コンクリート構造の応用要素法(AEM)解析における せん断破壊機構の改善と崩壊シミュレーション

大林組　正会員　新倉　一郎
東京大学　正会員　目黒　公郎

1　はじめに

兵庫県南部地震は、設計外力を超える地震動が作用した場合の構造物の挙動に関する理解が不十分であったことを明らかにした。構造物の崩壊によって多くの犠牲者を出すことを考えれば、このメカニズムとプロセスに関する検討を積極的に進めていく必要がある。そのためには崩壊過程を追跡できる解析手法が必要となるが、現在用いられている主な構造解析手法は、微小変形から崩壊過程までを統一的に扱えるまでには至っていない。その意味で非常に優位であると考えられる手法の１つが、目黒･ハテムが開発した応用要素法(Applied Element Method, AEM[1])である。

ところで従来のAEM の研究では、解析手法の枠組の構築に重点を置いているため、材料モデルとしてシンプルなものを採用していた。故に、破壊挙動において鉄筋が支配的な場合には精度が高い一方で、コンクリートの、特にせん断が支配的な場合の精度は高くない。そこで本研究では、コンクリート構造のせん断破壊機構の改善を行う。そして、最終的に兵庫県南部地震で実際に崩壊したピルツ橋脚の崩壊過程の再現を試みる。

2　従来の AEM の解析結果と改良点

Fig.1 と Table 1 はせん断破壊先行型の単純梁[2]の試験体と材料特性である。これを AEM を用いて解析する。Fig.3 と Fig.4 が従来モデルによる解析結果であるが、Fig.3 のひび割れ進展図を見ても、実験で観察された斜めひび割れの進展は全く見られない。また、Fig.4 の荷重-変位関係を見てもあまり精度が良くない。

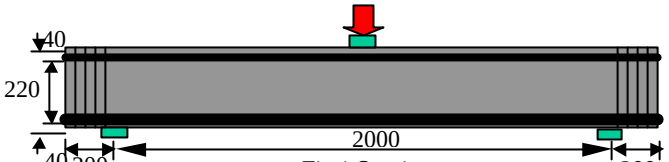


Fig.1 Specimen

Table 1 Property of Material

コンクリート材料特性		
引張強度	圧縮強度	弾性係数
2.27 N/mm^2	22.7 N/mm^2	23.63 kN/mm^2
鉄筋材料特性		
降伏強度	弾性係数	上筋　D10×2本
358.0 N/mm^2	182.0 kN/mm^2	下筋　D29×3本

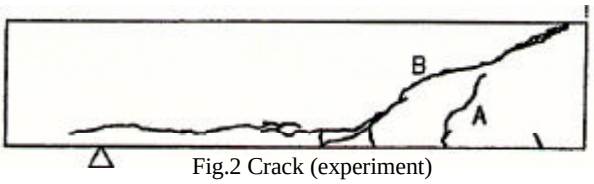


Fig.2 Crack (experiment)

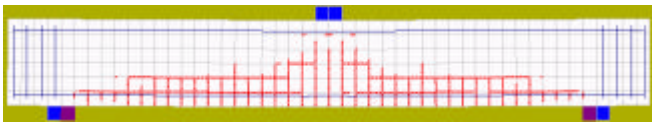


Fig.3 Crack (analysis)

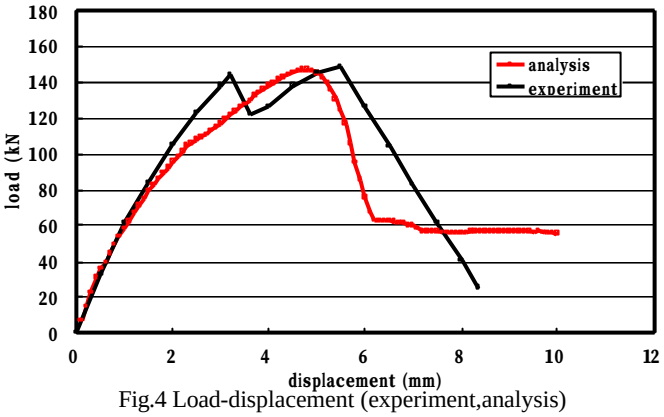
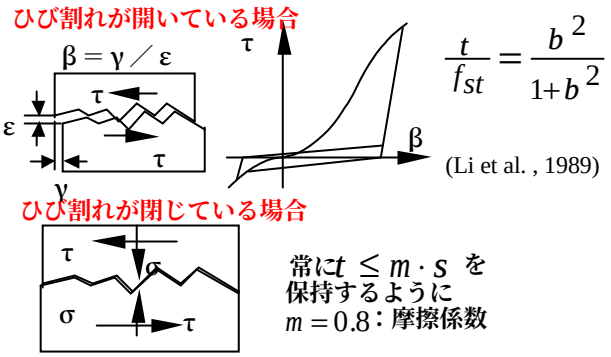
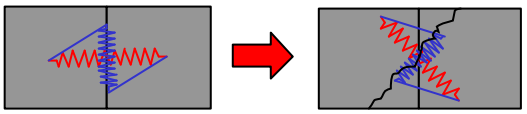


