

研 究 報 告

令和 7年 4月 24日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 名古屋大学

氏 名 : 日比野 陽

研究課題名 : 地震時損傷を受けた基礎構造部材の土中環境による構造性能変化

助成金額 : 100万円

研究実施期間 : 自 令和6年4月1日 ~ 至 令和7年3月31日

地震時損傷を受けた基礎構造部材の土中環境による構造的な性能変化

Structural Performance Change due to Soil Environment on Foundation Members Damaged by Earthquake

名古屋大学 准教授 日比野陽

(研究計画ないし研究手法の概略)

【研究の背景及び目的】

杭頭接合部などの基礎構造部材は、実験的知見の不足や法令の整備が遅れていることを起因として、耐震性能の不足が確認されている¹⁾。基礎構造の地震被害が建物の被害として顕在化している場合は、補強や補修によって建物の耐力確保が可能であるが、地震被害を受けた基礎構造が被害の確認がされないまま地中に留まる場合には、外力や土中環境により、残留ひび割れ幅の拡大等が生じ、構造的な性能が変化する可能性がある。基礎構造を含む鉄筋コンクリート部材では、繰返し载荷により残留ひび割れが増加し、部材角が大きくなるほど最大ひび割れ幅となるひび割れに変形が集中することなどが確認されている²⁾。土中環境にありかつ、荷重状態が変化する基礎構造部材の残留ひび割れ性状が構造耐力に及ぼす可能性は少なくなく、最終的には上部構造の地震応答性能に影響を及ぼすことも考えられる。



図1 地震による基礎被害³⁾

そこで本研究では、地震時損傷後の影響による上部構造の耐震性能への影響を明らかにすることを目的とし、地震時損傷を受けた基礎構造部材の土中環境による構造的な性能変化を定量的に明らかにすることを目的とする。

【研究手法】

本研究では基礎構造部材の地震時損傷後の残留ひび割れ性状と構造的な性能への影響を定量化するため、RBSM(Rigid-Body-Spring Model)⁴⁾による解析を行った。土中環境変化により、残留ひび割れ幅が変化する性状を想定し、各条件下における耐力への影響を定量的に考察した。

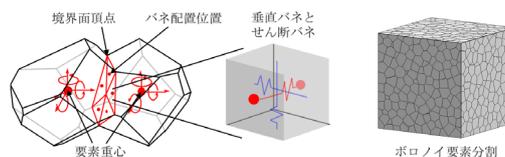


図2 3次元剛体バネモデル⁴⁾

RBSMとは、解析対象を多数の剛体から構成されたと考え、ボロノイ分割によって生成したランダムな形状の剛体要素と要素間に配置したバネによって離散化するモデルである(図2)。本手法は、RC部材のひび割れ進展やせん断破壊挙動を高い精度で再現できることが検証されている⁴⁾。

図2のように、各要素の重心に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面の重心と頂点から形成される3角形の重心位置にバネを配置する。バネ系は、コンクリートの圧縮・引張挙動をモデル化した垂直バネ1個と、せん断すべり挙動をモデル化したせん断バネ2個で構成される。バネ系にてモデル化する構成モデルを図3に示す。垂直バネの引張挙動は、図3(a)に示すように、引張挙動に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギーによって

軟化勾配を変化させる 1/4 モデルに従って応力を低減するモデルとした。垂直バネの圧縮モデルは、図 3(b)に示すように 2 つの 2 次関数を用いた逆 S 字曲線でモデル化した。このように圧縮破壊は通常引張とせん断の挙動の組み合わせで生じると仮定することで、圧縮バネの構成則を拘束応力により変化させなくても、圧縮応力下の拘束効果を自動的に精度よく再現できるモデルとなっているなど、通常の有限要素法とは異なる特徴を有している。せん断バネの挙動は、図 3(c)に示すように、せん断強度に達するまでは線形とし、その後はせん断ひずみの増加に応じて軟化するモデルとした。

