

(117) 揖斐川橋の終局限界状態における非線形挙動

日本道路公団 名古屋建設局 構造技術課 正会員 池田 博之
 日本道路公団 名古屋建設局 四日市工事事務所 正会員 前田 晴人
 ○住友建設㈱・ドーピー建設工業㈱・三菱重工業㈱共同企業体 正会員 諸橋 明
 住友建設㈱・ドーピー建設工業㈱・三菱重工業㈱共同企業体 正会員 大岡 昭雄

1. はじめに

径間中央部の一部を鋼桁とした複合エクストラードード橋である揖斐川橋は、径間の約2/3が斜材によって補剛されている。斜材の疲労設計から、その供用限界状態における制限値は0.6fpu (fpuは斜材の引張強度)を用いているが、終局限界状態における斜材張力の応力増加量は、今まで詳細に検討された事例はない。また、従来の手法である供用時の弾性解を荷重係数倍して終局時の検討をおこなう方法は、適切に斜材張力増加が評価されているかどうかが不明である。

本橋では、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した荷重漸増法による解析をおこない、終局限界状態における主桁、内外ケーブル及び斜材の挙動についての検証を行うとともに、橋体の安全性を照査した。

本稿は、終局限界状態における非線形解析の結果及び弾性解を用いた従来手法との比較について報告するものである。

2. 橋梁概要

橋梁諸元(表-1)、橋梁一般図(図-1)及び主桁断面図(図-2)を下記に示す。

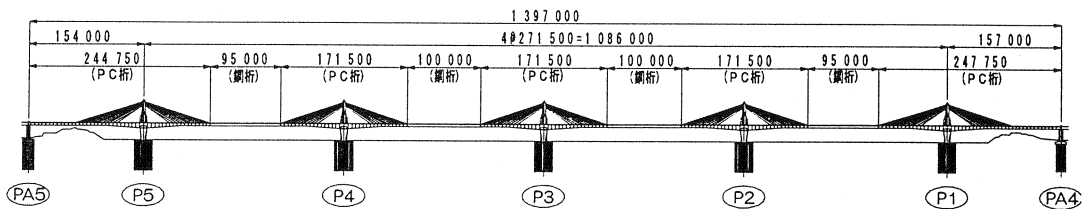


図-1 橋梁一般図

表-1 橋梁諸元

路線名	第二名神高速道路
道路区分	第1種2級
構造形式	PC-鋼複合6径間連続エクストラードード橋
橋長	1397.0 m
支間	152.0m + 4@271.5m + 155.5m
有効幅員	2@14.000 = 28.000m ~ 19.986+19.858 = 39.844 m
活荷重	B活荷重
使用材料	
主桁コンクリート	$f'_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$
内ケーブル	SWPR7B 12S15.2
外ケーブル	SWPR7B 19S15.2、27S15.2
斜材	$\phi 7 \times 163$

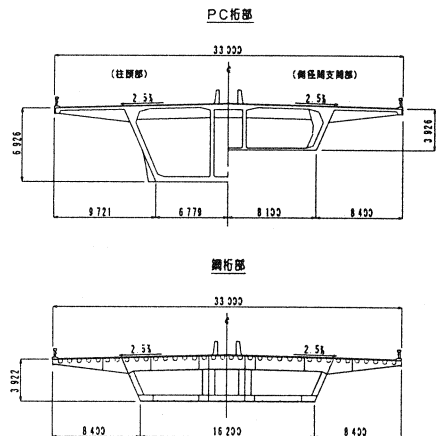


図-2 主桁断面図

3. 非線形解析による終局限界状態の検討

3.1 解析概要

中間橋脚柱頭部(P2)及び側径間支間部(P1~PA4)に着目し、全体系モデルの非線形解析を行い、終局限界状態における主桁、内外ケーブル及び斜材の挙動について検証を行う。解析手法、条件を以下に示す。

