
バンドン工科大学（インドネシア） 研修報告書

画像相関法を用いた RC 梁部材の微細ひび割れとひずみ度分布評価

工学研究科 建築学専攻 織邊 雄哉

1. はじめに

2019 年 9 月 9 日から同年 10 月 4 日の間、インドネシアのバンドン工科大学において共同研究を行い、以下にその報告を行う。

2. 研究課題の決定

本研究室では、RC 構造物の地震時挙動把握および耐震性能評価に関する研究を行っています。バンドン工科大学の Aryanto Aris 講師は RC 構造の研究を行っており、画像相関法を用いた損傷解析により得られる知見を元に、インドネシアの RC 構造の耐震設計技術を向上させたいと考えています。そこで、RC 梁部材の破壊性状を詳細に把握するため、バンドン工科大学の保有する実験装置、技術を互いに補完しながら共同で研究することで、RC 構造物のさらなる発展を期待し、決定しました。

3. 研究スケジュール

9 月 8 日 出国（広島空港－羽田空港）
9 月 9 日 入国（羽田空港－スカルノハッタ国際空港（ジャカルタ）－バンドン）
9 月 10 日～9 月 13 日 現地の学生の画像解析の理解
9 月 16 日～9 月 23 日 実験準備
9 月 24 日～9 月 25 日 実験
9 月 26 日～10 月 4 日 実験結果の総括、画像解析
10 月 5 日 出国（バンドン－スカルノハッタ国際空港（ジャカルタ）－羽田空港）
10 月 6 日 帰国（羽田空港－広島空港）

4. 派遣先概要

大学名：Institut Teknologi Bandung, ITB

所在地：Jl. Ganesha No.10, Siliwangi, Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, INDONESIA

指導教員：Aris Aryanto, lecturer

所属：Faculty of Civil Engineering and Environmental Engineering

バンドン工科大学は QS 世界ランキング¹⁾においてインドネシア国内 2 位で、国内における最も優れた理工系大学と評価されている。また、著名な卒業生にはインドネシア初代大統領のスカルノ氏がいる。

5. 研究内容

5.1 研究背景および研究目的

RC 造建物の耐震安全性を確保するためには、RC 造部材の構造性能を把握しておくことが重要です。RC 部材の耐震性能を把握するためには、実際の構造物を模擬した試験体による構造実験を実施し、その破壊性状を考察します。インドネシアでは近年地震が頻発しており、早急にインドネシアの RC 部材の構造性能把握が必要です。特に、インドネシアの RC 部材の構造性能は施工性が悪く、設計通りの強度が発揮されない可能性があり、破壊性状を詳細に調査する必要があります。その中で近年、画像相関法を用いた損傷分析が主流となりつつあります。画像相関法を用いた評価方法とは試験体につけた細かい斑点を部分的に集合化し、デジタルカメラを使って、その形の変形や移動を計測することによりひび割れやひずみ度分布を解析するものです。しかしながら、インドネシアのような発展途上国においてはその費用などがネックとなり、十分な実験や分析ができない状況にあります。

そこで、本研究では画像相関法を用いた評価方法を現地でつくられた RC 梁部材の構造実験において適用し、これまで分析が困難であった微細なひび割れの分析を可能とするとともに、インドネシアの RC 構造における重要な知見を収集することを目的とした。

5.2 実験概要

5.2.1 試験体概要

Table5.2 に本実験での試験体パラメータ、Fig. 5.2.1 に RC 試験体の断面図および配筋図を示す。

試験体形状は各断面 $b \times D = 150 \times 150(\text{mm})$ 、部材長さ $L = 450(\text{mm})$ で、せん断スパン比 $M/QD = 2.0$ である 4 体を設計した。コンクリートには普通コンクリートとファイバーコンクリートを用い、 $F_c = 50(\text{N/mm}^2)$ を目標とした。配合は水セメント比が 32%，セメント：細骨材：粗骨材 = 1：1.30：1.26 であった。また、主筋には、D13(BJTD40)の鉄筋を用いた。