Fig.4 Load-displacement (experiment,analysis)

そこで以下のような改良を行う。まずはひび割れ後のせん断伝達構成則について、Fig.5 のようにひび割れ発生後それまで要素の辺に対して垂直(法線バネ)、平行(せん断バネ)であったバネを、ひび割れ面に従うように回転させる。そして、ひび割れ面上のせん断応力-ひずみ曲線としては、ひび割れ開口幅が開いている場合は Li[3]が提案したひび割れ幅を考慮するモデルを、閉じている場合は摩擦側のモデルを採用する。次に引張方向の破壊メカニズムとしては、まず破壊基準を超えたら剛性ゼロ、応力一定の塑性変形を開始し、その後塑性開始ひずみの 2 倍のひずみになったら破壊をさせる引張塑性変形領域を持つモデルを採用する(Fig.6)。



(A) Stress-strain curve on the crack plain


(B) Model of crack plain
Fig.5 New model of shear constitutive model

キーワード：応用要素法、せん断、鉄筋コンクリート、数値解析、ピルツ橋脚、崩壊

連絡先　〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所　目黒研究室　TEL: 03-5452-6437

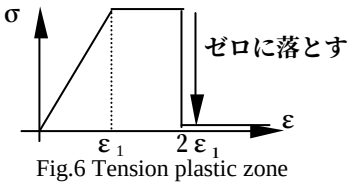


Fig.6 Tension plastic zone

3 改良後の解析結果とその考察

前節の改良点を導入し、解析を試みる。ポイントが２つあるので段階的に説明する。まず、ひび割れ後のせん断伝達構成則についてのみ改良した解析結果(ひび割れ進展図)を Fig.7 に示す。ひび割れ進展図を見ると実験において観察された斜めひび割れがせん断スパン中央付近に発生しているのが分る。ただ、実験と比較して斜めひび割れがかなり広範囲に渡って発生しており、実験のようにひび割れの局所化が見られない。また、Fig.8 の荷重-変位関係(青色)を見ても、ピーク荷重が低すぎてあまり精度が良くないのが分る。そこで、これに引張塑性変形領域についての改良を行い、再度解析を試みる。Fig.8 の荷重-変位関係(赤色)を見ると、ピーク荷重が上昇して実験値に近づいている。また、Fig.9 を見ると引張塑性変形領域を導入したことで、斜めひび割れの発生がより局所化しており、実験を精度良く再現できているものと言える。

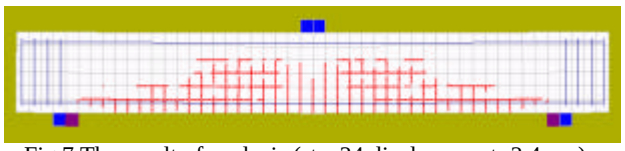


Fig.7 The result of analysis (step24 displacement=2.4mm)

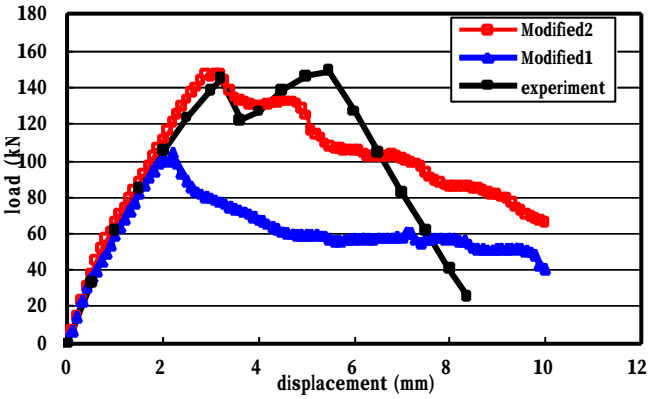


Fig.8 The result of analysis

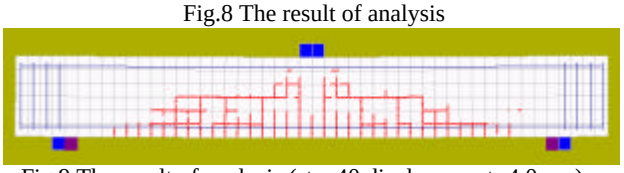


Fig.9 The result of analysis (step40 displacement=4.0mm)

