

	いしはら せいいちろう
氏 名	石原 誠一郎
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成16年3月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和55年3月 東北大学工学部建築学科 卒業
学 位 論 文 題 目	コンクリート打継ぎ部の破壊メカニズムの解明とその応用
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 三橋博三 東北大学教授 杉村義広 東北大学教授 井上範夫 東北大学助教授 金子佳生

論 文 内 容 要 旨

本研究はコンクリート打継ぎ部の破壊メカニズムを解明するために、曲げおよびせん断実験を行い、特にコンクリート打継ぎ部におけるせん断破壊のメカニズムをより精密に検証し、マイクロスコープによるメゾレベルのせん断破壊現象の観察から打継ぎ部の破壊進行域での破壊メカニズムの定性的なモデルを提案するとともに、一体性の高い打継ぎを形成するために必要な要因を明らかにした。

それらの研究成果を踏まえた応用面での研究成果として、逆打ち部を高い一体性で打継げる材料（無収縮高流動コンクリート）の開発を行い、その打継ぎ性能を評価した。

本論文は、6章と付録から構成されている。以下に各章の概要について述べる。

第1章 序論

本章では、コンクリート構造物を構築する上での打継ぎの重要性を示し、特にコンクリートとコンクリートの接合の設計法が従来の強度型から打継ぎ部の応力伝達の理論的モデルに基づいた設計法への転換が求められており、それを確立する上でコンクリート打継ぎ部における破壊メカニズムの解明の必要性について述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章 既往の研究

本章では、コンクリートおよびコンクリート打継ぎ部の破壊特性のうち、主に引張およびせん断破壊に関する既往研究を示し、特にせん断力を受けるコンクリートおよびコンクリート打継ぎ部のひび割れ発生から骨材かみ合いにいたる破壊進行域での破壊メカニズムの研究が世界的にみても、まだ十分な研究がなされておらず、研究課題であることを述べた。

第3章 コンクリート打継ぎ部の破壊挙動とその特性

本章では、まず打継ぎ部の破壊メカニズムのうち曲げ破壊メカニズムの検証を行った。打継ぎ部の目荒し程度が打継ぎ部の曲げ破壊性状に与える影響を探る曲げ破壊実験を行い、目荒しの程度を大きくすることで、曲げ強度も上昇し、中心線平均粗さ R_a が 2mm 程度（目荒し深さで 4~5mm 程度）まで目

荒しすると、一体打ちとほぼ同じ曲げ強度となることを明らかにした。

次に打継ぎ部のせん断破壊メカニズムを検証するため、最初に打継ぎ面の表面粗さを変え、接合筋を直交して配した打継ぎ部のせん断伝達挙動をせん断試験により調査し、接合筋の存在がコンクリートのせん断伝達挙動に与える影響について検討した。次に、鉄筋のせん断抵抗を除き、コンクリートのみのせん断破壊メカニズムを明らかにするため、新たに提案したせん断試験方法による実験を行った。さらに、ノッチ形状を変化させることで破壊の局所化領域を変化させ、一体打ちと打継ぎ部のせん断破壊性状の相違点を調べるとともに、コンクリート打継ぎ部表面の目荒しの粗さが打継ぎ部のひび割れ発生から骨材かみ合いへ至るせん断伝達挙動にどのような影響を与えるかも明らかにした。また、打継ぎ部にプレストレスを与え、その拘束力がひび割れ発生から骨材かみ合いへ至るせん断伝達挙動にどのような影響を与えるかも検討した。それらの検討から以下の事が明らかになった。

