

構造物の破壊挙動に与える材料特性 のばらつきの影響

齋藤 康裕¹・目黒 公郎²

¹ 学生員 工修 東京大学大学院

(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

² 正会員 工博 東京大学 生産技術研究所

(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

鉄筋コンクリート(RC)はコンクリートと鉄筋から構成される複合材料である。これらの材料は打設時の環境、配筋のずれや経年変化等により、局所的な材料強度のばらつきや強度劣化が発生することは現実問題として避けることができない。しかし実際の構造解析や設計においては、材料特性を全て一定として扱うことがほとんどであり、材料強度の違いや空間的なばらつきが構造系全体の破壊に与える影響は考慮されていない。そこで本研究では、コンクリートと鉄筋の強度特性とその空間的な分布を変えた破壊実験のシミュレーションを行ない、構造系全体の破壊挙動の変化を分析した。その際に、梁の曲げ破壊試験や短柱のせん断破壊試験などの荷重条件による違いや、鉄筋位置のずれなどによる影響も同時に調査した。

Key Words: Applied Element Method, Material Property, Reinforced Concrete, Fracture Analysis, Fracture Test.

1. はじめに

隣接したり、同じような地盤に建設されている同じ設計や構造の建物が、一方は大きな被害を受けたにもかかわらず、他方の被害は軽微であった例が詳細な地震被害調査に基づいて報告されている¹⁾。このような違いをもたらす原因は何であろうか？考えられる大きな原因の1つに、構造部材として用いられている材料特性のばらつきが挙げられる。特に鉄筋コンクリート(RC)構造物の場合は、打設時の環境、配筋のずれや経年変化等を原因として発生する材料特性のばらつきは、現実問題としては避けることはできない。しかし現在の構造解析や設計では、材料特性は全て一定として扱われることがほとんどであり、材料特性の違いやその空間的なばらつきが構造系全体の破壊に与える影響は考慮されていない。そこで本研究では、RC 構造物を解析対象とし、コンクリートと鉄筋の材料特性にばらつきを与えると共に、その空間的な分布を変えた破壊実験の数値シミュレーションを行なうことによって、構造系全体の破壊挙動がどのように変化するかを解析した。その際に、梁の曲げ破壊試験や短柱のせん断破壊試験などの荷重条件による違いや鉄筋位置のずれなどによる影響も同時に考慮した。

2. 解析方法

2-1 解析理論

本研究では、Meguro and Hatem によって開発された応用要素法(AEM)^{2,3)}を用いている。ところで、一般に構造解析手法は、解析対象の扱い方で大きく2つに分類することができる。1つは有限要素法(FEM)の様に解析対象を連続体と仮定するもの、もう1つは個別要素法(DEM)の様に解析対象を非連続な要素の集合体と仮定して解析する方法である。RC 構造物の挙動を FEM のような連続体を仮定する手法で解析する場合は、クラックなどによる非連続性は、ジョイント要素や特異要素を用いて簡便的に表現し、節点の連続性を保持している。しかしこの手法では計算が複雑化すると共に、クラックの発生場所や進展方向を解析前に仮定しなければならない。一方 DEM のような非連続体を仮定した解析法では、微小変形域での計算精度は、連続体を仮定した解析法に比べて劣るため、崩壊に至るまでの誤差の蓄積が崩壊現象の高精度な分析を難しくしている。これらの問題を解決するために数多くの研究がなされているが、モデルの簡便さ、解析精度、汎用性などの点から、AEM は高い可能性を有する解析法と期待されている。この手法では、解析対象を仮想的に分割した小要素の集合体として考え、要素同士は法線・接線方向の2種類の分布バネで接続されている。

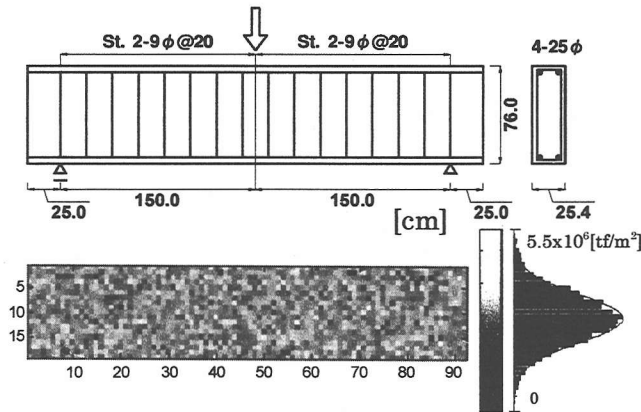


図-1 梁供試体の配筋図と材料特性の空間分布 (Case B-3)