- 1) 着目断面：P2柱頭部(P3側)及びP1~PA4側径間支間部
- 2) 対象荷重：死荷重+活荷重(クリティカルとなる組み合わせケース1.7(D+L)を対象とする)
活荷重は各着目断面において曲げモーメントが最大となるよう載荷させるものとする。
- 3) 解析プログラム：ファイバーモデルを用いた変位法による平面骨組解析¹⁾
- 3) 解析モデル及び荷重載荷法：図-3に示す。

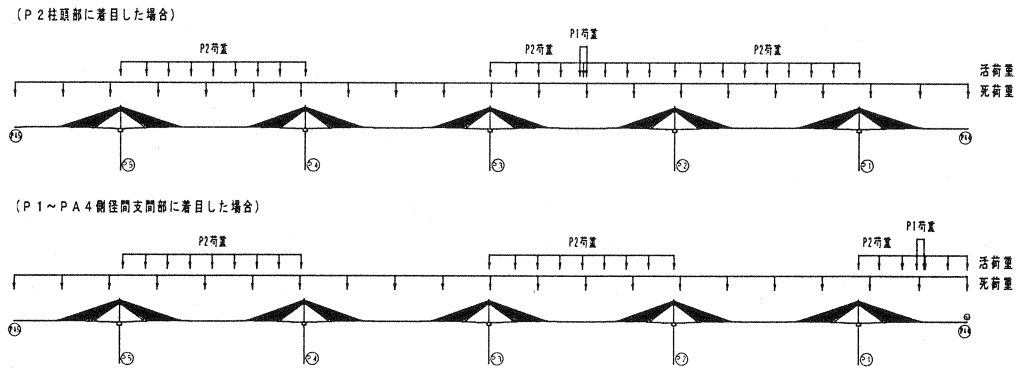


図-3 解析モデル及び荷重載荷法

- 4) 各部材の特性：コンクリート桁；非線形部材，鋼桁・主塔・橋脚・支承；線形部材，内外ケーブル、斜材；非線形部材
- 5) 荷重載荷方法：(死荷重+活荷重)をコンクリートが終局歪み($\epsilon_{cu}=2500\mu$)に至るまで漸増載荷。
- 6) 材料特性：図-4に示す。

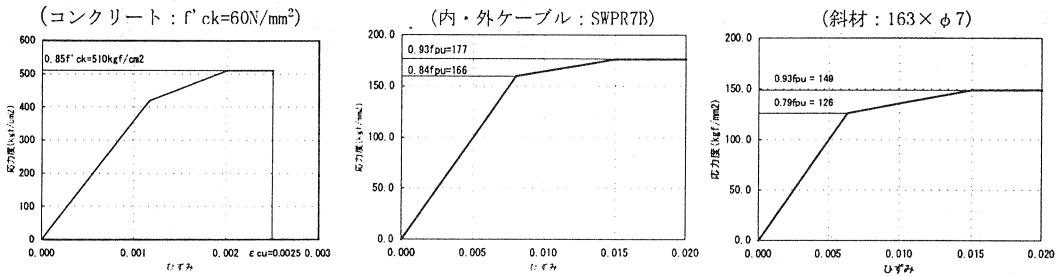


図-4 各材料の応力度-ひずみ関係

- 7) PC鋼材配置断面図：図-5に示す。

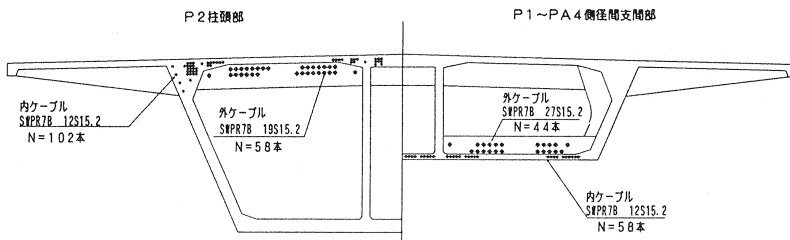


図-5 PC鋼材配置断面図

3.2 解析結果

3.2.1 中間橋脚柱頭部に着目した場合

1) 柱頭部のコンクリート応力度

柱頭部下縁のコンクリート応力度(図-6)は、荷重とともに増加し、(死荷重+活荷重)×1.8~1.9 間において終局歪みの 2500 μ に達している。一方、柱頭部上縁(図-7)については、荷重の増加とともに圧縮応力度が低下し、(死荷重+活荷重)×1.5 のステップにおいて初期の圧縮応力度が相殺されている。これ以降、主桁上縁に発生する引張力の増分は、内・外ケーブルによって負担されている。