- (1) 打継ぎ面に接合筋を配することで打継ぎ面の表面粗さに関わらず、コンクリートのせん断ひび割れ強度が約 20~30%程度低下する。
- (2) 接合筋を配したせん断面では、せん断ひび割れ後、滑り現象の終了までにおいて、ひび割れ面の凹凸のかみ合い機構とは異なるメカニズムにより応力伝達されている。打継ぎ面でのひび割れ界面の接合筋近傍に圧縮ストラットが形成されている可能性がある。
- (3) 打継ぎ面の平滑なコンクリートであっても、接合筋を鉄筋比で 1.34%程度打継ぎ面に配することで、滑りによるせん断抵抗の低下を、接合筋を配していない一体打ちコンクリートと同等以上に押さえることができる。
- (4) せん断応力とせん断変位の関係に段階的変化が見られた。段階的変化は大まかに 4 段階に分けられる。まず、ひび割れ発生前の弾性段階、次にひび割れ伝播段階、三番目はすべり破壊を起こす遷移段階、最後に安定した骨材かみ合い段階である。
- (5) せん断ひび割れ強度は表面粗さにかかわらずほぼ一定の値を示し、さらに一体打ち試験体と同等の値を示す。
- (6) 打継ぎ部の目荒し程度を大きくすることで、すべり破壊後の骨材かみ合い段階開始時のせん断強度を高くすることが出来る。
- (7) 打継ぎ部の破壊進行域ではせん断軟化とせん断伝達の 2 つのメカニズムが同時に進行しているとする破壊メカニズムのモデルを提案した。

第 4 章 コンクリート打継ぎ部のせん断破壊進行域での破壊過程とそのメカニズム

本章では、3 章で提案した打継ぎ部のせん断破壊メカニズムに関するモデルを検証する目的で、せん断試験の破壊想定位置での破壊現象を、メゾレベルの観察を行いながら間接一面せん断試験を行った。メゾレベルで破壊現象を観察するため、試験体の破壊想定位置をマイクロスコープで表面観察した。さらに載荷時の支持条件を変化させ、その破壊挙動に与える影響も合わせて検討した。その結果、以下のような事が明らかになった。

- (1) 一体打ちのコンクリートのせん断破壊メカニズムについては、せん断応力下で、モード I 型の斜めひび割れが主応力軸上に発生し、ひび割れ先端から発生するウィングひび割れにより伝播する。ただ、粗骨材の存在によりコンクリート表面では見かけ上、縦ひび割れが支配的となり、斜めひび割れ群は見られない。さらに、破壊前にノッチ間の全体にマクロレベルのストラットが形成され破壊する。
- (2) 一体打ちと異なり、目荒した打継ぎ部での破壊メカニズムは、荷重がピークに到達後、荷重を保持し

たまません断変位が増大する破壊進行域が観察され、打継ぎ位置よりも目荒した骨材とマトリックスの界面にひび割れが発生し、ひび割れの進展につれメゾレベルのストラットを形成し耐力を保持し、その後、打継ぎ部全体にひび割れが連結し、崩壊する。一方、平滑な打継ぎ部では、打継がれた相互の面に微細な凹凸を形成し、その微細な凹凸相互のかみ合いが発生後、打継ぎ面全体で滑りはじめ一気に崩壊する。

- (3) 既往研究では、一体打ちおよび打継ぎコンクリートのせん断破壊の破壊過程をメゾレベルでのひび割れ観察により連続的に捕えた前例がなく、特に実験の困難な一体打ちコンクリートのせん断破壊の非線形でかつ不安定な挙動を崩壊まで追跡できたことは、コンクリートのせん断破壊研究の貴重な資料になると思われる。
- (4) 打継ぎ部の破壊メカニズムとしては、せん断軟化とせん断伝達の2つのメカニズムが同時に進行しているとするモデルがメゾレベルのひび割れ観察からも裏付けられた。せん断軟化は、目荒し面を打継いだ試験体の破壊進行過程のうち、せん断力によるズレに伴い、打継ぎ位置よりも目荒らした骨材とマトリックスの界面で最初にひび割れが発生し、さらに骨材がマトリックスを押し開いてひび割れが発生し、骨材とマトリックスの界面間の結合力が低下する現象と考えられる。一方、せん断伝達は、界面に生じたひび割れが進展するにつれて、そのひび割れ部にメゾレベルのストラットを形成し、せん断力を伝達する現象であると考えられる。
- (5) 打継ぎ部の一体性を高めるためには、打継ぎ面を目荒し深さで5mm程度目荒しを行い、メゾレベルのストラットを形成し耐力を保持できるようにする必要がある。そのためには、先打ち部のコンクリートに後打ち部のコンクリートを十分に付着させ、ブリーディングによる沈下などにより、隙間を生じさせない必要がある。さらに、一体打ちに比べ、打継ぎ部は破壊進行時の損傷が打継ぎ部に集中しやすく、破壊進行域も小さい。ひび割れが発生後、破壊するまでのひび割れ幅は、一体打ちが0.1mmから0.2mmであるのに対して、打継ぎではその1/10程度であったことから、後打ちコンクリートの硬化後の乾燥収縮を小さくし、収縮による打継ぎ部の剥離を防ぐ必要がある。