これより、AEM では要素同士が節点において常に連続しなければならないという制約はない。クラックは、法線・接線方向の2種類のパネが代表する領域の材料が、その領域に作用する応力に耐え得るかどうかで自然と発生する。さらにクラックの発生による応力変動は周囲のパネに再配分されるため、あるクラックの発生が次のクラックを生む「進行性破壊」も特別なモデルを必要とせずに追跡できる。微小変形域での解析精度はDEMに比べて格段に高く、FEMに比べても遜色ないことが報告されている^{2),3)}。AEMでは、RCなどの複合材料を扱う際にも、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線を独立に定義しているため、要素モデルを変える必要がなく、また鉄筋が配筋された位置に鉄筋の材料特性を持つパネを追加配置することで、鉄筋の位置と量を正確に解析に取りこむことができる。

2-2 解析モデル

解析対象としては0.76m x 3.5m x 0.254mのRC梁供試体を採用し、これを仮想的に縦20 x 横92のメッシュ(1メッシュのサイズは3.8 cm x 3.8 cm)に分割した。荷重条件としては梁中央に集中荷重を載荷し、これを変位制御で与えている(図-1)。まずコンクリートの材料特性のばらつきが構造系全体の破壊挙動に与える影響を検討する。本研究では、隣接する2要素の各辺に10組の法線・接線方向のパネを設定しているため、ばらつきを与える最小単位は1組のパネが代表する領域(0.38cm x 3.8cm)になる。様々な大きさを単位とする解析を行ったが、ここでは1要素をばらつきの単位として解析した例を示す。コンクリートの材料特性としては、「剛性」と「終局強度」を取り上げた。剛性と終局強度をそれぞれ独立と仮定した場合と、両者に相関を持たせた場合の解析を行なったが、ここでは剛性と終局強度を一定とする「ケースA」、剛性のみをばらつかせた「ケースB」、終局強度のみをばらつかせた「ケースC」に

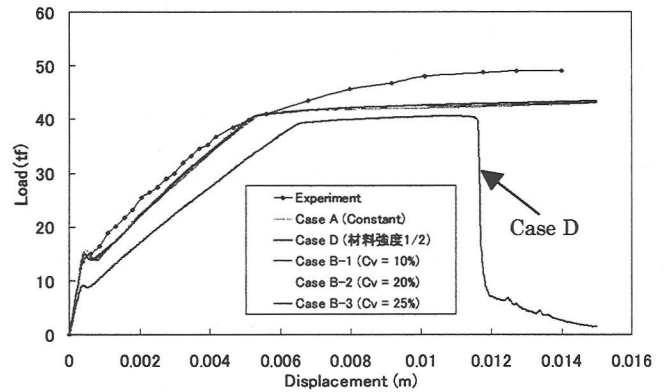


図-2 荷重-変位曲線
(コンクリートの剛性をばらつかせた場合)

について紹介する。材料特性のばらつきは正規分布を仮定し、変動係数Cvを10%,20%,25%と変化させた3ケース(B/C-1,B/C-2,B/C-3に対応)について解析を行った。用いた材料パラメータは文献4)に従っている。

次に荷重条件の違いがもたらす材料特性の差を原因として発生する構造系全体の破壊挙動の変化を調べた。すなわち、梁の曲げ破壊試験と短柱のせん断破壊試験の違いによる影響を、0.76m x 1.52m x 0.254mの短柱供試体を用いて分析した。材料特性としては、ケースA~Cに用いたコンクリート材料特性を基本ケースとし、終局強度は基本ケースの1/2、剛性は終局強度との相関から求め、これらを梁部材、柱部材に適用した「ケースD」と「ケースE」について解析を行なった。

最後に鉄筋の材料特性や配置位置の違いが構造系全体の破壊挙動に与える影響を検討した。ケースA~Cに用いた材料特性と配筋位置を基本ケースとし、剛性と降伏強度をそれぞれ独立に変化させた2ケース(ケースIとケースJ)を解析した。鉄筋の材料特性は、基本ケースに対して、0.5倍、1.5倍(I/J-1,I/J-2に対応)の値を用いている。鉄筋の配置位置の違いについては、基本ケースに対して、上下の主筋のかぶりを10cm増加させた「ケースK」との比較を行なった。

