

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04569

研究課題名（和文）プレキャストコンクリート構造の構造性能最適化に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Basic reserach on optimization of structural performance of precast concrete structure

研究代表者

高橋 良輔（Takahashi, Ryouzke）

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：10371783

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、構造物に適用可能なプレキャストコンクリートの接合面モデルを開発し、そのモデルを適用した構造物のパラメトリック解析によって構造全体の破壊挙動における最適な接合位置についての検討を行うものである。実験において当初の想定とは異なり、鉄筋のダウエルモデルと既往のひび割れ面のせん断抵抗モデルとの重ね合わせでは、プレキャストの接合面の挙動を正しく評価できないことが明らかとなり、構造物のパラメトリック解析の前にその機構を解明することが重要と判断し、研究計画を変更した。本研究では、はりのせん断ひび割れを対象とするひび割れ面のせん断抵抗モデルの計算値よりもせん断抵抗が小さい可能性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当初想定とは異なる接合面のふるまいを解明した上で構造解析を実施するように当初の研究計画を変更したため、本研究の成果は当初計画における想定した成果とは異なる。本研究ははりのせん断ひび割れにおけるせん断抵抗メカニズムと、プレキャスト接合面のひび割れ面におけるせん断抵抗メカニズムが異なることを示した点で学術的に意義ある成果と言える。また、将来のプレキャスト実構造物の設計の実用かに向けて、それに適用することが可能な、十分な精度および信頼性を有するプレキャスト接合面モデルの開発において、解決しなければならない課題を明らかにした点で社会的に有意な成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：Purpose of this research is development of dynamics model of joint surface in precast RC structure for FE analysis and investigation of appropriate position and spec of joint surface of practical precast RC structure by parametric analysis using the model developed. In the experiment for development of the dynamics model, it was clear that summation of dowel action and shear resistance along crack can not evaluate shear behavior of joint surface. Assumption before start of this study was denied by this experimental result. It is so important to develop accurate model of surface joint before numerical investigation by parametric analysis that the research plan was changed.

In this research, the possibility was clarified shear resistance along the crack in precast joint surface is smaller than that along shear crack of RC beam.

研究分野：コンクリート構造工学

キーワード：プレキャストコンクリート 接合面 せん断伝達モデル ダウエルモデル

## 1. 研究開始当初の背景

人口減少に伴う建労働人口の減少は喫緊課題であり、国土交通省も平成 28 年に国土交通省生産性革命本部を設定し、生産性向上を推進している 1)。プレキャストコンクリート(以下 PCa)構造は、工場でコンクリート打設して製作された PCa 製品を、建設現場で打設するコンクリート(以後、場所打ちコンクリート)で一体化した構造である。工程数の減少、気候影響の低減などから、従来のコンクリート構造物に比べ、建設人員削減と施工期間短縮が可能である。また、主要部分を工場で生産管理するため、品質が安定した高耐久な構造物を建設できる。これらの点から、従来のコンクリート構造に比べて、品質を保ちつつ生産性向上を図ることができる構造として、現在、注目されている。また、(公社)土木学会においてもその普及を図るべく、PCa 構造の設計施工指針策定の着手がなされている。

PCa 構造は PCa 製品と場所打ちコンクリートとの接合面を必ず有する。現在の設計思想は、PCa 製品と場所打ちコンクリートを一体化すること、すなわち接合面を剛にして無視できるようにすることである。これは、一体化を担保する接合面の諸元が実験等でわかれば、従来の設計法を適用でき接合面に対する複雑な計算が不要となる長所がある。PCa 構造の接合面に関する既往研究も、多くは一体化に関するものである。一方、一体化の担保のため、接合部に多量の鉄筋を配置する、新規諸元の構造にはその都度実験を必要とするなど、生産性低下を招く短所もある。また、一体化が困難ならば PCa 構造を不採用とすることも考えられる。

そこで、「接合面に新たな役割を与えることができれば、接合面を剛にする必要もなく、PCa 構造のさらなる生産性向上と普及拡大が可能ではないか」と考えた。ここで新たな役割とは、はりや柱の接合部など、復旧に困難な箇所やその損傷が構造物の性能に大きな影響を与える部位の損傷前に、接合面を先行降伏させてその損傷を回避する方法、すなわち、接合面をヒューズとする方法である。さらに PCa 製品の交換が容易な位置に接合面を設けることができれば、構造物の持続的利用にも寄与できる。従来の設計方法ではこの方法は実現困難だが、接合面の挙動の影響を反映した構造全体の挙動シミュレーションが可能なら 3 次元非線形有限要素解析(以下、非線形 FEA)を用いれば、この方法は実現可能である。

