

鋼・コンクリート複合構造物の弾塑性有限変位解析プログラムの構築

橋梁工学分野

安永日

1. まえがき

近年、日本においては、経済的で耐久性の高い橋梁の建設を目的として、地盤条件や地形条件、および周囲の景観に配慮した様々な橋梁形式が提案・検討され、それらの内のいくつかは、実際に建設されているものもある。中でも、鋼とコンクリートのそれぞれの材料特性を有効に組み合わせた鋼・コンクリート複合構造が注目されており、合成桁橋以外にも、混合桁橋、さらには、橋脚を複合構造とした合成橋脚など、様々な複合構造が採用されている。このように、鋼・コンクリート複合構造を用いた橋梁構造物は、今後ますます増加することが予想され、その力学的挙動の解明は非常に重要となる。

鋼構造のみ、もしくはコンクリートのみといった単一の材料からなる構造物の挙動については、解析ツールも充実しており、これまでの様々な知見をもとに、その挙動の解明が可能な状況にある。しかしながら、両者が混在する構造物の挙動については、その挙動の複雑さなどの理由から、現状では実験による挙動の解明が中心であり、その挙動を正確に再現できる解析ツールの充実が望まれている。また、橋梁の設計も許容応力度設計から限界状態設計へと移行する上で、複合構造物の力学的挙動および耐荷力特性を正確に再現できる解析ツールの充実が必要である。

そこで本研究では、既開発である骨組鋼構造物の弾塑性有限変位解析プログラム EPASS に、コンクリート構造要素を追加し、複合構造物の解析が可能な弾塑性有限変位解析プログラムの開発に向けて検討している。そして、その妥当性を合成断面要素と RC 断面要素の解析結果と実験結果を比較し検証している。

2. 鋼とコンクリート材料の弾塑性構成式

本論文で、鋼材料は von Mises の降伏関数、コンクリートは次式で表せる Drucker-Prager の降伏関数を導入した。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - (\sqrt{\kappa} + k) = 0 \quad (1)$$

ここで、 α は Drucker-Prager の基準中の定数、 I_1 は応力テンソルの 1 次不変量、 J_2 は偏差応力テンソルの 2 次不変量、 κ は材料硬化パラメータ、 k は Drucker-Prager の基

準中の定数(純せん断での降伏応力)である。そして、材料硬化パラメータ κ は次式のように表せ、相当塑性ひずみ x との関係は図-1 のとおりである。

$$\kappa = \frac{H}{A} e^{Ax} \left(1 + \frac{1}{PA} - \frac{x}{P} \right) - \frac{H}{A} \left(1 + \frac{1}{PA} \right) \quad (2)$$

ここで、 H 、 A および P は材料パラメータである。したがって、コンクリート圧縮試験結果から、降伏応力、破壊応力 σ_p および P を算出すると、 α を算出することができ、さらに適当な σ_p を決めると材料パラメータ A と H が求められる。

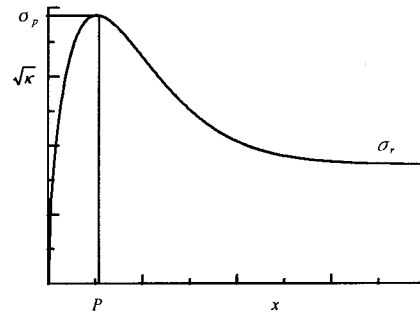


図-1 $\kappa - x$ 曲線

適合条件式などから塑性後の応力増分とひずみ増分の関係を求めると、その関係は次式のように表せる。

$$d\sigma_{ij} = \left(\begin{array}{c} C_{ijkl} - \frac{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}} \frac{\partial G}{\partial \epsilon_{kl}}}{\frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ab}} D_{abcd} \frac{\partial G}{\partial \epsilon_{cd}} - \frac{\partial F}{\partial \kappa} b_{ab} D_{abcd} \frac{\partial G}{\partial \epsilon_{cd}}} \right) d\epsilon_{kl} \quad (3)$$

3. 鋼・コンクリート合成断面梁・柱要素と RC 断面梁・柱要素の剛性マトリックスの誘導

合成断面梁・柱要素と RC 断面梁・柱要素の弾塑性有限変位解析において、以下のような仮定を設ける。

- (1) 軸方向変位および曲げ変位に対しては、平面保持の仮定が成立するものとする。
- (2) コンクリートの引張剛性は完全に無視できるものとする。
- (3) 鉄筋とコンクリートおよび鋼パネルとコンクリートは完全に剥離、ずれは生じないとする。
- (4) 曲げに伴うせん断ひずみは無視できるものとする。