第5章 無収縮高流動コンクリートを用いた打継ぎ部の破壊特性とその評価

本章では、無収縮高流動コンクリートで一体化した逆打継ぎ部の力学性状を検証する目的で、無収縮高流動コンクリートを逆打ちした供試体の打継ぎ部の曲げ付着性状を、プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法案に基づいた試験により評価し、一体打ち、順打ちによる供試体と比較した。次に、打継ぎ部のコンクリートのせん断性状をより精密に評価するため、本研究で提案したせん断試験を行い、無収縮高流動コンクリートを逆打ちした試験体の打継ぎ部のせん断挙動を、一体打ち、順打ちおよび無収縮モルタルの充填法による試験体と比較することでその一体性を検証した。その結果、以下の事が明らかになった。

- (1) 逆打継ぎ部の曲げ強度を順打継ぎ部と同等以上に向上させるには逆打ちする後打ちコンクリートを逆打継ぎ面に確実に付着させる必要がある。
- (2) 無収縮高流動コンクリートを平滑面に逆打ちした逆打継ぎ部の曲げ強度は一体打ちの50~60%である。さらに普通コンクリートを順打ちした打継ぎ部に比べ、同等以上の曲げ強度がある。
- (3) 無収縮高流動コンクリートを逆打ちした試験体のせん断ひび割れ強度は普通コンクリートを順打ちした試験体のせん断ひび割れ強度と比較すると同等以上の性能を有することが確認できた。
- (4) 今回の実験の範囲では表面粗さRaの程度にかかわらず、せん断ひび割れ強度はほぼ一定であったことから、打継ぎ部のせん断ひび割れ強度は、表面粗さRaの影響を受けにくいと考えられる。
- (5) 逆打継ぎ部の骨材かみ合い開始時のせん断強度を順打継ぎ部と同等以上に向上させるには逆打ちする

後打ちコンクリートを逆打継ぎ面に確実に付着させる必要がある。

- (6) 本研究で提案したせん断試験方法によって、各種の処理法で打継いだ打継ぎ部におけるせん断挙動について、弾性変形、滑り破壊、骨材かみ合いの各段階での差異を比較的適切に捕えることができた。

第6章 結論および今後の課題

第1章から第5章までのまとめを行い、今後の課題をまとめた。課題としては、以下のような点があげられる。

- (1) 本研究で提案した打継ぎ部の破壊メカニズムのモデルについて、今後、構成則として確立し、コンクリートの解析技術と結びつける必要がある。また、一体打ちの破壊メカニズムについても、適合できるように拡張するための研究を行う必要がある。また、より目荒しの程度の大きい打継ぎ部の破壊メカニズムについても、今後検証していく必要がある。
- (2) 本研究で提案した、鋼棒を配した試験法は無収縮高流動コンクリートを逆打ちした打継ぎ部と各種の処理法で打継いだ打継ぎ部におけるせん断挙動について、弾性変形、滑り破壊、骨材かみ合いの各段階での差異を比較的適切に捕えることができた。今後は鋼棒による拘束度の違い、打継ぎ部の粗度、無収縮高流動コンクリートの膨張高さなど条件の違いによる影響をさらに検証していく必要がある。

なお、付録として開発した無収縮高流動コンクリートに関連した論文および資料を付けた。付録の表題を以下に示す。

- 付1 既往の研究（無収縮高流動コンクリート開発に関連した）
付2 無収縮高流動コンクリートの開発
付3 無収縮高流動コンクリートの実大施工実験による検証
付4 無収縮高流動コンクリートの実物件への適用

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	石原 誠一郎
論文題目	コンクリート打継ぎ部の破壊メカニズムの解明とその応用
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 三橋 博三 教授 杉村 義広 教授 井上 範夫 助教授 金子 佳生

論文審査結果の要旨

本研究は、コンクリート打継ぎ部について精密な曲げおよびせん断実験を行い、マイクロスコープによるメゾレベルの破壊現象の観察により、打継ぎ部の破壊進行域での破壊メカニズムを解明するとともに、一体性の高い打継ぎを形成するための要因を明らかにしている。さらに、それらの研究結果を踏まえた応用として、逆打ち部において一体性の高い打継ぎを実現できる材料（無収縮高流動コンクリート）の開発を行い、その打継ぎ性能の評価をおこなっている。