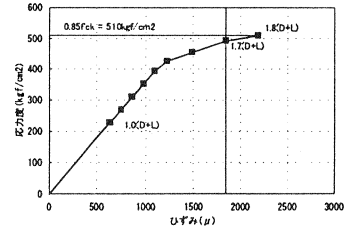


図-6 柱頭部下縁コンクリート応力度

2) 柱頭部の内ケーブル応力度

内ケーブルの張力は、(死荷重+活荷重)×1.5 までは荷重の増加とともに緩やかに増加している。それ以降は、上縁の引張力増加分がすべて鋼材によって負担される。このため、(死荷重+活荷重)×1.5 を超えると、内ケーブルの張力増加が顕著になる。しかしながら、構造物全体の終局状態(死荷重+活荷重)×1.8 においても降伏するには至っていない。(図-8)

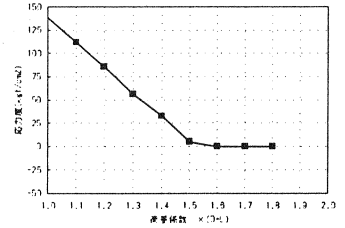


図-7 柱頭部上縁コンクリート応力度

3) 柱頭部の外ケーブル応力度

P2 柱頭部の外ケーブルに着目すると、(死荷重+活荷重)×1.5 までは、ほとんど張力の増加は見られない。(死荷重+活荷重)×1.5 以降においては、外ケーブル張力は緩やかに増加している。最終的には、構造物全体の終局状態直前(死荷重+活荷重)×1.7 において、外ケーブルの張力増加は 10kgf/mm² 程度となっている。(図-9)

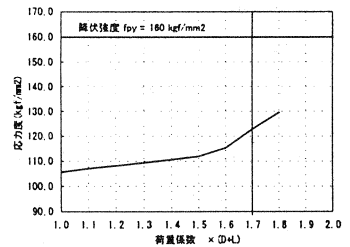


図-8 柱頭部内ケーブル応力度

4) 斜材張力

P2 橋脚の P3 側斜材に着目すると、荷重の増加に伴って斜材張力も増加している。その増加速度は最上段斜材がもっとも速く、(死荷重+活荷重)×1.5 において降伏点(0.79 σ_{pu})に達している。一方、もっとも増加速度の遅い最下段斜材においても、最上段斜材が降伏した(死荷重+活荷重)×1.5 以降その増加速度が速くなり、(死荷重+活荷重)×1.7 において、最下段までの全ての斜材が降伏点を超えている。(図-10)

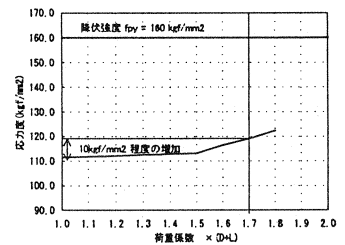


図-9 柱頭部外ケーブル応力度

エクストラドーズド橋では、最外縁の抵抗鋼材である斜材は、供用時における斜材張力の制限値を 0.6 σ_{pu} としているため、終局時には降伏に至るものと考えられる。これは、エクストラドーズド橋が、供用状態のみならず、終局状態においても斜材能力を有効に利用しているということになる。