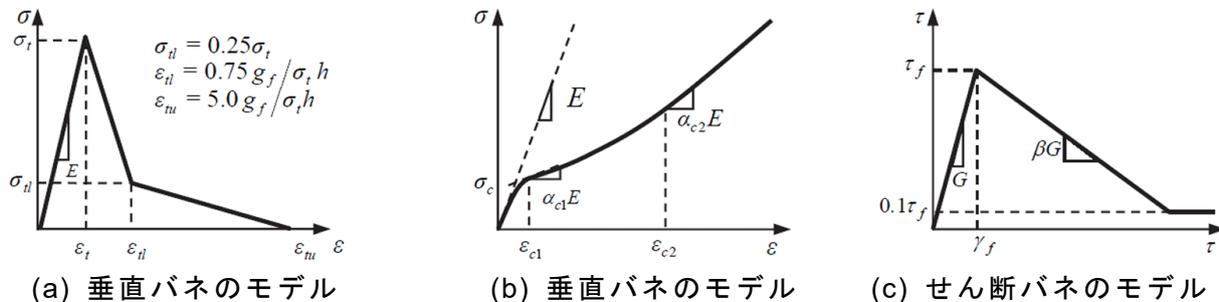


図 3 コンクリートの構成モデル⁵⁾

【解析概要】

本研究では、河村らが実施した基礎梁の荷重実験⁶⁾に使用した試験体を参考にし、RBSM による解析モデルを作成した。この実験は、棒状補強材を用いたせん断破壊挙動に焦点を当て、スターラップ形状による影響を比較するために行った。対象とした試験体は、基礎梁を想定した幅 200mm×高さ 400mm×全長 2,400mm の鉄筋コンクリート造部材であり、せん断スパン比 $a/d=2.86$ 、引張鉄筋比 $p_t=1.84\%$ である。実験では、中央 1 点での静的単調荷重を行っている。コンクリート強度 f_c は 20.3 N/mm²、せん断補強筋 D10(SD295)の降伏強度 f_y は 370 N/mm²、鉄筋比 p_w は 0.36 % である。

解析モデルの要素平均寸法は 20mm として、要素数は 15,795 個、バネ数は 547,405 個である。この実験結果を、RBSM を用いて再現できることを確認した上で、ひび割れ制御をした解析を行った。

ひび割れ制御に関しては、土粒子のひび割れ間への侵入や、地震による繰返しの荷重による残留ひび割れなどの土中環境で生じ得る複合的な環境変化を仮定し、再現するために、一定幅以上のひび割れが閉じないように設定した。本研究では、制御する残留ひび割れ幅（以下、制御ひび割れ幅）を変えた時の挙動の比較を行った。

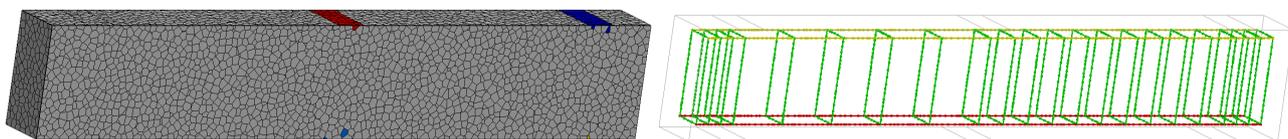


図 4 解析モデル

(実験調査によって得られた新しい知見)

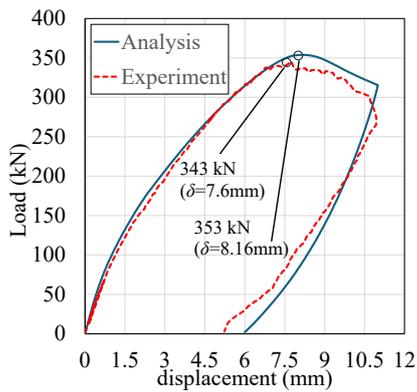
【解析結果】

・荷重－変形関係

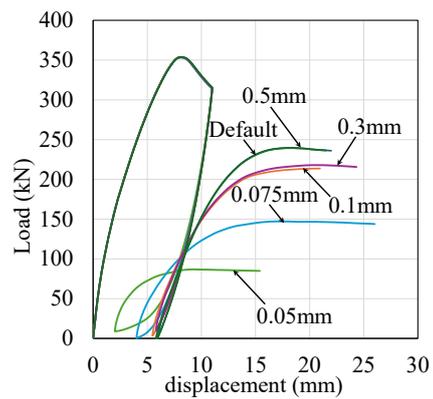
図 5 に解析結果を示す。図 5(a)は実験と解析の荷重－変形関係である。解析が実験を良好に再現できていることが確認できる。

図 5(b),(c)は制御ひび割れ幅を変化させた場合の荷重－変形関係である。図 5(b)は最大耐力後、耐力が 90%に低下した時点で、図 5(c)は最大耐力に達する前の最大耐力の 80%に達した時点で除荷したものである。

