

I-28 鋼によるコンクリート拘束効果と材料劣化の三次元解析

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 内海 和仁
 東北学院大学工学部土木工学科 正 員 中沢 正利
 東北大学大学院工学研究科 正 員 岩熊 哲夫

1. はじめに

複合構造の一つである複合ラーメン橋は耐震性の向上など様々な利点を有し、ここ数年で施工されるようになった構造である。その鋼主桁と横桁でRC橋脚上端部を囲うように拘束した剛結部における応力伝達は、上部工の鋼主桁→横桁→スタッドジベル→RC橋脚という経路をたどるが、その他にも剛結部全体としての拘束効果も期待される。この拘束効果はコンクリート製橋脚を鋼板や被膜シートで補強する事例からも確認されている。これはコンクリート塊の終局状態での剥落や分離を防止することによる効果と考えられるが、これらの現象を考慮した解析が困難なことも一因となって、拘束効果の定量的評価はいまだなされているとは言い難い。

そこで本研究では鋼2主桁複合ラーメン構造の剛結部分を取り出し、コンクリート材料に対する鋼材による拘束効果と材料劣化の基本的な特性を三次元の非線形有限要素解析により追跡する。数値計算には材料中の微視的空隙（ボイド）の挙動に着目したボイド損傷理論に基づく構成則を導入する。なお、コンクリートの亀裂の発生や進展をボイドの増加に置き換えることで材料劣化の程度が表される。

2. ボイドによる損傷理論

多孔質延性材料に対して適用されるボイド損傷理論は、材料中の微視的空隙（ボイド）が負荷による塑性変形に伴って増大し、それにより材料内部に損傷が蓄積されて最終的な破壊に至るという着想に基づく。本解析では Tvergaard¹⁾ が実験的な研究に基づいて改良した以下の降伏関数を用いる。

$$\Phi = \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_M^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{q_2}{2} \frac{\sigma_{kk}}{\sigma_M}\right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$ は材料の相当応力、 σ_M は母材の相当引張り応力（初期降伏前は初期降伏応力 σ_Y である）、 f はボイド体積分率、 σ_{kk} は材料の垂直応力の和、 q_1, q_2, q_3 は調整パラメータである。

ボイド体積分率の発展則に関しては、Burlion ら²⁾ がコンクリート材料に対する実験的な研究により提案した以下の式を用いる。

$$\dot{f} = k(1-f)f\dot{\eta}_{kk}^p \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\eta}_{kk}^p$ は塑性体積ひずみ、 k はボイド体積分率の成長速度を調整するパラメータである。本解析では文献²⁾に基づいてコンクリート材料に対する f の初期値を $f_1=0.30$ 、また $k=105$ とおく。

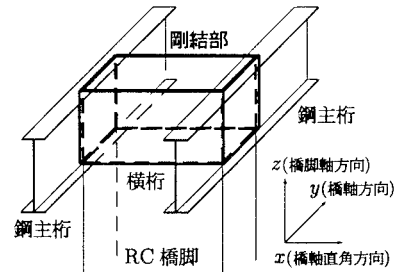


図-1 鋼桁-RC橋脚剛結部

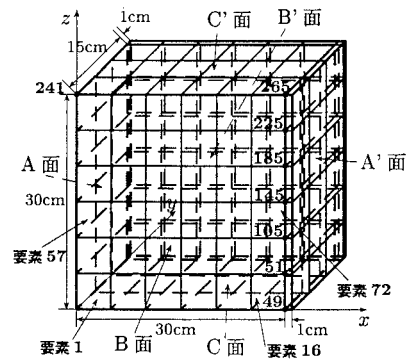


図-2 有限要素モデル（280節点、168要素）

3. 数値解析例

図-1は鋼2主桁複合ラーメン構造の剛結部を簡潔に表したものである。太線で描いた剛結部分を直方体のコンクリート塊に鋼材を巻いた単純な構造物とみなし、圧縮や曲げの荷重条件にて解析する。その剛結部の寸法比は橋軸方向、橋軸直角方向、橋脚軸方向に1:2:1であり、鋼材の板厚を橋軸方向の30分の1と設定した。対称性から図-2に示した4分の1の有限要素モデルを用いる。なお、鋼材を巻かないコンクリート塊のみについても同様に解析し、それらの結果を前者に対しては○印や△印、後者に対しては実線や点線などの曲線で描いて比較する。

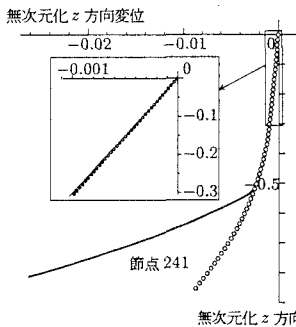


図-3 荷重-変位関係 1 (圧縮)