3. 解析結果

3-1 コンクリートの材料特性をばらつかせた場合

(1) 梁の曲げ破壊試験

ケースAとBの荷重-変位曲線を比較する(図-2)。図を見ると、コンクリートの材料特性については、Cv = 25%を与えたとしても構造系全体の挙動に与える影響は小さいことが分かる。同様な結果がケースAとCを比較した場合においても見られた。これ

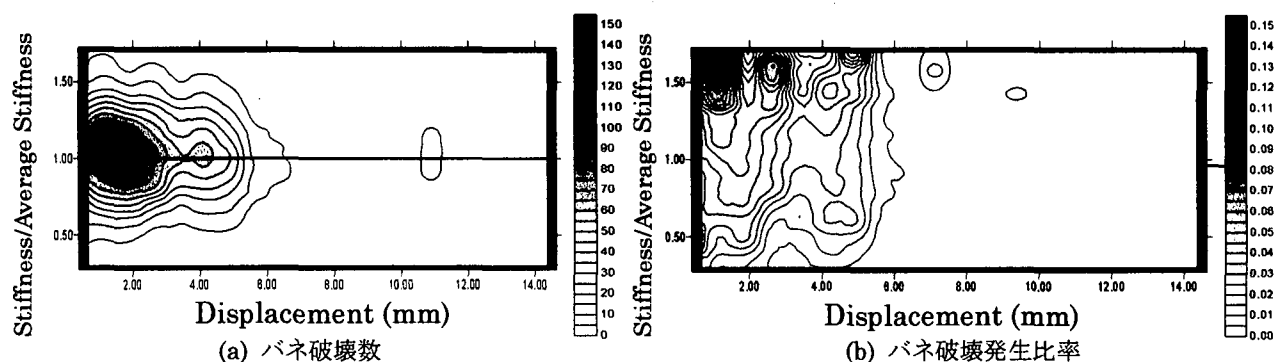


図-3 破壊したコンクリートバネの材料特性と発生数・発生比率図の関係
(コンクリートの剛性をばらつかせた場合: Case B-2)

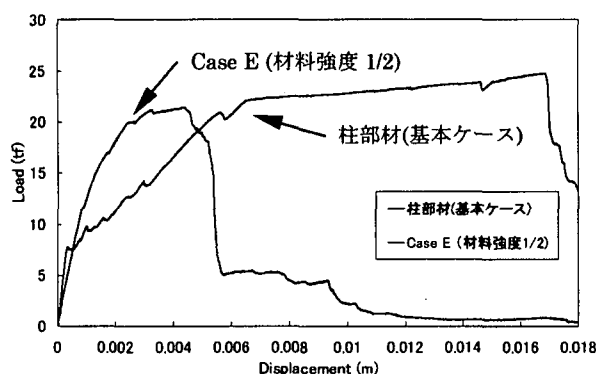


図-4 荷重-変位曲線 (短柱のせん断試験の場合)

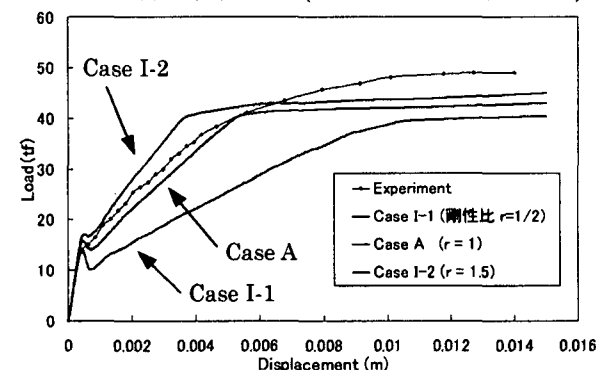


図-6 荷重-変位曲線 (鉄筋の剛性を変化させた場合)

