

VI-160 RC 構造物の安全性評価と補修・補強設計への非線形 FEM 解析の活用

九州大学大学院博士後期課程 学生員 黄 玲
九州大学大学院博士後期課程 正会員 杣 辰雄
九州大学大学院工学研究科 正会員 彦坂 照

1. 緒 言

鉄筋コンクリート構造物の設計規準は、限界状態設計法の導入を含む研究および技術の進歩、設計荷重の増大、被災経験などを通じてこれまで数次にわたり改訂されてきた。このため、旧規準で設計された既設 RC 構造物の中には、地震荷重以外の常時荷重に対しても現行の規準を満足しない不適切な配筋・段落しや低い耐荷力レベルのものが見られる。本論文では、通常の理論式や経験式で対処することが難しい部位に潜在的弱点を有する RC 構造物を例にとり、非線形 FEM 解析を活用してその耐荷挙動を予測したうえ、適切な補強工法の選定と補強設計を行った結果を報告する。

2. RC 構造物の非線形 FEM 解析¹⁾

RC 構造物には、作用外力の増大につれてひび割れ、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊などが生じる。非線形 FEM は、このような現象をコンピュータ内で再現する有力な解析手法であり、材料非線形性のモデル化に当たって特に重要なものは次の5つである。①多軸応力下のコンクリートの非線形挙動、②コンクリートの引張ひび割れ挙動、③鉄筋の降伏、④ひび割れ面におけるせん断応力の伝達、⑤鉄筋とコンクリート間の付着挙動。本研究の二次元 FEM 解析では上の①～③の非線形性を考慮し、コンクリートの圧縮には弾塑性モデル、ひび割れには分布ひび割れモデルを用いる。④はせん断剛性低減係数 β ($0 \leq \beta \leq 1$) を用いてコンクリートのせん断剛性 G をひび割れ発生後 βG に変化させることにより、間接的に考慮した。⑤は付着すべりをモデル化するリンク要素を用いて考慮できるが、ここではすべりを無視して完全付着を仮定した。

3. 既設 RC 壁式橋脚の安全性照査

図-1 は、昭和 53 年に道路橋示方書が体系化される以前の規準(下部構造設計指針)に基づいて設計施工された RC 壁式橋脚(壁厚 2m)の一例で、上部構造は 2 径間連続 6 主桁非合成鋼桁である。平成 5 年に道路橋の設計活荷重が 20tf から 25tf に引き上げられたことに対応する補強の要否を検討する過程で、橋脚張出しはり部の引張鉄筋の不十分な定着長による耐荷力不足が懸念された。すなわち、2 段に配置された張出しはりの引張鉄筋 D29×19 本が、橋脚躯体内 1.5m の位置で切断され、D16×7 本に急激に段落しされている。現行の規準^{2,3)}によれば、片持ばり等の引張鉄筋の定着長は、断面の有効高さだけ定着部に入った位置を起点として算定すべきである。本例のような壁式橋脚の橋軸直角方向の破壊に対する安全度を通常の理論式や経験式で評価することは困難である。そこで、死荷重 + LF (荷重係数)×[活荷重+衝撃荷重]の荷重組合せについて LF を増加させる荷重増分非線形 FEM 解析を行い、 $LF \geq 2.5$ により終局荷重に対する安全性を照査した。

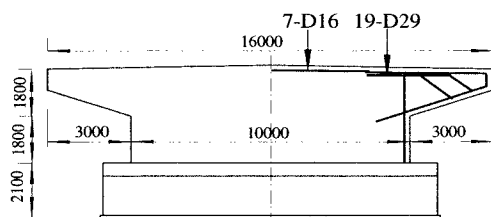


図-1 RC 壁式橋脚の諸元 (mm)

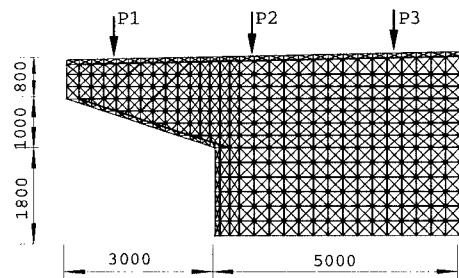


図-2 壁式橋脚の FEM メッシュ (mm)

キーワード： 補修・補強, RC 構造物, 壁式橋脚, プレストレス導入工法, 鋼板接着工法

連絡先： 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1, Tel & Fax: 092-642-3260

FEM メッシュを図-2 に示す。構造と荷重の対称性を考慮して壁式橋脚の 1/2 を解析対象とし、橋脚下端はフーチング天端で固定境界条件を与える。コンクリートにはひびずみ 3 角形要素を用いて設計基準強度 $\sigma_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ から材料特性を定め、鉄筋(SD295)には一次元弾塑性棒要素を用いた。