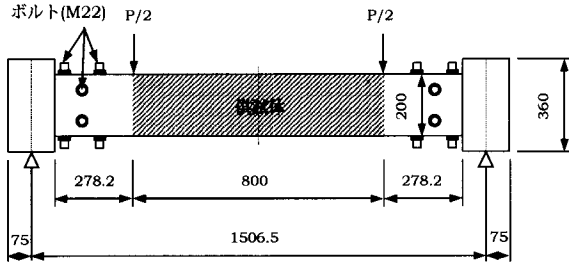


図-3 合成断面供試体の側面図(単位: mm)

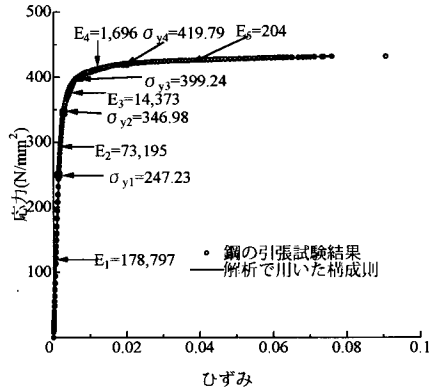


図-4 鋼材の応力-ひずみ曲線

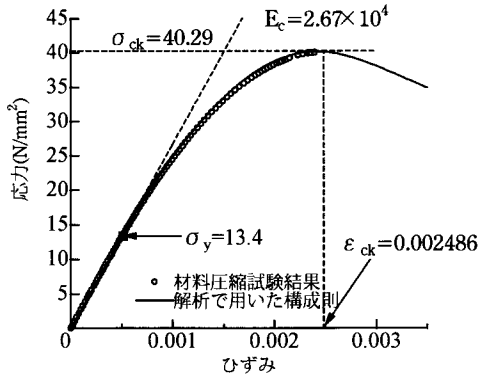


図-5 コンクリート材料の応力-ひずみ曲線

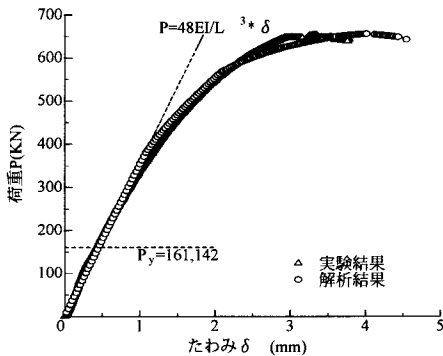


図-6 合成断面供試体の荷重-たわみ曲線

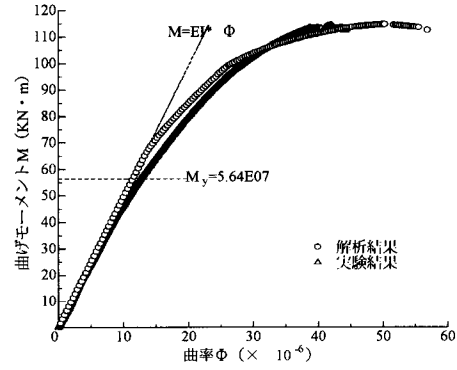


図-7 合成断面供試体の曲げモーメント-曲率曲線

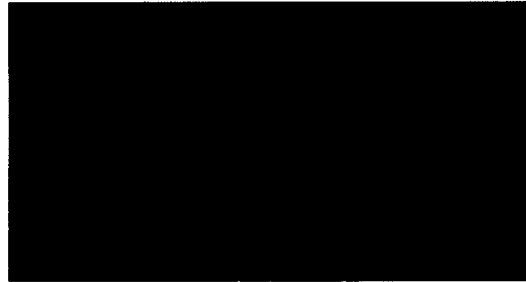


図-8 合成断面供試体の破壊状況

4.2 RC 断面

鉄筋コンクリート断面供試体⁷⁾(1320×176×150mm)は、圧縮側は無鉄筋で、引張側に2本のD25鉄筋が設置されている。そして、荷重際支間の中央部は純曲げを受けるように、荷重を同時に載荷した(図-9)。計測項目は、供試体中央の鉄筋のひずみと供試体中央付近の圧縮側コンクリート表面ひずみとした。供試体に用いた鋼材の応力-ひずみ関係とコンクリート材料の応力-ひずみ関係は図-10と図-11に示す通りである。

実験値の平均値と解析とを比較した結果((解析結果-実験結果)/実験結果), 最大曲げモーメントは約7%, 最大曲げモーメントが生じた際の曲率は約9%の差が生じた(図-12)。解析には、曲げによって生じるせん断変形を考慮に入れていないためと考えられる。図-13には、実験終了時の破壊状況を示す。

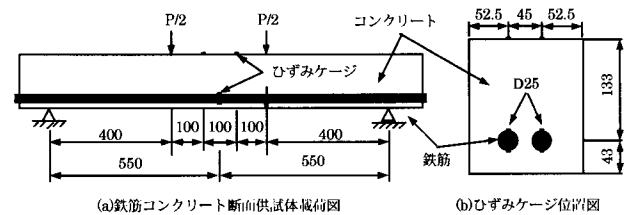


図-9 RC断面供試体の側面図と断面図(単位: mm)