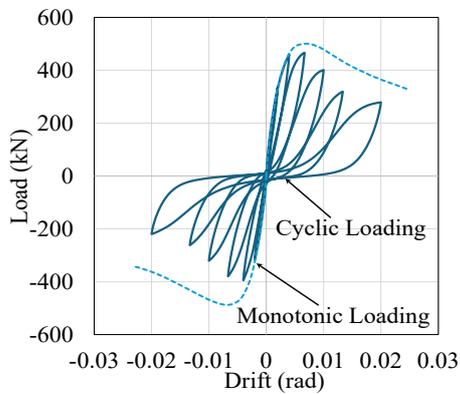
最大耐力後に除荷した場合、0.5mm以上のひび割れが少ないため、制御ひび割れ幅が 0.5mmの場合では制御しないケースとほぼ変わらなかった。制御ひび割れ幅が 0.3mm以下になると再載荷後の耐力が低下し始める。最大耐力前に除荷した場合、制御ひび割れ幅 0.025mmで耐力が 80%まで低下した。図 5(d)は、正負繰返し載荷時の解析結果である。正負繰返し載荷のケースでは、解析の都合上、支点条件を変更しているため剛性は異なる。繰返し載荷下では、残留ひび割れが生じ、残留ひび割れが拡散することにより、政府の繰返し荷重により耐力低下する。



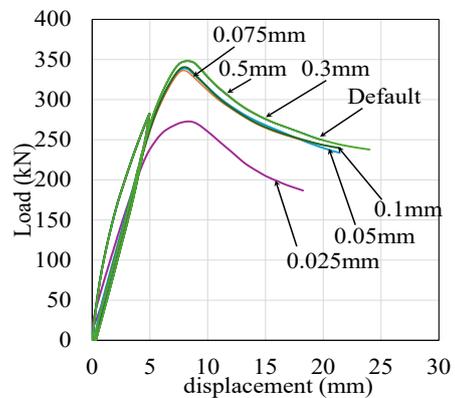
(a) 実験と解析の比較



(b) 制御ひび割れ幅による違い (最大耐力後除荷)



(c) 制御ひび割れ幅による違い (最大耐力前除荷)



(d) 正負繰返し載荷時

図 5 荷重－変形関係

・ ひび割れ図と応力図

図 6 に最大耐力後に除荷したケースの各制御ひび割れ幅における除荷前と再載荷後の応力図、除荷前と除荷後のひび割れ図を示す。それぞれ、上図が除荷前、下図が除荷時、もしくは再載荷時のものである。

制御ひび割れ幅が小さくなるにつれ、除荷時のひび割れが増加することがわかる。制御ひび割れ幅 0.05mm以下のケース(図 6(b)(d))では、除荷時に縦方向のひび割れが生じている。これはひび割れが閉じないことにより、応力伝達経路が変化したためであると考えられる。これにより、制御なしと比較して、再載荷時に応力伝達ができず耐力が大きく低下している。

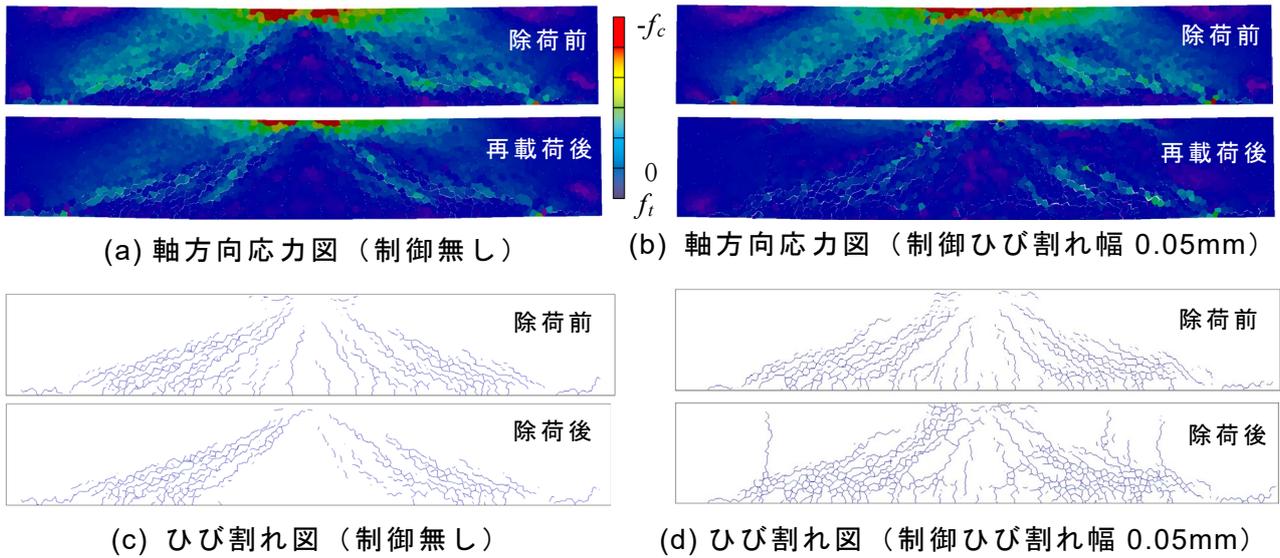


図6 応力図とひび割れ図

・制御ひび割れ幅と耐力低下率

図7に、制御ひび割れ幅と再載荷後の耐力低下率を示す。耐力低下率とは制御無しの場合の耐力に対する耐力の低下割合である。除荷前の最大ひび割れ幅の違いを考慮するために、梁せいを变化させたケースで解析を行った。破線は梁せいを半分にした場合の解析結果である。

