

格子等価連続体モデルによる PC 定着部の構造特性の評価

中部大学 工学部 講師 正会員

○伊藤 睦

名古屋大学 工修 正会員

牧 真也

名古屋大学大学院 土木工学専攻

Kongkeo PHAMAVANH

名古屋大学 名誉教授 正会員

田辺 忠顕

1. はじめに

実構造物レベルの PC 定着部の耐力や破壊性状は、その耐力が非常に大きく実験的に観察することが不可能であることから、未解明な点が多い。そのため、数値解析的に PC 定着部の耐力や、破壊性状を予測することが求められるのだが、これまでの試算の結果からは、定着部のコンクリートの応力状態は多軸の極めて複雑な応力状態である計算結果が得られている。RC 構造物や PC 構造物の挙動は、ひずみ軟化挙動も含めたコンクリートの挙動に大きく影響を受け、特に補強筋により拘束されたコンクリートの圧縮挙動は、ダイレクトに構造の耐力や変形性能に影響を及ぼす。そのため、有限要素解析を用いて RC、PC 構造物の三次元的な挙動などを精度良く予測するためには、ひずみ軟化挙動も含めた多軸応力状態下のコンクリート挙動を精度良く表現できるモデルが必要となるのだが、塑性理論に基づいた複雑なモデルでは、多軸応力下のコンクリートの挙動を構成則レベルの検証解析では精度良く表現できるものの、ひび割れの発生や、それに伴う除荷などが起こりうる構造解析では、収斂性の問題が生じるなど、必ずしも実用的でないのが現状である。

著者らは、簡便で収斂性の良い構成則である格子等価連続体モデル (LECOM) ¹⁾ の開発を進めている。これまでに著者らは、LECOM を簡便な手法により多軸効果が考慮できるように拡張することで、三軸圧縮状態下やひび割れたコンクリートの圧縮挙動の評価、加えて載荷・除荷・再載荷に対応する履歴則を考慮することで繰返し載荷解析への適用を可能としている ²⁾。本研究では、多軸効果が考慮可能な LECOM を用いて、実構造物レベルの PC 定着部破壊解析を行うことで、定着部の耐力、耐荷機構、破壊性状を解析的に明らかとすることを目的とする。

2. 格子等価連続体モデル

格子等価連続体モデルは、コンクリートと補強筋による耐荷機構をモデル化した Main lattice 成分と、ひび割れ面におけるせん断伝達をモデル化した Shear lattice 成分を、ひび割れ面座標系に想定することで RC 要素の構成式を構築するモデルである。このように本モデルは、各種格子成分の等価一軸応力-ひずみ関係の組合せにより構成されることから、簡便で収斂性が良いのが特徴である。

2.1 三軸効果の導入

格子等価連続体モデルのように、一軸の格子成分の組合せにより構築される構成則で多軸応力状態のコンクリートの挙動を考慮するためには、多軸応力状態の効果を考慮した各格子方向の等価一軸応力-ひずみ関係が必要となる。また、この等価一軸応力-ひずみ関係を決定するためには、任意の応力状態における最大圧縮強度と圧縮強度時のひずみ、ひずみ軟化勾配に加え、各応力状態で様々に等価一軸応力-ひずみ関係の Envelop が変化しても、適切に載荷・除荷・再載荷を表現できる履歴則が必要となる。以下にその概要を示す。

三軸圧縮下にあるコンクリートの圧縮強度 σ_{peak} は、図-1 に示す K.J. Willam ³⁾ による破壊基準により定めている。また、図-1 に示すように、Ottosen ⁴⁾ が、最大主圧縮応力を主応力軸方向に増加することにより求められるある応力状態の圧縮強度を、三軸方向全てに適用したとしても、実験値を再現可能なことを報告していることから、本モデルにおいても、Ottosen の手法を用いている。三軸圧縮下におけるコンクリート強度時のピークひずみ ϵ_{peak} の算定には、S.P. Shah ⁵⁾ による提案式 ⁵⁾ を