また現在、国土交通省では i-Construction を掲げ、建設分野への情報通信技術 (ICT) 導入による生産性向上も推進している。その中で、仮想土木構造物モデルを構築し、ライフサイクル(測量、計画、設計、施工、維持管理)で一貫した情報共有をする方法が提唱されている。本研究では PCa 構造の力学挙動を評価可能な非線形 FEA を構築するが、3DCAD との連携で、これを i-Construction へ直接組み込みできる。この点からも生産性向上に貢献できる。

このような背景から、本研究は従来の接合面への考え方と異なったアプローチで、PCa 構造の普及拡大を図り、土木構造物建設における生産性向上への寄与を試みる研究である。

## 2. 研究の目的

前述の背景から、本研究は当初以下の 2 点を目的とした。

接合面を含んだ PCa 構造物全体の性能評価を 3 次元非線形有限要素解析で可能とする。

従来用いられる性能評価式は、接合面の位置・諸元の影響を部材性能に反映できず、接合面を含んだ PCa 構造物の全体挙動を評価できない。非線形 FEA はこれを可能とするが、確立された接合面モデルは無く、接合面を含んだ部材挙動評価の検証も十分ではない。不足する接合面モデルの開発と部材挙動評価の検証を行い、PCa 構造物の性能評価を可能とする。

接合面にヒューズの役割を与え、PCa 構造物の性能最適化を図る可能性を明らかにする。

目的で開発した非線形 FEA を用いて、PCa 構造物中の接合面の位置・諸元を変えた数値実験を行い、接合面の位置・諸元と構造物の性能の関係を明らかにする。さらに、ヒューズとして接合面が先行損傷する場合の性能を整理して、接合面のヒューズ機能により PCa 構造物の全体性能が最適化可能かどうかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 1. 非線形有限要素解析に適用可能な鉄筋接合のせん断力-ずれ変位関係 (目的①)

接合面は、せん断力と面の直交方向力に抵抗する。非線形 FEA には、接合面各方向の力-変位関係が必要である。プレキャスト構造の接合はコンクリート間の接合であり、その接合面は通常、洗い出し処理がなされている。したがって、ひび割れ前はコンクリートモデルと同様である。また、ひび割れ後においては、基本的に既往の鉄筋コンクリートのひび割れ面のモデルで考慮できると考えられる。このうち、明らかになっていないのがコンクリートに埋め込まれた鉄筋のモデルである。これについては、研究代表者が鉄筋接合の要素供試体を用いたせん断実験で、接合面のせん断力-ずれ変位関係を明らかにしている。しかし、その関係に及ぼす接合面直交方向力の影響は解明が不十分であるうえ、ひび割れ面におけるせん断抵抗との組合せ時に対しての、FEA に適用可能なモデルは確立されていない。そこで、まず鉄筋接合の要素供試体で、ひび割れ面を有し、かつ、接合面直交方向力を制御したせん断実験を行い、せん断力-ずれ変位関係への接合面直交方向力の影響を明らかにし、非線形 FEA に適用可能なモデルとして定式化する。

[ 2年目で明らかにすること・その手法 ]

1. 接合面を有する版部材のせん断挙動 (目的 )
2. FEA による接合版部材の挙動評価の妥当性 (目的 )

本研究の目的の達成のためには、接合面で一体化しない部材の破壊挙動の把握とその場合に適用可能な非線形 FEA 手法が必要である。接合面を有する PCa 構造部材に関する既往の研究は多数あるが、一体化が目的であり、接合面が降伏や破壊に至る場合は少ない上、多方向力が作用するような複雑な環境下を対象としていない。そこで接合面が降伏や破壊に至る場合、さらに多方向力が作用する場合の 2 種類の接合面を有するはり部材の載荷実験と解析を行い、接合面で一体化しない部材の破壊挙動の把握と 1 年目に開発した非線形 FEA 手法の検証を行う。接合面に多方向力が作用するよう、3 次元的な破壊進展を伴う版部材のせん断破壊を対象とし、実験変数は鉄筋量、プレストレス量、接合面位置とする。

[ 3年目で明らかにすること・その手法 ]

1. 構造物全体の破壊を評価可能な指標を明らかにする (目的 )

本研究は、構造物全体の性能の最適化を図ろうと試みる。従って、例えば、破壊は構造物中の各部材の断面力 (モーメント、せん断力、軸力) の低下で捉えるのではなく、構造物全体の破壊を評価できる指標で捉える必要がある。しかし、現在、そのような指標は提案されていない。変形性能も同様である。土木学会コンクリート標準示方書では、非線形 FEA による部材の破壊を判定する指標として、応力やひずみで算出する材料損傷指標を提案している。研究代表者は、鉄道ラーメン高架橋の繰返し載荷解析 (図 5) で、この指標により部材中の破壊箇所の推移を追跡できることを研究で明らかにした (6)。そこで、構造全体の変形や作用力と、材料損傷指標の構造物中の最大値や各部材中の最大値を比較、考察して、構造物全体の破壊を評価可能な指標を明らかにする。