5) 終局状態における破壊形態

以上の結果から、中間橋脚(P2)柱頭部に着目した場合の終局状態における破壊過程は以下のように考えられる。

①(死荷重+活荷重)×1.5: 柱頭部上縁コンクリートにひび割れ発生。

最上段斜材が降伏点に達する。

②(死荷重+活荷重)×1.7: すべての斜材が降伏点に達する。

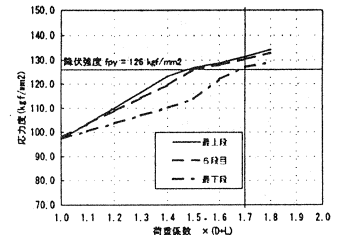


図-10 P2 斜材応力度

③ (死荷重+活荷重) × 1.8~1.9 間: 柱頭部下縁のコンクリートが終局ひずみに達する。

内ケーブル; 降伏せず。25 (kgf/mm²) 程度の張力増加。

外ケーブル; 降伏せず。10 (kgf/mm²) 程度の張力増加。

斜材; 全段降伏点以上。

主桁の変形図を図-11 に示す。

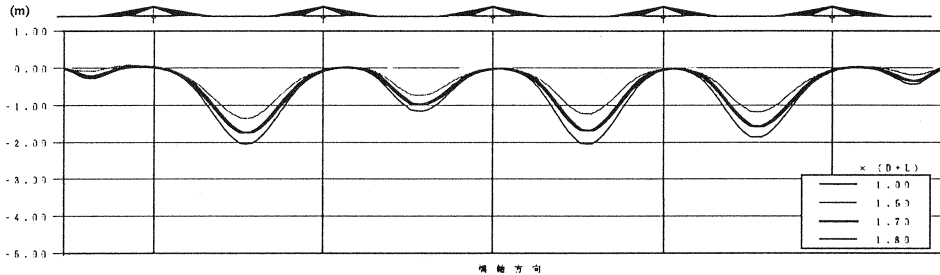


図-11 主桁変形図

3.2.2 側径間支間部に着目した場合

1) 側径間支間部及び柱頭部のコンクリート応力度

側径間支間部に着目した場合においても、P2 柱頭部 P3 側下縁のコンクリートが終局ひずみを迎える結果となっている(図-12)。P2 柱頭部下縁のコンクリート応力度は、3.2.1 と同様に(死荷重+活荷重) × 1.8~1.9 の間で終局歪みの 2500 μ に達しているのに対し、P1 柱頭部下縁においては (死荷重+活荷重) × 1.8 の状態でひずみが 1700 μ、着目している側径間支間部上縁においてはひずみが 1100 μ で(図-13)、いずれも終局ひずみには至っていない。

また、側径間支間部下縁については、(死荷重+活荷重) × 1.3~1.4 間において初期の圧縮応力度が相殺され、これ以降の引張力は内ケーブル及び外ケーブルにより負担されている。(図-14)

2) 側径間支間部下縁の内ケーブル応力度

内ケーブルの張力は、下縁コンクリートの圧縮応力が相殺される(死荷重+活荷重) × 1.3~1.4 以降急激に増加するものの、全体の終局状態においても降伏張力には至っていない。最終的に終局状態直前の張力増加量は、30 kgf/mm² 程度である。(図-15)

3) 側径間支間部下縁の外ケーブル応力度

外ケーブルの張力についても、下縁コンクリートの圧縮応力が相殺される(死荷重+活荷重) × 1.3~1.4 以降増加が顕著となるが、その増加速度は緩やかである。最終的に終局状態直前の張力増加量は、20kgf/mm² 程度である。(図-16)

