし、実験結果はボルト径やコンクリート母材寸法は1種類のみであるため、今後も様々な実験ケースによるデータの蓄積が必要である。

③エポキシ樹脂による鋼・コンクリート間の動的付着性能について、片側引抜き試験結果としてボルトの平均ひずみ速度に応じた最大付着応力を図-4に示す。試験機の都合上、道路橋示方書における設計震度レベル1に相当する動的荷重速度による片側引抜き試験を実施したところ、図-4のようにひずみ速度に応じて最大付着応力が変化することを確認した。本研究では、鋼・コンクリート間のエポキシ樹脂の動的付着特性として、付着強度増加率-平均ひずみ速度の関係を定式化しその特性を数値解析に用いる予定だったが、検討したひずみ速度の領域が小さいことから今後設計震度レベル2に相当する荷重速度下における付着性能試験を検討した上で、数値解析への導入を試みる予定である。

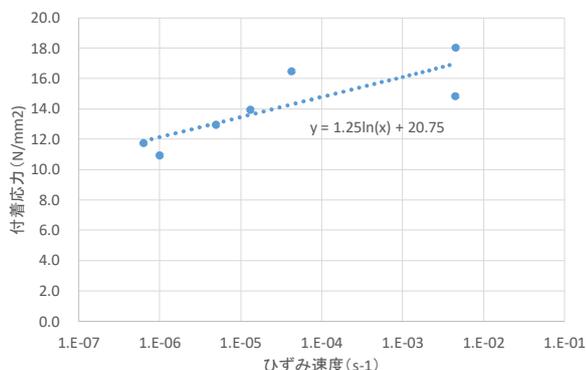


図-4 最大付着応力-すべり量の関係

④ここでは、あと施工アンカーボルト接合部を対象に実施した超音波試験の接触式・非接触透過法の有用性、静的引抜き荷重試験における荷重前、最大引抜き荷重時、終局時と非接触式透過法による出力値との関連性、さらに非接触式透過法による出力値の有用な波形処理方法について研究成果を報告する。

まず、各測定ポイントでのモルタルブロック部分と鋼材部分を比率で分類分けし、それぞれの伝播速度を求め、無次元化した伝播速度-鋼材の割合について実験値と理論値と比較したものを図-5に示す。この図より試験体内部の鉄筋に関する判別および理論値との比較により接触式・非接触式透過法による有用性について検討した。その結果、鋼材が10%以下の箇所では鋼材の割合が増加しても変化が小さいため、モルタルのみ箇所との差がほとんど無いため、試験体内部の鉄筋類の判別に関しては検査方法に関わらず判別することが困難であることを確認した。実験結果と理論値で乖離が生じている理由として、超音波はコンクリートと鉄筋の境界面での反射率は約70%あるため、コンクリートから鉄筋にうまく超音波が伝わらず、伝播

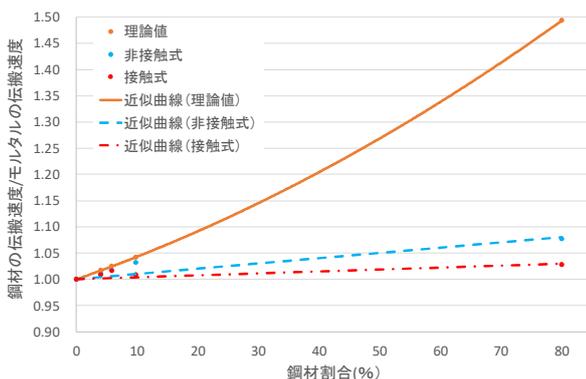


図-5 鋼材の割合に対する伝播速度

速度が理論値ほど速くならなかったと考えられる。また、両者の検査方法における評価の精度について、両者でそれほど精度に差異が見られない結果となったが、熟練度の影響の有無による観点から非接触式透過法の方が接触式透過法よりも有用であると思われる。