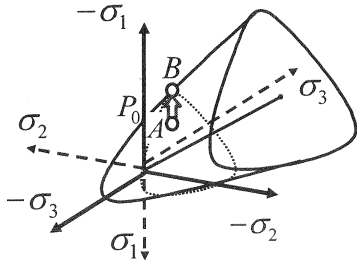
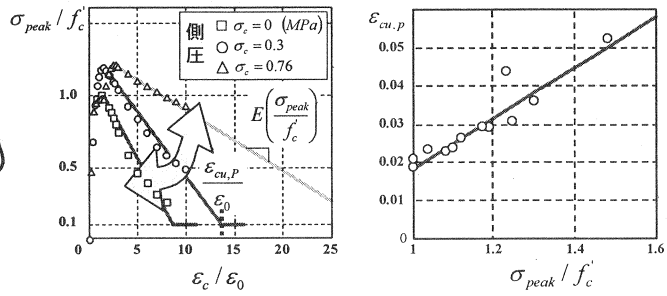


図-1 最大応力算定手法



(a) 圧縮応力-ひずみ関係 (b) 側圧と限界ひずみの関係

図-2 ひずみ軟化勾配の決定手法

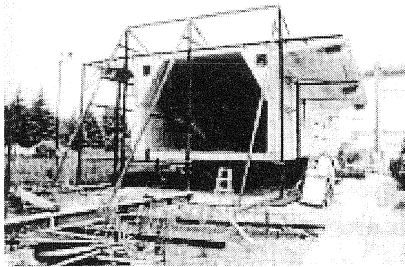


写真-1 実験供試体

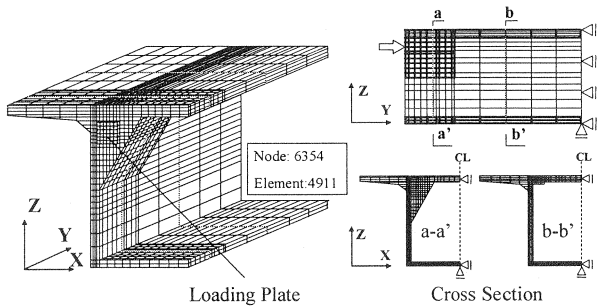


図-3 解析モデル

用いている。ひずみ軟化勾配は、様々な三軸圧縮下のコンクリートの載荷試験結果とカーブフィッティングすることにより、軟化開始時の多軸応力下の圧縮強度 σ_{peak} の関数として規定した。図-2にその算定手法の概念を示す。図-2(a)のプロットデータはそれぞれ側圧が 0.0, 0.3, 0.76(MPa)の時の三軸圧縮応力-ひずみ関係の一例である。これらの実験結果と対応する軟化勾配を直線で仮定し、それぞれの三軸圧縮状況における限界ひずみ点 ($\epsilon_{cu,p}, 0.1f'_c$) を求める。このように、様々な側圧を用いた実験において同様に限界ひずみ点を求め、 σ_{peak} / f'_c との関係を示したものが、図-2(b)である。図-2(b)の値から最小二乗法により限界ひずみを圧縮強度 σ_{peak} の関数とした。この限界ひずみ点 ($\epsilon_{cu,p}, 0.1f'_c$) と最大応力点 ($\epsilon_{peak}, \sigma_{peak}$) を直線で結ぶことにより、容易に軟化勾配を決定することができる。

3 解析対象

3.1 実験の概要

本研究では、岡山県岡山市を起点に中国地方を横断し鳥取県米子市に至る延長 108km の中国横断自動車道に架かる見延橋を模擬した実物大載荷実験⁶⁾を解析対象とした。実験供試体概要図を写真-1に示す。実験供試体は橋軸長さ 18m、高さ 3.75m、横幅 9.55m と十分な大きさを備えており、実橋における境界条件や、力の流れなどが再現可能な実験であるため、実橋と同様な条件の基で数値解析を実施することが可能である。なお、見延橋では、定着突起形状が三角形となっており、上床版と側壁の隅角部に設置されている。PC 鋼棒は橋軸方向に対して斜めに配置されており、この PC 鋼棒を緊張することにより載荷が行われている。