4 ピルツ橋脚の崩壊シミュレーション

最後に兵庫県南部地震で崩壊した阪神高速道路３号神戸線のピルツ橋脚崩壊過程の再現を試みた。解析対象を Fig.10 のように要素配置し[4]、荷重条件としては簡単のために一方向水平震度とし、大きさを 0.8G とした。ここでは崩壊原因と言われている「段落とし」の影響を見るために、「段落とし」が有るケースと無いケースとを解析した。

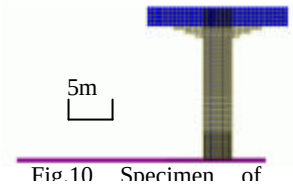


Fig.10 Specimen of

まず Fig.11 に「段落とし」がないケースの解析結果を示す。柱基部の補強が無いために損傷が基部に集中し、そこから折れ曲がるようにして崩壊していることが分る。次に Fig.12 に「段落とし」があるケースの解析結果を示す。これを見ると柱基部は軸方向鉄筋によって補強されており、あまり損傷が進んでいなく、その代わりに「段落とし」の境界部においてせん断破壊が進行し、脆性的に崩壊していることが分る。Fig.11 と Fig.12 を比較することで「段落とし」の有無の影響を確認できる。

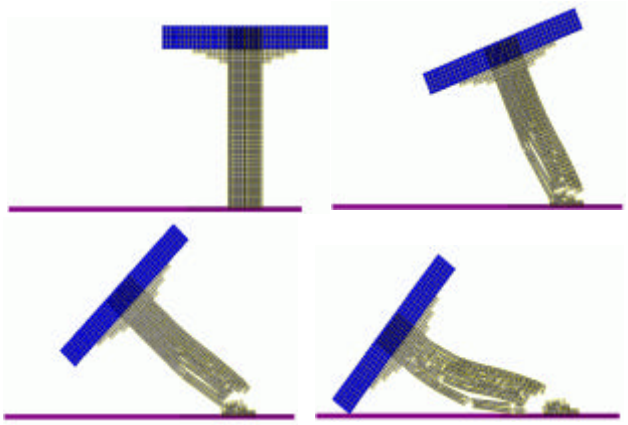


Fig.11 Result of analysis without cut-off

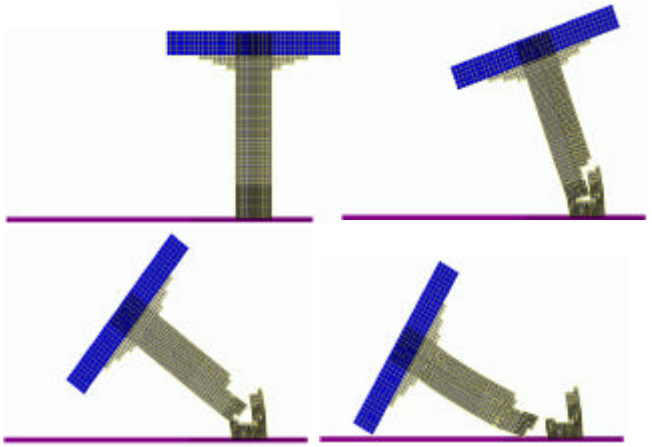


Fig.12 Result of analysis with cut-off

5 まとめ

本研究では AEM 解析で用いるコンクリートの破壊モデルの改良を行った。改良点は(1)ひび割れ後のせん断伝達構成則(2)引張塑性変形領域の 2 点であり、これらにより、コンクリートのせん断が如実に表われる挙動に関して、解析精度の向上が達成された。

そして、兵庫県南部地震において実際に崩壊したピルツ橋脚の崩壊シミュレーションを試み、「段落とし」の影響について比較検討をした。

参考文献

1) Meguro . K Tagel-Din Hatem: Applied Element Method for Structural Analysis Theory and Application for Linear Materials , Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering , JSCE, 4.2000,Vol647,pp31-45
2) 山谷　敦、中村　光、檜貝　勇：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析，土木学会論文集, No.620/V-43, pp187-199, 1995.5
3) Li, B. Maekawa, K. and Olamura, H.: Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol.40, No.1, pp.9-52, 1989
4) 岡村甫、前川宏一、小沢一雅、大内雅博：コンクリート橋脚の被害の特徴,土木学会誌 pp11-19, 4. 1995