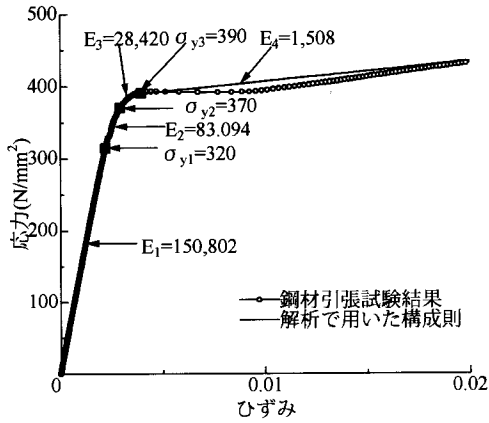


図-10 鋼材応力-ひずみ曲線

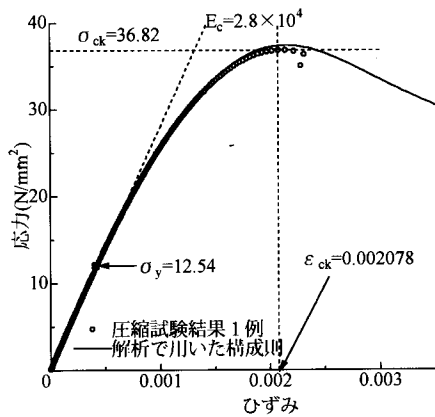


図-11 コンクリート応力-ひずみ曲線

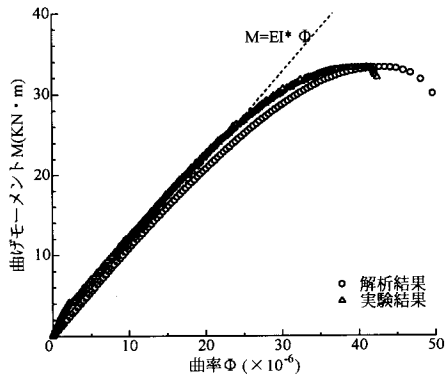


図-12 RC断面供試体の曲げモーメント-曲率図



図-13 破RC断面供試体の壊状況

5. まとめ

本研究では、鋼・コンクリート合成断面の骨組有限要素解析に必要な鋼・コンクリート合成断面梁要素およびRC断面梁要素をひずみ軟化域まで考慮できる構成則を用いて定式化し、既開発の骨組有限変位要素解析プログラムに組み込んだ。そして、構築したプログラムを用いて解析を行い、合成断面梁の曲げ載荷実験の実験結果と比較し、組み込んだ要素の妥当性について検証した。その結果、載荷実験から得られた最大終局荷重と解析結果の終局荷重はほぼ一致し、構築したプログラムにより合成断面桁とRC断面桁の終局荷重の予測が可能であることが確認した。さらに、鋼・コンクリート合成断面とRC断面とからなる2径間連続混合桁構造を適用し、弾塑性有限変位挙動の解明に有効であることが確認した。

今後は、鉄筋コンクリート要素で、せん断が支配的となる場合、その曲げによるせん断変形を考慮する必要がある。さらに、現在のプログラムに、複雑な形式の複合橋梁の解析が行えるように、プレストレスコンクリート断面要素も導入する必要がある。

参考文献：

- 1) 皆川勝, 市川岳, 杉山貴昭：ひずみ軟化材料に対する構成則のひずみ空間における定式化, 構造工学会論文集, Vol.45A, pp.363-371, 1999.
- 2) Chen, W.F.: コンクリート構造物の塑性解析, 色部誠, 河角誠, 安達洋監訳, 丸善株式会社, 1985.
- 3) Kioussis, P.D.: Strain space approach for softening plasticity, ASCE, Vol.113, No.EM2, pp.210-221, 1987.
- 4) 水野英二, 畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性モデル化, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.2, pp.85-94, 1991.
- 5) 田中克弘：骨組構造物としての鋼橋の弾塑性有限変位解析と耐力力照査法に関する研究, 大阪市立大学博士論文, 大阪市立大学工学部土木研究学科, 平成12年2月.
- 6) 城岡正和：鋼・コンクリート合成部材の圧縮・曲げクリープ挙動の解明と予測手法の開発に関する実験的研究, 大阪市立大学修士論文, 大阪市立大学工学部土木研究学科, 平成13年2月.
- 7) 小原菜美子：信頼性指標を用いた鋼部材およびコンクリート部材の曲げ強度評価に関する基礎的研究, 大阪市立大学卒業論文, 大阪市立大学工学部土木研究学科, 平成15年2月.