5.2.2 荷重方法

Fig. 5.2.2 に荷重方法を示す。試験体はアムスラー圧縮試験機に設置し、単調荷重方式でせん断スパン 150mm の 4 点曲げ荷重（支点 2 点，作用点 2 点）を行った。加力は破壊状況を確認するため、試験体 NF, F では 2.0kN ごと，試験体 NFR, FR では 25kN ごとに荷重をコンピューター（DARTEC SOFTWARE）により制御した。荷重は，試験体の耐力が急激に低下するか，最終破壊が確認できるまで行った。

5.2.3 計測方法

Fig. 5.2.2 に示すように，水平変位は X1 より，鉛直変位は Y1 から Y4 の値より計測した。

Fig. 5.2.3 にコンクリートのひずみゲージの貼付位置を示す。貼付位置は曲げモーメントが最大となる中央では 1 軸，圧縮ストラット機構が働く付近では 3 軸ひずみゲージを貼付した。

ひび割れ幅測定はクラックスケールおよびマイクロスコプを用いて行い，曲げひび割れおよびせん断ひび割れを対象とした。

Fig. 5.2.5 に設置風景を示す。本研究では，試験体のサイズが小さいことを考慮して，カメラは 1

Table5.2 試験体パラメータ

試験体	ファイバー	主筋
NF	-	D13(BJTD40)
F	有	
NFR	-	
FR	有	

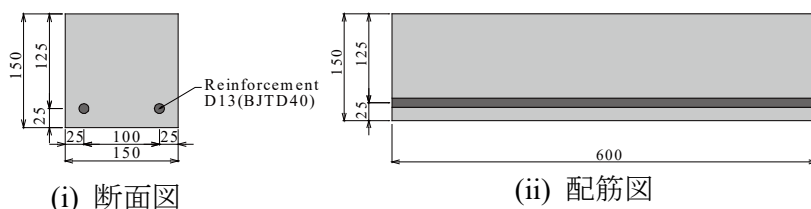


Fig. 5.2.1 RC 試験体

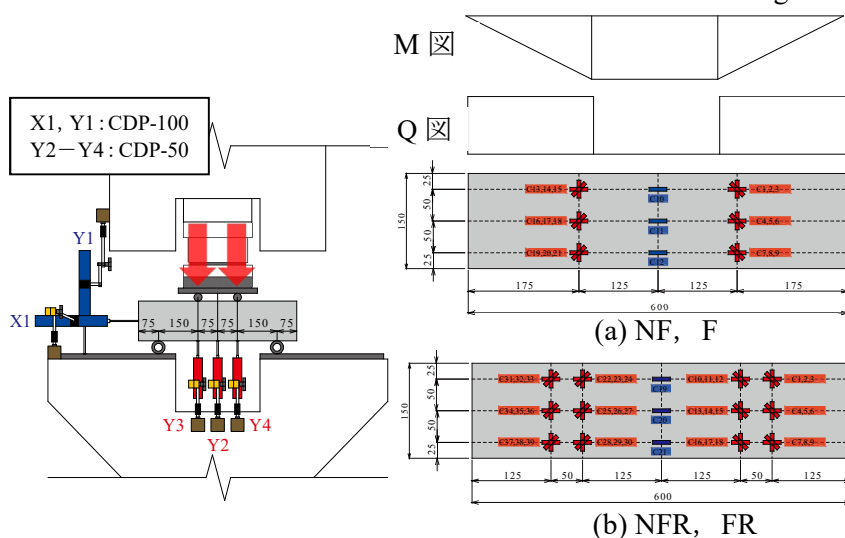


Fig. 5.2.2 荷重方法

Fig. 5.2.3 ひずみゲージ位置



Fig. 5.2.4 斑点

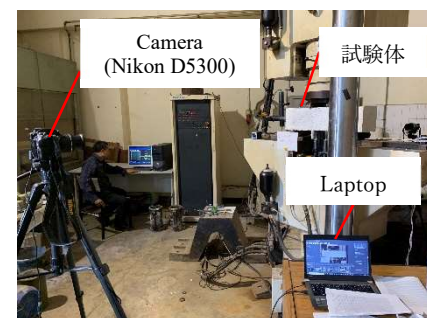


Fig. 5.2.5 画像解析

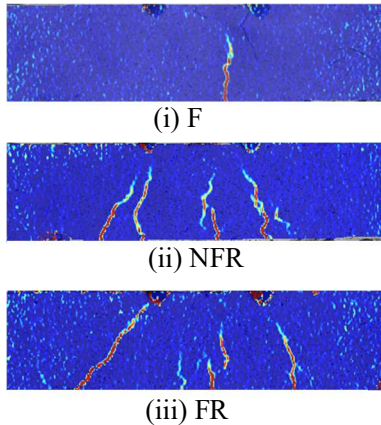


Fig. 5.3.1 画像解析結果

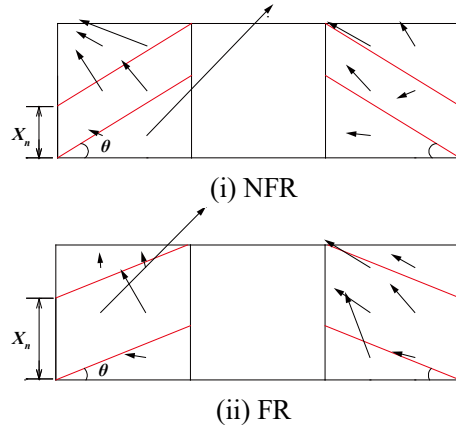