3.2 解析概要

図-3に解析モデルを示す。橋軸方向・橋軸直角方向双方において 2 方向の対称性を考慮することで、解析モデルを供試体の 1/4 とした。なお、供試体は橋軸方向に 9m と十分な長さを持っているこ

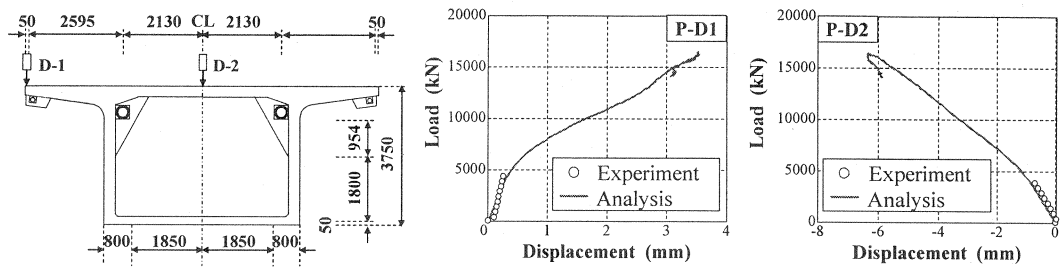


図-4 各位置における緊張力-変位関係の比較

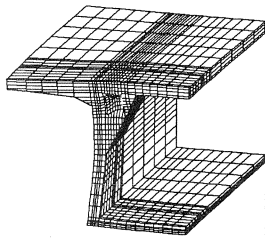


図-5 変形状

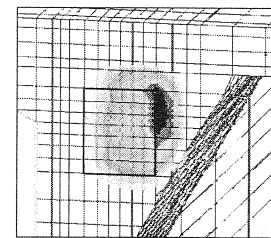
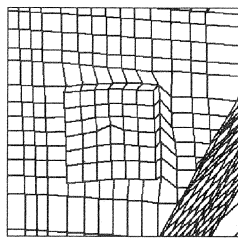


図-6 主圧縮ひずみ分布

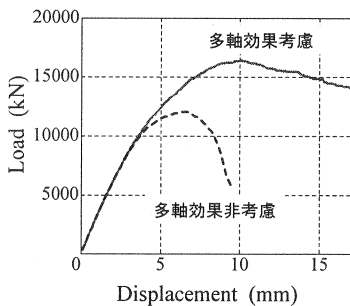


図-7 緊張力-変位関係の比較

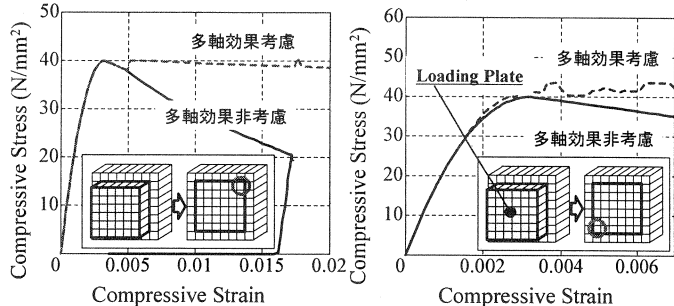


図-8 等価一軸圧縮応力-ひずみ関係

とから、供試体後方にあるマスコンクリート部は省略することとし、片持ち梁と同様な境界条件にすることで、橋軸方向の連続性をモデル化している。また実験では、PC 鋼棒を斜め（橋軸方向に対して7度）に配置し、緊張力を与えているが、解析では定着体載荷板中心を、PC 鋼棒が配置されている方向に変位制御で一点載荷する Push over 解析を行った。

4. 解析結果

図-4、図-5、図-6 にそれぞれ、実験と解析値の緊張力-変位関係の比較、解析結果による変形図、主圧縮ひずみ分布を示す。実験では、供試体の様々な位置の変位が計測されている。図-4 にはその代表例として図に示す位置の変位と緊張力の関係が示されている。緊張力-変位関係の比較からは、本解析は実験より得られた供試体の初期剛性を精度良く予測している。この他の変位測定点においても同様な結果が得られており、弾性状態の変形モードを適切に予測していることから、解析に使用した境界条件は妥当であると考えられる。また、設計荷重時（設計時張力）は $0.7P_u$ （約 4900kN）、終局荷重時（終局時張力）は仮定値として $0.93P_u$ （6546kN）であり、実験は安全性を考慮して、 $0.8P_u$ まで緊張されているが、予測された耐力は約 16000kN と設計時張力の約 3 倍が予測されている。また、変形図からは、ウェブなどの構造全体が変形することが予測されているが、特に載荷板直下付近