4) 斜材張力

斜材段数の多い P1 橋脚部斜材(12 段)に着目すると、P2 橋脚部と比較して張力の増加速度は若干遅いが、終局状態直前において、最

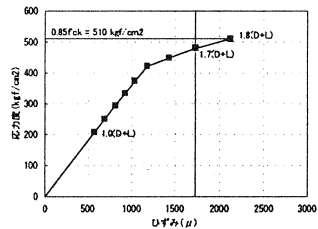


図-12 柱頭部下縁コンクリート応力度

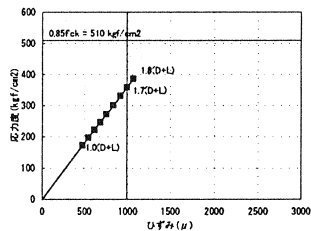


図-13 側径間支間部上縁コンクリート応力度

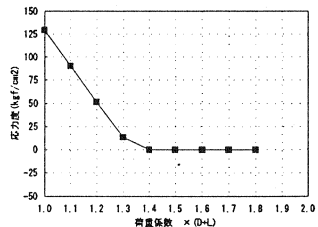


図-14 側径間支間部下縁コンクリート応力度

上段～6段目斜材は降伏点に達している。最下段斜材については、最終的に降伏点の90%程度まで張力が増加している。(図-17)

5)終局状態における破壊形態

側径間支間部に着目した場合の荷重載荷状態における破壊過程は以下のように考えられる。

- ①(死荷重+活荷重)×1.3～1.4:側径間部下縁コンクリートにひびわれ発生。
- ②(死荷重+活荷重)×1.5 :P2柱頭部上縁のコンクリートにひびわれ発生。
- ③(死荷重+活荷重)×1.5～1.6:P2、P1最上段斜材が降伏点に達する。
- ④(死荷重+活荷重)×1.8～1.9:P2柱頭部下縁のコンクリートが終局ひずみに達する。

側径間支間部下縁コンクリートは、ひずみが1100 μ 程度。

内ケーブル;降伏せず。35(kgf/mm²)程度の張力増加。

外ケーブル;降伏せず。20(kgf/mm²)程度張力増加。

斜材;全段降伏点以上。(P1の最下段斜材は降伏点の90%程度)

本橋は、側径間側 P1 橋脚部の斜材段数が中間橋脚部より1段多いこと、側径間部下縁側の内・外ケーブルの張力増加が上縁側配置ケーブルに比べて大きいことにより、側径間に着目した荷重載荷状態においても、中間橋脚柱頭部においてコンクリートが圧縮破壊に至る結果になったものと考えられる。

4. 終局限界状態における照査法

4.1 概要

全体モデルの非線形解析により、終局限界状態における構造物全体の安全性は確認できたが、設計計算の過程において全設計断面に着目して非線形解析を実施することは非常に労力を要する。そこで、従来の手法(弾性解析によって得た断面力を荷重係数倍して各断面ごとに検討を行う方法)により集計した終局状態の断面力との比較を行い、エクストラードゾド橋における斜材張力の評価法についての検証を行うとともに、非線形解析を実施することなく、終局限界状態における照査を行う方法について検討を行った。

4.2 非線形解析結果と従来の手法との比較

中間橋脚 P2 柱頭部において比較検討を行うものとする。

非線形解析により得られた 1.7 (D+L) 時の断面力(M1)及び従来の手法により求めた断面力(M2)を下記に示す。ここでM2は、次の手順により算出するものとする。

①斜材張力による断面力は作用側に考慮する。

②1.7 (D+L) 時における斜材張力は降伏張力とする。→斜材の降伏張力による主桁断面力 Spy (弾性解) を算出。

$$M1 = -265,000 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M2 = 1.7(D+L) + S_{py} = -283,000 \text{ t}\cdot\text{m}; S_{py} \text{ は斜材の降伏張力による主桁断面力(弾性解)}$$

Spy を用いた M2 は、非線形解析結果による M1 より 7%程度大きい値であり、安全側の結果となっている。

本橋では、上記の M2 を用いて各設計断面における終局状態の照査を行い、必要最小限の断面耐力(MR)が得られるよう、各部材厚及び PC 鋼材量等の設定を行った。尚、断面耐力(MR)の算出においては、外ケーブルの張力増加量として非線形解析の結果を反映させ 10kgf/mm² を考慮した。