2. 構造性能を最適化する接合面の位置と諸元を明らかにする (目的 )

検証した非線形 FEA 手法を用いて、対象とする 2 種類の接合の諸元と位置を変数とする PCa 構造物の数値実験を行う。本研究は部材の接合部の破壊を防ぐヒューズとして、接合面が機能することを目的とする。そこで、数値実験の対象は、棒部材同士 (柱とはり) の接合を有するラーメン構造物と版部材同士の接合を有するボックスカルバートとする。数値実験で得た結果を、3 年目で明らかにした構造物全体の破壊を評価できる指標と比較し、構造物が最も性能を発揮できる接合面の位置と諸元を明らかにする。

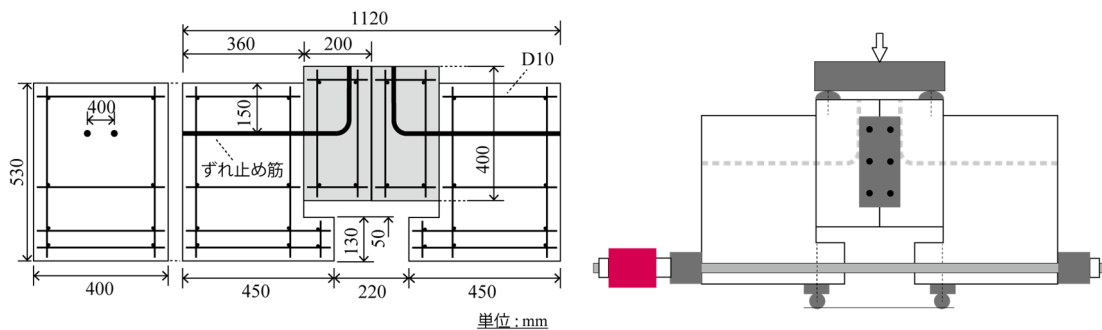
#### 4. 研究成果

##### (1) 洗い出し処理を行った接合面のせん断挙動の解明

本研究では多方向力作用下での接合面モデルの開発が目的である。実構造物のプレキャスト接合部では接合面に洗い出し処理を行っている。そのため接合部においては、最初、一体化したコンクリートのせん断抵抗であり、その後、ひび割れ発生により、鉄筋のダウエル作用とひび割れ面のせん断抵抗の重ね合わせと考えられる。プレキャスト接合面を模擬した供試体 (図 1) のせん断試験 (図 2) により、接合面に摩擦がなく鉄筋のダウエル作用のみで抵抗する場合のせん断力-ずれ変位関係は、既往の研究成果により得られている<sup>1)</sup>。そこで、図 1 と同様の供試体に対し、接合面に洗い出し処理を行ってせん断実験を行った。当初、接合面全面に洗い出し処理を行ったが、試験機の容量である 500kN に至るまでひび割れが生じなかった。そこで、図 3 に示すように部分的な洗い出し処理を行い、再度実験を行った。部分的な洗い出しの寸法は 2 通りとした。

実験での接合面に作用するせん断力と接合面のずれ変位の関係は、図 4 に示す No. 1 のようになった。接合面でのせん断抵抗が鉄筋のダウエル作用のみである既往の実験結果 (NW) と比較すると、初期の傾き変化以降のせん断力の増分がひび割れ面のせん断抵抗によるものであることがわかる。また、今回の実験は既往の実験結果と同様に鉄筋破断で荷重低下したことから、破壊時はひび割れ面のせん断抵抗がほとんどなく、鉄筋のせん断抵抗のみであることがわかる。

すなわち、初期の傾き変化以降のせん断力の増分がひび割れ面のせん断抵抗によるものであることがわかる。また、今回の実験は既往の実験結果と同様に鉄筋破断で荷重低下したことから、破壊時はひび割れ面のせん断抵抗がほとんどなく、鉄筋のせん断抵抗のみであることがわかる。