の定着突起に変形が集中しており、このことは図-6 右に示す圧縮ひずみ分布からも確認することができる。図は解析モデル表面のひずみ分布を示しているが、解析モデルの中、定着体付近にのみ圧縮ひずみが卓越していることが確認できる。図-6 左には、載荷板を取り除き、その載荷板裏側のひずみ分布の様子が示されている。なお、黒線の枠で囲む部分に載荷板が設置されている。図-6 左に着目すると、載荷板中心より右方向に圧縮ひずみが卓越していることが確認される。これは、解析では載荷板の中心を一点に変位制御しているのだが、PC 鋼材が配置されている角度(右斜め)に沿って変位を与えているためであり、その結果、載荷板直下よりも右方向において圧縮ひずみが卓越することになる。また、緊張力増加にともない主圧縮ひずみ分布を照査していくと、耐力に達する以前からポストピークに至るまで定着体付近にのみ主圧縮ひずみが卓越していくことが確認されたことから、本実験供試体は、載荷板裏側のコンクリートの局部圧縮破壊により耐力が決定するものと推測され、その破壊領域は極めて局部的である。

構成則において、多軸効果の考慮の有無が、予測される構造の耐力に及ぼす影響を検討した。図-7 に、多軸効果を考慮した場合と、考慮しない場合の緊張力-載荷点変位関係の比較を示す。その結果、多軸効果を考慮しない場合には 12000kN であった耐力が、多軸効果を考慮することにより、17000kN にまで上がることが確認された。図-8 に示す等価一軸応力-ひずみ関係の比較からは、強度の上昇はわずかなものの、多軸効果を考慮することにより、ひずみ軟化勾配が緩やかになっていることが確認できる。このことから、本研究で解析対象とした実験供試体では、PC 定着部に破壊が集中し、構造の耐力は定着部コンクリートの圧縮挙動により決定されることが分かる。また、コンクリートの挙動は、補強筋の隅角部において拘束効果などの影響により、一軸挙動よりもより延性的な挙動を示すことが期待できる。

5. 結論

三次元構造物では、応力・ひずみが複雑に分布しており、数値解析を行う際、三軸効果を考慮する必要がある。本研究では、塑性理論のような複雑な理論を必要とせず、簡便かつ妥当な解析結果を導く格子等価連続体モデルを用いて PC 定着部破壊解析を行った結果、以下の結論が得られた。

解析結果より、解析対象とした実験供試体は、載荷板裏側のコンクリートの局部圧縮破壊によって破壊することが予測された。また、定着部では多軸の圧縮応力場となり、多軸応力下のコンクリートの挙動が耐力や変形性能に大きく影響を及ぼすことが確認され、定着部のコンクリートには、一軸圧縮時以上のパフォーマンスが期待できる。

参考文献

- 1) 田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004.3
- 2) 牧真也，Kongkeo, P., 伊藤睦，田辺忠顕：三軸効果を考慮した三次元格子等価連続体モデルの構築とその適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.85-90, 2004
- 3) Kang, H.D, and Willam, K.J. : Localization Characteristics of Triaxial Concrete Model, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.125, No.8, pp.941-950, 1999
- 4) Ottosen, N.S. : A Failure Criterion for Concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.103, No.4, pp.527-535., 1997
- 5) Ahmad, Shuaib H., and Shah, Surendra P. : Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete, Journal of Structural Engineering Division, ASCE, Vol.108, pp.728-742,1982
- 6) 岡村敦，橋川勝司，苅田豊，中村収志：中国横断自動車道見延橋（全外ケーブル橋）の設計，プレストレストコンクリート技術協会，第 10 回シンポジウム論文集，pp. 443-448, 2001