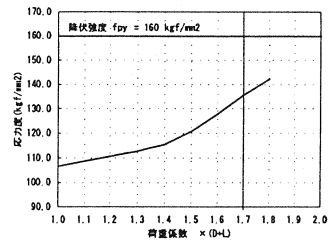


図-15 側径間支間部内ケーブル応力度

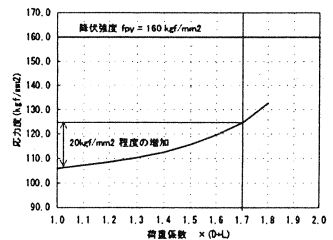


図-16 側径間支間部外ケーブル応力度

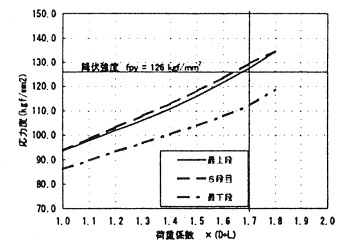


図-17 P1斜材応力度

4.3 外ケーブルを併用したエクストラードード橋の終局限界状態における照査法

従来、斜張橋の終局限界状態における斜材張力の評価は、斜材張力による断面力(S_0)及び張力調整量による断面力(S_1)を用いて、式(1)により求めていた例が多い。

$$S = 1.7 \times S_0 + S_1 \quad (1)$$

ここに S : 弾性解を用いて算出した終局限界状態における斜材張力による断面力

ここで、4.2の結果より、式(1)に対して斜材の降伏張力を上限とする制限を付け加えた式(2)により斜材張力の評価を行えば、合理的かつ安全側の結果を得ると考えられる。

$$S = 1.7 \times S_0 + S_1 < S_{py} \quad (2)$$

ここに S_{py} : 斜材の降伏張力による断面力(弾性解)

次に、外ケーブルを併用したPC橋における曲げ耐力については、終局限界状態における外ケーブルの張力増加を適切に設定することができれば、従来の手法を用いて算出することが可能である。外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準(案)²⁾では、外ケーブルの張力増加を $\Delta f_p = +20 \text{ kgf/mm}^2$ とする提案がなされているが、小坂らの研究³⁾による提案式(式(3))を用いることも考えられる。

$$\Delta f_p = k / (L_2 / d_p) \quad (3)$$

ここに Δf_p : 外ケーブルの張力増加 (N/mm^2)

L_2 : 外ケーブルの定着間距離 (m)

d_p : 外ケーブルの有効高さ (m)

k : 係数 連続桁、連続ラーメンの支間断面照査の場合 $k=4000$

連続ラーメンの中間支点断面照査の場合 $k=1500$

本橋におけるP2柱頭部及びP1~PA4側径間支間部において、式(3)により張力増加を算出すると、

P2柱頭部 $L_2 =$ 平均100m、 $d_p =$ 平均6.6m、 $\Delta f_p = k / (L_2 / d_p) = 1500 / (100 / 6.6) = 99 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ kgf/mm}^2$

側径間支間部 $L_2 =$ 平均65m、 $d_p =$ 平均3.8m、 $\Delta f_p = k / (L_2 / d_p) = 4000 / (65 / 3.8) = 234 \text{ N/mm}^2 = 24 \text{ kgf/mm}^2$ となり、非線形解析の結果と概ね一致している。

式(2)及び式(3)を用いる手法は一例であるが、外ケーブルを併用したエクストラードード橋の終局限界状態における照査方法については、今後の検討課題であると考えられる。

5. おわりに

世界でも類を見ない複合エクストラードード橋である掛斐川橋において、終局限界状態における非線形解析を行い、主桁、内・外ケーブル及び斜材の挙動を検証し、安全性の確認を行った。この結果、終局時には斜材張力が降伏に至ることから、エクストラードード橋は供用時のみならず終局時においても斜材の能力を有効に利用できる構造であることが判明した。

本稿が、今後の同種橋梁の設計に際して一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 玉置一清, 新井英雄, 板井栄次, 山崎淳: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について, プレストレストコンクリート技術協会, 第5回シンポジウム論文集, 1995年10月
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会: 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準(案), 1996年3月
- 3) 小坂寛己, 川田成彦, 津野和男: 外ケーブルを用いたPC橋の終局曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 NO. 613/V-42 1999年2月