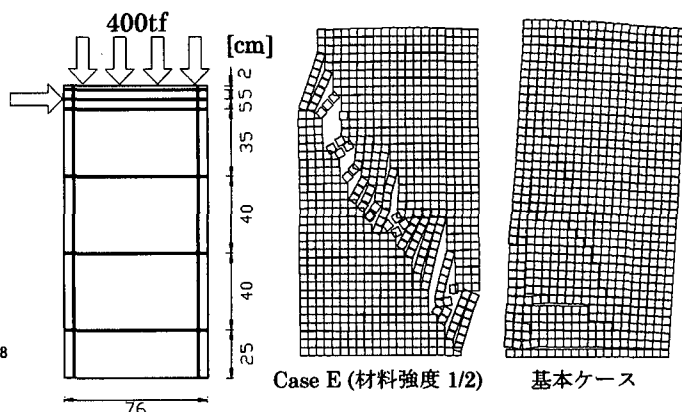


図-5 短柱供試体の配筋図と変形図
(変位 = 2cm, Illustration scale factor = 5)

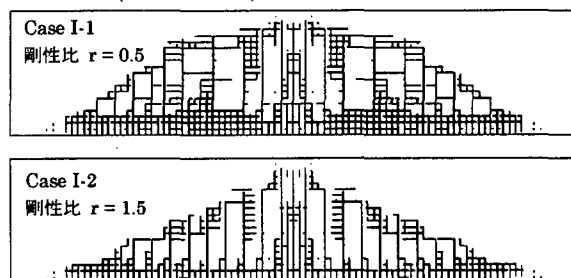


図-7 破壊したコンクリートバネの空間分布図
(鉄筋の剛性を変化させた場合, 変位 = 1.5cm)

らの原因として、本研究で用いた荷重条件では、供試体が曲げ引張り破壊を起こすため、鉄筋が主に荷重を負担するとともに、構造系全体の挙動を支配すると思われる。しかし破壊したコンクリートバネの材料特性を図-3(a)に示すような破壊バネの分布を用いて表現すると、剛性と終局強度にはそれぞれ特徴的な傾向があることが分かる。剛性をばらつかせた場合は、剛性が大きいバネほど早期に破壊しやすく、終局強度をばらつかせた場合には、終局強度が小さいバネほど早期に破壊する傾向がある。これらの傾向は、ある材料特性の中で破壊したバネの比率をプロットすると、より顕著に見える(図-3(b))。

(2) 短柱のせん断破壊試験

図-4 に示す荷重-変位曲線を見ると、コンクリートの強度低下が構造系全体の挙動に多大な影響を与えることが分かる。この結果から、せん断破壊を起

こす部材では、コンクリートの材料特性が重要な役割を担うことが分かる。更に図-5 に示す変形図から、ケースEにおけるせん断破壊が、基本ケースに比べて激しいことがわかる。基本ケースでは延性的な破壊を起こしているのに対し、ケースEでは、材料強度を低下させたことにより変形能が低下し、脆性的な破壊を起こしている。

3-2 鉄筋の材料特性が構造系全体に与える影響

まず鉄筋の剛性だけを変化させた場合の荷重-変位曲線を図-6 に示す。コンクリートが破壊するまでは、鉄筋とコンクリートが一体となって荷重に抵抗するため各ケースとも大きな差はない。しかしコンクリートの破壊開始後、鉄筋が負担する荷重が増すため、鉄筋の材料特性が構造系全体の挙動に影響を与える様になる。剛性が低いほど鉄筋が負担する荷重が小さいため、荷重-変位曲線の傾きは小さくなる。

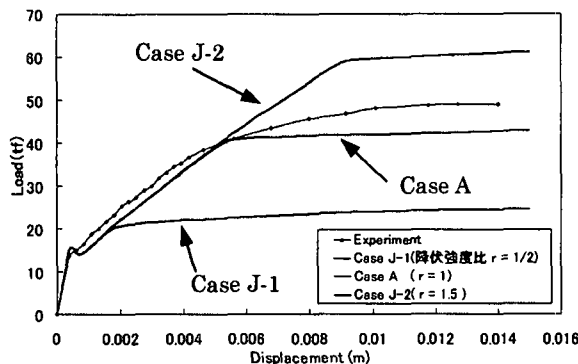


図-8 荷重-変位曲線 (鉄筋の降伏強度を変化させた場合)