Fig. 5.3.2 圧縮ストラット形状

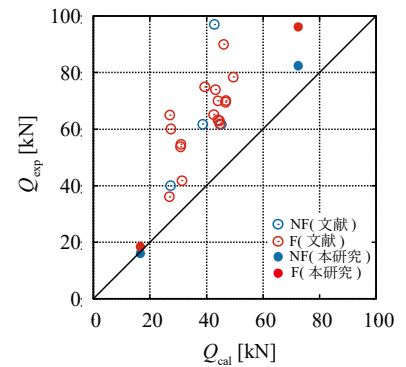


Fig. 5.3.3 耐力比較

台 (Nikon D5300²⁾ のみ) とし, **digicamControl**³⁾を用いて目標荷重ごとに遠隔に撮影した。

画像解析は, Fig. 5.2.4 のように試験体につけた細かい斑点を部分的に集合化し, デジタルカメラを使って, その形の変形や移動を計測することによりひび割れやひずみ度分布を解析するものである。そこで, 本研究ではノズルの穴をドリルで 1.5mm 程度に広げ, 画像解析を行う試験体表面に疎らになるまでスプレーを行った。

5.3 実験結果

5.3.1 破壊性状

Fig. 5.3.1 に試験体 NFR, FR の画像解析結果を示す。

試験体 NF, F ではそれぞれ最大耐力 $Q_{max}=32.1\text{kN}$, 37.0kN に達し, 試験体中央の曲げひび割れの拡幅から曲げ破壊した。試験体 NFR, FR ではそれぞれ最大耐力 $Q_{max}=164.8\text{kN}$, 192.3kN に達し, せん断ひび割れの拡幅によって, 試験体の耐力が急激に低下した。繊維補強した試験体は, 無補強試験体より最大耐力および限界変形角が大きく, 架橋効果による靱性の向上を確認した。

Optecal⁴⁾による画像解析を行うにあたり, 解析条件は全試験体で Seed 範囲を 500(pixels), 部分集合の大きさを 45(pixels), 間隔を 13(pixels)とし, 各試験体で 14 個の Seed を等間隔に配置した。画像解析結果は, 全試験体でひび割れ挙動を正確に評価しており, 微細なひび割れを確認できた。しかしながら, ひび割れが拡幅した後は試験体につけた斑点の変形や移動が過大となり, 斑点を検出できなかったと考えられるため, 画像解析ではひび割れを精度良く評価できなかった。