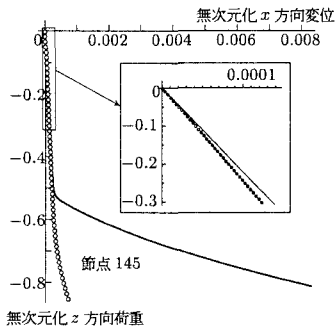


図-4 荷重-変位関係 2 (圧縮)

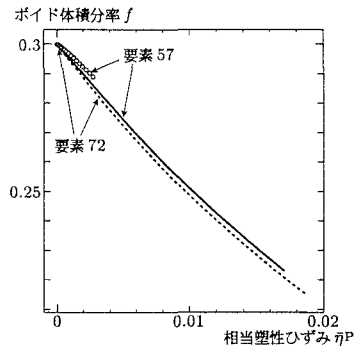


図-5 ボイド体積分率の変化 (圧縮)

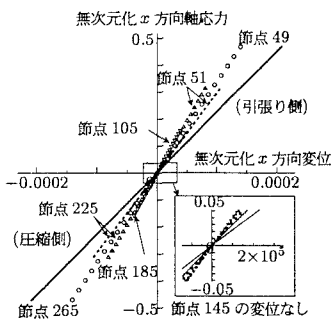


図-6 荷重-変位関係 1 (曲げ)

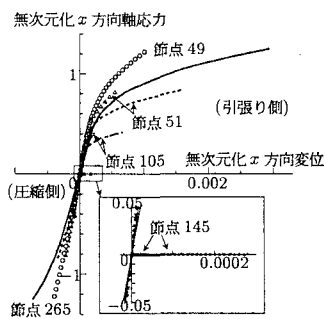


図-7 荷重-変位関係 2 (曲げ)

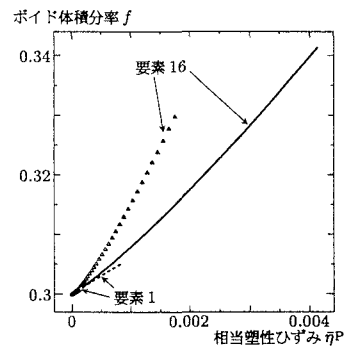


図-8 ボイド体積分率の変化 (曲げ)

まず、圧縮作用として C' 面上の各節点に対して z 軸負の方向に等分布荷重を与えた。境界条件は A, B, C 面上の節点が各面に垂直な方向には動かないように固定した。図-3、図-4 はそれぞれ節点 241 と節点 145 における荷重-変位関係である。前者は載荷方向の変位に着目しているのに対し、後者は載荷方向に垂直な方向であるため正の変位となっており、つまり物体が膨らもうとしているのがわかる。どちらも弾性域から鋼によって変位が抑制される傾向にあり、さらに塑性域では顕著な差が生じている。すなわち、鋼による拘束効果が発揮されていると考えられる。図-5 は要素 57 と要素 72 におけるボイド体積分率の変化である。同じ荷重が作用したにも関わらずその差は著しい。ここで、圧縮作用によってボイドが減少するのはこの損傷理論の特徴の一つである。

次に、曲げ作用としてモデルの上側が圧縮領域、下側が引張り領域となるように A' 面上の節点に対して y 軸方向には一様である三角形の分布荷重を x 軸方向に与えた。境界条件は A, B 面上の節点が各面と垂直な方向に、また原点に位置する節点が 3 方向とも動かないように固定した。図-6、図-7 はそれぞれ降伏する直前までと降伏後のある荷重レベルまでの各節点の荷重-変位関係である。図-6 ではコンクリートが降伏し始める荷重は同じでも、鋼による拘束が働いているために変位は小さくなると考えられる。図-7 より降伏後の変位についてもやはり小さく、その差も大きい。また、初期に中立面上に位置する節点 145 では塑性変形が進むにつれ正の変位が生じているが、これは中立面よりも下の引張り領域においてボイドの増加を伴った塑性変形が進行し、中立軸が圧縮側にシフトされることにより引張り領域が拡大するためである。ここで、この時点での要素 1 と要素 16 におけるボイド体積分率の変化を図-8 に示す。明らかにボイドの増加、すなわち損傷の蓄積が少ないことがわかる。

以上から、本解析により弾性変形の段階から鋼による拘束効果が存在し、降伏後の塑性変形においてもこの拘束効果はさらに大きく発揮していることと、それに伴い損傷の蓄積も低減されることを数値的に示すことができた。

参考文献

- 1) Tvergaard, V. : Material fracture by void growth and coalescence, *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 27, pp.83-151, 1990.
- 2) Burlion, N., Gatuings, F., Pijaudier-Cabot, G., Daudeville, L. : Compaction and tensile damage in concrete: constitutive modelling and application to dynamics, *Computer method in applied mechanics and engineering*, Vol. 183, Issues 3-4, pp.291-308, 2000.