単位: mm

図 1 せん断実験供試体

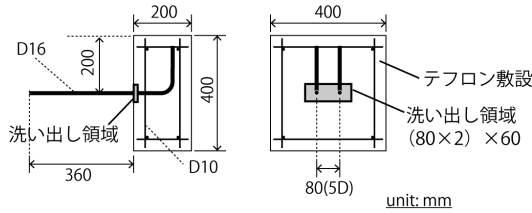


図 3 部分洗い出し面積

図 2 荷荷方法

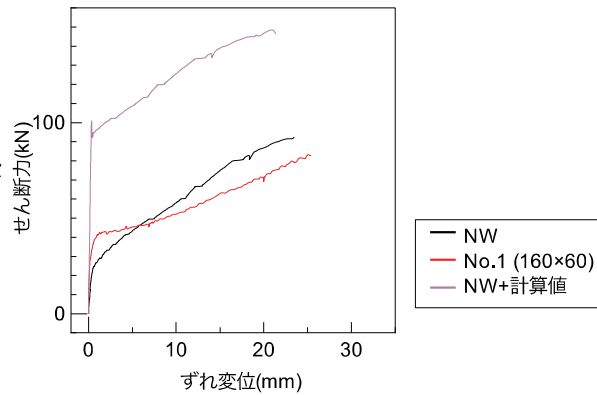


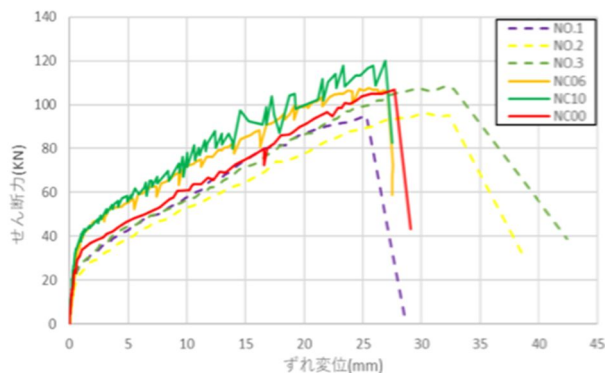
図 4 せん断力 - ずれ変位関係

鉄筋のせん断抵抗のみである既往の実験結果 NW に、既往のひび割れ面に沿ったせん断力伝達モデル<sup>2)</sup>によるせん断力を加えたのが、図 4 の NW+実験値である。なお、せん断力伝達モデルにおけるせん断応力はひび割れ幅とひび割れ面のせん断ずれの関数となっていることから、実験で観測されたひび割れ幅とせん断ずれを適用した。その結果、今回の実験に対して 2 倍以上のせん断力となることがわかる。このことから、プレキャスト接合面においては、単純に鉄筋のダウエル作用と、既往のひび割れ面のせん断モデルによるせん断抵抗を重ね合わせるだけでは過大評価となり、単純に重ね合わせることで評価できないことが明らかとなった。このことは、ひび割れ面のせん断モデルが、鉄筋コンクリートにおけるせん断ひび割れにおける微小なずれ変位を対象としているのに対し、今回の実験が数十ミリと非常に大きいずれ変位を対象としていることに起因する可能性がある。このメカニズムについては今後の検討課題である。

(2) 接合面のせん断力-ずれ変位における接合面直交方向拘束力の影響の解明

接合面のせん断抵抗が鉄筋のせん断抵抗のみである場合を対象とした既往の研究では、接合面にせん断力のみ作用するように荷荷を行っており、それ以外の接合面直交方向の力については制御されていなかった。図 2 の実験方法では供試体が開きが生じることから、開き止めによって拘束力が生じる。既往の実験においても拘束力がわずかながらに生じたことから、構築されたせん断力-ずれ変位関係においては、接合面直交方向拘束力が考慮されている。しかし、大きな拘束力が作用した場合については検証が行われていない。そこで、接合面直交方向に圧縮力を制御しながら作用させる 2 軸のせん断実験を行った。

図 5 はせん断力-ずれ変位関係であるが、図中の NC が今回の実験、No.1~No.3 がせん断力のみ作用させた既往の実験結果である。初期の傾きが増えるせん断力がやや増加しているが、これが圧縮力の影響と思われる。この方向き変化は鉄筋降伏と考えられており、拘束力によって鉄筋降伏時のせん断力が増加するためと考えられる。一方、最大せん断力には拘束力がほとんど影響しないことが明らかとなった。今回、拘束力の異なる 2 種類の実験を行ったがその差はほぼなかった。また既往のせん断力-ずれ変位関係のモデル<sup>1)</sup>に今回の拘束力を適用したところ、概ね実験値に一致し、既往のせん断力-ずれ変位関係の今回の実験範囲に対する適用性が確認できた。



## 図5 せん断力 - ずれ変位関係

### 参考文献

- 1) 高橋良輔, 島弘, 松岡智, 土屋智史: ハーフプレキャスト RC 構造の接合面における接合鉄筋のせん断力 - ずれ変位関係, 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.1, pp.1-14, 2021.
- 2) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技法堂出版, 1991

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〕

〔その他〕

-

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
---------	---------