次に、静的引抜き荷重試験における荷重前、最大引抜き荷重時、終局時と非接触式透過法による出力値との関連性について述べる。伝搬時間-測定ポイントによるコンター図から荷重前、最大引抜き荷重時、終局時を比較した場合、最大引抜き荷重時や終局時におけるひび割れが発生している箇所とひび割れ幅が8mm以上の透過波が確認できない位置が概ね一致したため、ひび割れの有無は判定可能である。非接触式透過法による伝搬時間-測定ポイントによるコンター図の一例を図-6に示す。しかし、供試体内部の損傷位置やひび割れ方向の判別は極めて難しく、試験結果から残存耐荷性能を直接推測することは困難であることが認められた。

最後に、非接触式超音波試験によるデータの有用な波形処理方法に関する検討では、各周波数のピーク間距離を平均処理した波長と周波数により算出した伝播速度と、各周波数の水平時間の差から求めた個々の波長と周波数により算出した伝播速度の2種類でひび割れを評価したところ、後者の方が前者に比べてひび割れ性状をより定性的に評価可能であることを確認した。

(2) 解析的研究による研究成果

FEMによるあと施工アンカーボルト接合部の耐荷性能評価手法の確立に向けた本研究の研究成果を以下に述べる。鋼・コンクリート間におけるエポキシ樹脂の付着特性モデルとしてせん断モデルと静水圧(体積ひずみ)の状況に応じた静水圧モデルを提案し、②に記述した境界条件を変えたあと施工アンカー接合部の静的引抜き試験結果や単調せん断荷試験結果と比較することで各モデルの妥当性及適用範囲について検討した。

その結果、せん断モデルでは試験体の上面端部を四辺支持した静的引抜き試験による荷重-変位関係を良好に評価可能であるのに対して、ボルト近傍の上面固定した静的引抜き試験では実験よりも過小評価する結果となった。一方で、静水圧モデルによる解析結果に関して、両者の境界条件における荷重-変位関係を良好に再現可能であることを確認した。試験体の上面端部を四辺支持した静的引抜き試験による実験と解析について荷重-変位関係をまとめたものを図-7に示す。実験と各モデルによる解析(最大主ひずみ分布)の破壊性状について比較した場合、せん断モデルの方が静水圧モデルよりも実験結果に近い傾向が表れることが認められた。しかし、解析では付着破壊を模擬したずれ要素同士が接触した状態でせん断変形していくため、ひずみの値がボルト上面に近い要素から徐々に増加する。そのため、実現象と多少異なる傾向が表れることから付着特性を模擬する方法は今後も検討していく必要がある。次に、単調せん断荷試験における実験と数値解析によるせん断荷重-変位関係を図-8に示す。この図より、実験と解析で比較すると剛性に多少差異が見られるものの、静水圧モデルによる解析は実験と概ね

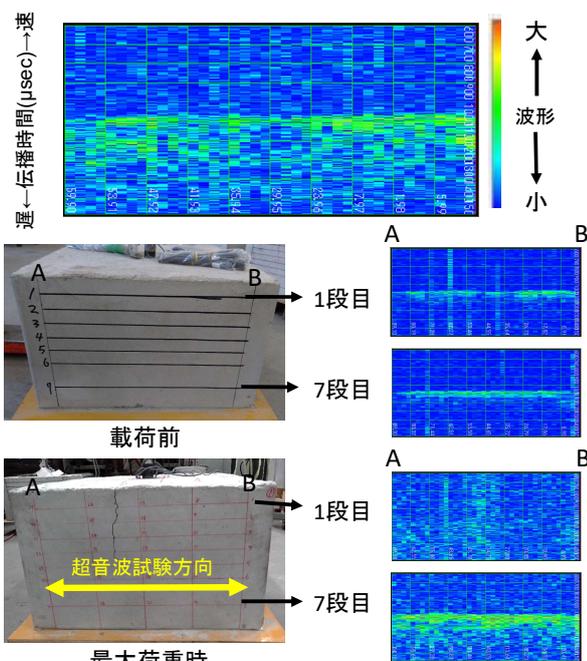


図-6 ボルト接合部の損傷評価(超音波試験)