最大耐力前に除荷したのものに関しては、梁せいに関わらず同じ挙動を示しているが、最大耐力後に除荷したのものに関しては、梁せいを1/2にすると、制御ひび割れ幅が比較的大きい段階において、耐力が低下した。これは、梁せいを小さくしたことにより、変形が大きくなり、除荷前時点におけるひび割れ幅が大きくなったためである。また、最大耐力後の除荷に関して、制御ひび割れ幅が0.075mm以下になると大幅に耐力が低下する。この一因として、前述した縦方向のひび割れが影響していると考えられる。

図8に、耐力低下率と制御ひび割れ幅の最大ひび割れ幅に対する比との関係を示す。図より、制御ひび割れを基準化して評価すると、梁せいに関わらず、最大ひび割れ幅の約3%を下回ると、耐力低下が30%以上低下することがわかる。

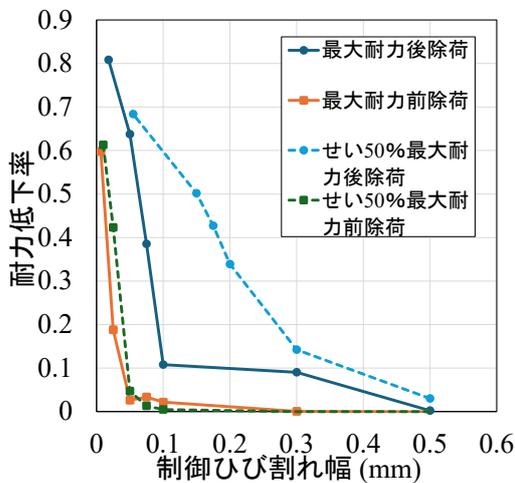


図7 制御ひび割れ幅と耐力低下率

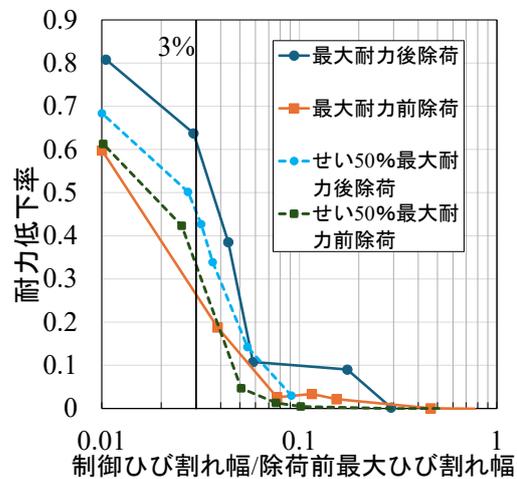


図8 基準化制御ひび割れ幅と耐力低下率

【結論】

本研究では土中環境でひび割れが閉じない事象が起こるという仮定のもと、残留ひび割れとその後の基礎構造部材の耐力を解析により考察し、以下の知見を得た。

- (1) 繰返し載荷時では、ひび割れが閉じないため、残留ひび割れの増加とともに耐力が低下する。
- (2) 残留ひび割れが閉じない場合、再載荷時の応力伝達経路が変化し、再載荷後の構造性能が変化する。
- (3) 閉じない残留ひび割れ幅を変化させた場合、閉じないひび割れ幅を小さくするにつれて最大耐力の低下が大きくなる。除荷前の最大ひび割れ幅に対して制御ひび割れ幅が約3%以下の場合、耐力が30%以上低下する。

【参考文献】

- 1) 国立研究開発法人建築研究所：大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究，建築研究資料，No.195，2019.10
- 2) 高橋ら：鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.859-864，2009
- 3) 国土交通省：大地震後の継続使用性に資するコンクリート杭および杭頭接合部の技術開発，H29年度住宅・建築物技術高度化事業，2017.9
- 4) 山本佳士：RBSMを用いたRC構造物の解析技術の現状と将来，コンクリート工学，Vol.56，No.9，pp.794-800，2018
- 5) 山本ら：3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.612-630，2008
- 6) Kawamura, K: Experimental study on the effect of different shear reinforcement shapes on shear failure behavior and internal crack pattern of RC beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, No.1, pp.82-94, 2018

(発表論文)

丹羽優紀，日比野陽：鉄筋コンクリート基礎部材の残留ひび割れ性状が構造耐力に及ぼす影響，2025年度日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），2025.9（投稿中）