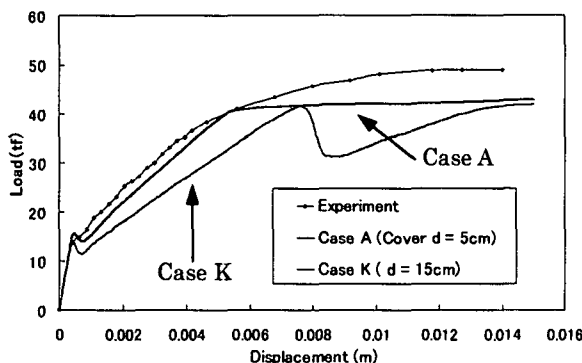


図-10 荷重-変位曲線 (鉄筋のかぶりを变化させた場合)

降伏応力を一定としているにもかかわらず剛性が低いほど構造系全体の降伏強度が小さくなるのは、鉄筋が降伏するまでに、コンクリートバネが多く破壊する為である。破壊したコンクリートバネの空間分布を図-7に示す。鉄筋の剛性が低いほどコンクリートが破壊する範囲は広がっていることが分かる。これは鉄筋の剛性が低いために、同じ荷重に対しての供試体の変形が大きくなり、その影響が供試体内部の深部のコンクリートにまで及ぶ為と思われる。

次に降伏強度を変化させた場合の荷重-変位曲線を示す(図-8)。降伏強度が小さいほど、塑性変形し始める変位は小さくなる。鉄筋が塑性変形を起こすまではどのケースも同じ経路をたどるが、これは鉄筋の剛性が同じためである。鉄筋の降伏強度を変化させた場合の破壊バネの空間分布を図-9に示す。降伏強度が小さいほど、コンクリートの引張り破壊が供試体内部の深い部分にまで及ぶ傾向が見られる。鉄筋の降伏強度が小さいほど鉄筋は早く降伏し、降伏後の鉄筋が負担する荷重も小さくなる。これより、鉄筋の降伏が始まると鉄筋の変形は局所的に大きくなり、またコンクリートが負担する荷重が増えることから、コンクリートの変形も局所的に大きくなるため、このような傾向が生じるとと思われる。

3-3 鉄筋の配置の違いによる影響

図-10にかぶりの厚さを変化させた場合の荷重-変位曲線を示す。コンクリートの破壊が開始するまではかぶりを変化させたことによる影響は小さいが、

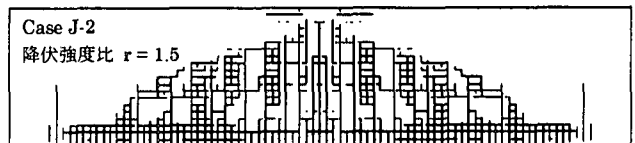


図-9 破壊したコンクリートバネの空間分布図 (鉄筋の降伏強度を変化させた場合、変位 = 1.5cm)

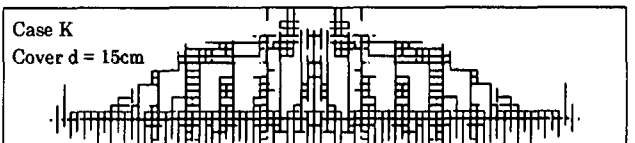


図-11 破壊したコンクリートバネの空間分布図 (鉄筋のかぶりを变化させた場合、変位 = 1.5cm)

コンクリートが破壊した後は、鉄筋が主に荷重を負担するため、かぶりの違いによる影響が見られてくる。鉄筋のかぶりを大きくしたことにより、コンクリート破壊開始後の構造系全体の剛性は小さくなる。図-11に示す破壊コンクリートバネの空間分布図においては、鉄筋のかぶりが小さいと、コンクリートの破壊が引張り縁において細かく生じ、逆にかぶりが大きくなると引張り縁で発生するコンクリートの引張り破壊の間隔は粗くなる。

4. まとめ

本研究では RC 供試体を構成するコンクリートと鉄筋の材料特性の違いとその空間的なばらつきが構造系全体の破壊挙動に与える影響を検討した。これらの研究を続けることにより、コア試験の結果から構造系全体の破壊挙動を推定したり、効果的な構造物の補修・補強が可能になると思われる。

参考文献

- 1) 例えば、伯野・目黒：被害から学ぶ地震工学，鹿島出版会，1992。
- 2) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research center, No. 30, pp-103-116, 1997.
- 3) Kimiro MEGURO and Hatem TAGEL-DIN: Simulation of Post-Buckling Behavior of Structures Using Applied Element Method, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No. 32, 11 Pages, 1999.3.
- 4) 武藤 清：構造物の強度と変形，丸善，1965。