第1章では、本研究の背景と目的、および論文の構成について述べている。

第2章では、コンクリートおよびコンクリート打継ぎ部の引張およびせん断破壊に関する既往の研究を示し、課題の抽出を行っている。

第3章では、まず打継ぎ部の曲げ性状を実験的に調べ、打継ぎ面の目荒し程度が曲げ性状に与える影響を確認している。次に打継ぎ部のせん断破壊メカニズムについて、拘束鋼棒を配した新考案の試験方法により実験的に調べ、せん断破壊が4つの段階的变化を経て進行することを示すとともに、打継ぎと一体打ちとのせん断破壊性状の相違と、打継ぎ面の目荒し程度および鉄筋が打継ぎ部のせん断破壊性状に与える影響を明らかにしている。さらに破壊進行域におけるせん断破壊メカニズムのモデルを提案している。

第4章では、まず打継ぎ部の曲げ破壊メカニズムをさらに精緻な実験により調べ、破壊進行域での破壊過程を明らかにしている。次に打継ぎ部のせん断破壊メカニズムをプレーンコンクリートの精密なせん断実験により詳細に調べ、破壊進行域での破壊過程を明らかにし、前章で提案したモデルの検証を行うとともに、打継ぎ部の一体性を高めるための要因を抽出している。

第5章では、前章で示された要因を踏まえて開発した無収縮高流動コンクリートにより打継いだ逆打継ぎ部の一体性の評価を行っている。

第6章は、結論であり、本研究を総括している。

以上要するに本論文は、コンクリート打継ぎ部の破壊メカニズムを解明し、打継ぎ部の一体性を向上させる要因を明らかにするとともに、それらの研究成果を応用し、新たな打継ぎ材料を開発しており、建築学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成16年2月17日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに学力確認のための試問を行った結果、本人は建築学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英文の学術論文に対する理解力および英語論文の作成力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

本研究は、コンクリート打継ぎ部について精密な曲げおよびせん断実験を行い、マイクロスコープによるメゾレベルの破壊現象の観察により、打継ぎ部の破壊進行域での破壊メカニズムを解明するとともに、一体性の高い打継ぎを形成するための要因を明らかにしている。さらに、それらの研究結果を踏まえた応用として、逆打ち部において一体性の高い打継ぎを実現できる材料（無収縮高流動コンクリート）の開発を行い、その打継ぎ性能の評価をおこなっている。

第1章では、本研究の背景と目的、および論文の構成について述べている。

第2章では、コンクリートおよびコンクリート打継ぎ部の引張およびせん断破壊に関する既往の研究を示し、課題の抽出を行っている。

第3章では、まず打継ぎ部の曲げ性状を実験的に調べ、打継ぎ面の目荒し程度が曲げ性状に与える影響を確認している。次に打継ぎ部のせん断破壊メカニズムについて、拘束鋼棒を配した新考案の試験方法により実験的に調べ、せん断破壊が4つの段階的変化を経て進行することを示すとともに、打継ぎと一体打ちとのせん断破壊性状の相違と、打継ぎ面の目荒し程度および鉄筋が打継ぎ部のせん断破壊性状に与える影響を明らかにしている。さらに破壊進行域におけるせん断破壊メカニズムのモデルを提案している。

第4章では、まず打継ぎ部の曲げ破壊メカニズムをさらに精緻な実験により調べ、破壊進行域での破壊過程を明らかにしている。次に打継ぎ部のせん断破壊メカニズムをプレーンコンクリートの精密なせん断実験により詳細に調べ、破壊進行域での破壊過程を明らかにし、前章で提案したモデルの検証を行うとともに、打継ぎ部の一体性を高めるための要因を抽出している。

第5章では、前章で示された要因を踏まえて開発した無収縮高流動コンクリートにより打継いだ逆打継ぎ部の一体性の評価を行っている。

第6章は、結論であり、本研究を総括している。

以上要するに本論文は、コンクリート打継ぎ部の破壊メカニズムを解明し、打継ぎ部の一体性を向上させる要因を明らかにするとともに、それらの研究成果を応用し、新たな打継ぎ材料を開発しており、建築学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。