5.3.2 圧縮ストラット形状

Fig. 5.3.2 に試験体 NFR, FR の圧縮ストラット形状を示し, 矢印の向きは応力の方向, 長さは応力の大きさを表す。また, X_n は中立軸位置, θ は圧縮ストラット機構の角度を表す。

いずれの試験体も応力が大きくなっている箇所において, せん断ひび割れが拡幅したことが確認できた。繊維補強した試験体は無補強試験体より圧縮ストラットの角度が大きく, ストラットの形状は太くなり, それに伴い中立軸位置も大きくなった。また, 応力の大きさは左右非対称となっており, せん断ひび割れが拡幅した側では応力の向きはばらばらであったが, もう一方の方では応力がすべて概ね同じ方向であった。

5.3.3 耐力比較

Fig. 5.3.3 に耐力比較を示し, 本研究および日本における既往の研究^{5)~7)}での試験体を対象とした。曲げ破壊試験体では曲げ耐力, せん断破壊試験体では荒川 mean 式⁸⁾によるせん断耐力と比較した。

試験体 NF を除いた各試験体において, 実験値が計算値を上回り, その余裕度は試験体 F で 1.12 倍, 試験体 NFR で 1.14 倍, 試験体 FR で 1.33 倍となった。試験体 NF は, 実験値が計算値を下回り, 荷重上昇の途中で止めたことが原因と考えられ, さらに耐力の向上が期待できる。試験体 NF を除いたそれぞれの試験体において, 日本での設計基準である強度を十分に満たしていた。また,

日本の既往の試験体と比較すると、現地でつくられた試験体は日本のものと同等の余裕度を有していた。

6. まとめ

- 1) 現地でつくられた試験体の水セメント比は 32%で、日本の指針に示される制限値 65%を満たしていた。また、日本では一般的にセメント：細骨材：粗骨材=1：6：3 とされているが、1：1.30：1.26 と細骨材および粗骨材の量が比較的少なかった。
- 2) 繊維補強した試験体は、無補強試験体より最大耐力および限界変形角が大きく、架橋効果による靱性の向上を確認した。
- 3) Optecal による画像解析は、ひび割れ挙動を正確に評価しており、微細なひび割れを確認できた。しかし、ひび割れが拡幅した後は画像解析ではひび割れを精度良く評価できなかった。
- 4) 一部を除いて現地でつくられた試験体は、日本での設計基準である強度を十分に満たしており、日本の試験体と同等の余裕度を有していた。

7. 謝辞

本研究において、現地でご指導頂いた Aris Aryanto 講師，研究のみならず現地生活でお力添えを頂いた Messa Revolis さんをはじめとした現地の学生の方々に感謝の意を表します。また、このような貴重な機会を与えて下さった日比野 陽准教授に厚く御礼申し上げます。最後になりましたが、海外共同研究プログラムに参加するに至り、ご尽力頂いた山本 元道教授，陸田 秀実准教授をはじめとした諸先生方，富永様をはじめとした工学学生支援グループの国際事業担当の皆様に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) QS World University Rankings 2019 : <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/2019>
 - 2) Nikon：製品情報－D5300, <https://www.nikon-image.com/products/slr/lineup/d5300/>
 - 3) DigiCamControl：Downloads, <http://digicamcontrol.com/download>
 - 4) OpteCAL：home, <http://optecal.com/>
 - 5) 宋戸薫，猪狩旦夫，関口幹夫：鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の曲げ降伏，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.1，No.0，pp.373-376，1979
 - 6) 喜多俊介，小室文也，二羽淳一郎：短繊維補強された RC 部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1717-1722，2003
 - 7) 児玉亘，大寺一清，二羽淳一郎：短繊維補強された RC はりのせん断耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1501-1506，2004
 - 8) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：建築物の構造関係技術基準解説書，2015
-