図-3 は、活荷重係数 LF を縦軸にとり、本橋脚および張出しはり部の引張鉄筋を現行規準通りに伸ばして定着した場合の荷重-変位(張出しはり先端) 曲線を比較したものである。本橋脚は $LF=0.7$ ではりの固定端上縁に初期ひび割れを生じるが、 $LF=1.2$ で駆体内 1.5m の段落し部に生じるひび割れが急激に成長して最大荷重($LF=1.3$)に至り、終局荷重に対する安全性($LF\geq 2.5$)を満たさない。これに対し、引張鉄筋の段落し位置を現行規準に従って駆体内部 2.5m の位置にシフトした橋脚は $LF=4.0$ まで引張鉄筋が降伏せず、最終的にはりの固定端で破壊する。本橋脚の破壊時($LF=1.3$)および現行規準で設計した橋脚($LF=2.5$)のひびわれパターンを図-4 に示す。

4. RC 壁式橋脚の補強設計への非線形 FEM 解析の活用

張出しはり部の引張鉄筋の不適切な定着により耐荷力が不足する本壁式橋脚の補強には、プレストレス導入工法、鋼板または FRP の部分的接着工法などの採用が考えられる。ただし、鋼板や FRP は上部工(6 主桁鋼鈑桁)の支承が設置される橋脚天端面を避けて橋脚側面にしか接着できないため、補強効率は落ちると思われる。既設 RC 構造物をこれらの工法で補強する場合の補強効果の評価や補強設計にも、それぞれの補強材の非線形材料モデルを組み込むことにより、FEM 解析を容易に活用できる。ここでは、次の 3 つの補強工法の比較検討結果を述べる。

- ①左右張出しはり端断面の上縁から 30cm に定着する PC ケーブルにより有効緊張力 123tf を導入する。
- ②橋脚天端から下方 1.8m までの両側面に、6mm 厚の SS400 相当鋼板を接着する。
- ③上記②と同じ範囲の両側面水平方向に、引張強度 $35,500\text{kgf/cm}^2$ 、設計厚さ 0.167mm の炭素繊維シートを 2 層接着する。

図-5 は①~③の補強後の橋脚について、前述の補強前と同様に活荷重係数 LF を増加させる非線形 FEM 解析を行い、得られた荷重-変位曲線を比較したものである。プレストレス導入によって初期ひび割れ発生荷重が $LF=1.6$ まで上がり、 $LF=2.5$ でも引張鉄筋は降伏しない。橋脚両側面に接着する鋼板が初期ひび割れ発生荷重に及ぼす効果は小さいが、鋼板の鉄筋換算効果により引張鉄筋段落し部の補強効果は極めて大きい。補強鋼板の降伏点が鉄筋より低い場合、 $LF=3.3$ で鋼板が鉄筋に先行して初期降伏する。炭素繊維シート接着は、本橋脚の場合は補強効果を期待できない。以上の解析結果と経済性を考慮して、本橋脚の補強には PC 外ケーブル工法、または張出しはり部から駆体内をコアポーリングして PC 内ケーブル(グラウト有り) による工法を用いるのがよいと判定される。

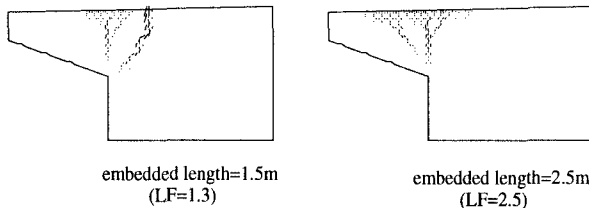


図-4 ひび割れパターン

参考文献

- 1) 彦坂 照ほか：鉄筋コンクリート構造物の非線形 FEM 解析における付着すべりモデルの精密化，構造工学論文集 Vol.40A, 1994 年 3 月。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成 3 年版]設計編，1991 年 9 月。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編，IV 下部構造編，1996 年 12 月。

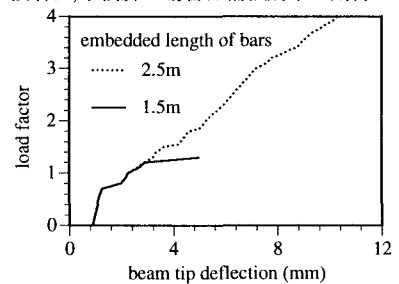


図-3 荷重-変位曲線

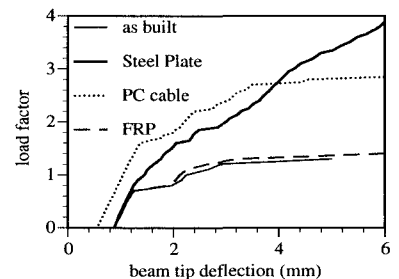


図-5 補強後の荷重-変位曲線