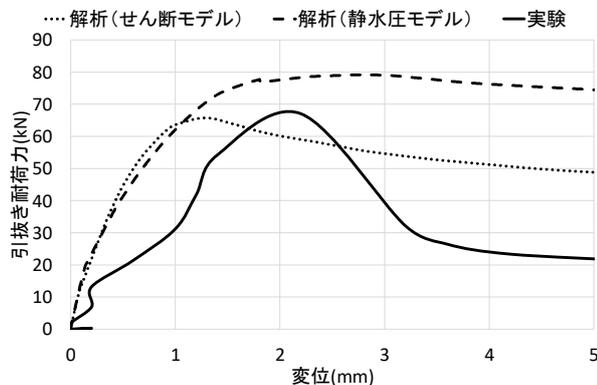


図-7 引抜き耐荷力-変位の関係

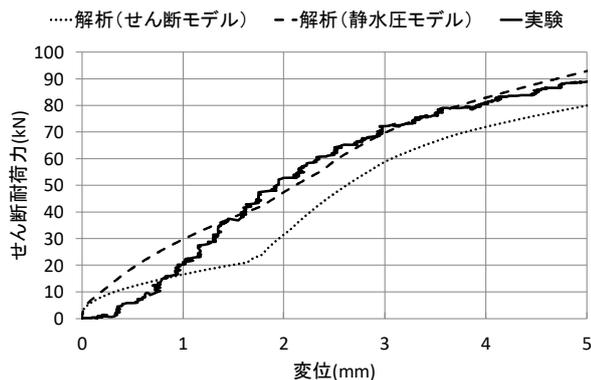


図-8 せん断耐荷力-変位の関係

近い結果が得られた。静的引抜き試験と同様に破壊性状に関して比較すると、実験・解析ともにボルト近傍における供試体表面にひび割れが生じる同様の結果となった。

以上の事から、任意の条件下におけるあと施工アンカーボルト接合部の耐荷性能を定量的に評価するためには、境界条件や載荷条件を変えた解析的検討により鋼・コンクリート間の付着特性に静水圧を考慮したモデルが有用であることが認められた。

<引用文献>

- ①中島章典, 小関聡一郎, 内藤雅人, 中島絢平, 鈴木康夫, 長手方向に複数配置した孔あき鋼板ジベルのせん断力分担に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.996-1006, 2011.
- ②吉田秀典, 高橋恵介, 堺孝司, 超音波法を用いたコンクリートのひび割れ深さの同定に関する研究, 土木学会論文集 No.732, V-59, pp.121-133, 2003
- ③鈴木澄江, 小山善行, 陣内浩, 早川光敬, 圧縮強度試験における荷重速度がコンクリートの圧縮強度と変形状に及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.201-207, 2009

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①近藤駿光, 宗本理, ボルト定着部の定量的耐荷性能の把握に向けた解析的検討, 愛知工業大学研究報告, 査読無, 第 54 号, 2019

〔学会発表〕(計 4 件)

- ①近藤駿光, 宗本理, 鈴木森晶, 嶋口儀之, 載荷条件が鋼・コンクリート定着部の付着特性に与える影響に関する基礎的研究, 土木学会中部支部研究発表会, 2019
- ②池田あすか, 宗本理, 鈴木森晶, 嶋口儀之, 繰り返しせん断力を受けるアンカーボルト定着部の耐荷性能に関する基礎的研究, 土木学会中部支部研究発表会, 2019
- ③近藤駿光, 宗本理, 鈴木森晶, 嶋口儀之, 繰り返し載荷条件を変えたアンカーボルト接合部の耐荷性能に関する基礎的研究, 土木学会中部支部研究発表会, 2018
- ④近藤駿光, 宗本理, 鈴木森晶, 嶋口儀之, FEM によるボルト定着部の破壊性状に関する解析的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018

〔図書〕(計 0 件)

該当無し

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

該当無し

○取得状況 (計 0 件)

該当無し

〔その他〕

ホームページ等

<http://aitech.ac.jp/~s-mune/study/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当無し

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 森晶, 嶋口 儀之, 近藤 駿光, 池田 あすか

ローマ字氏名：SUZUKI, moriaki SHIMAGUCHI, yoshiyuki KONDOU, toshiki IKEDA, asuka

※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。