

特集

大偏心ケーブルPC橋

大偏心ケーブルPC橋の構造特性 ——「エクストラードズド橋」と他の「大偏心外ケーブルPC橋」——

山崎 淳*

1. はじめに

エクストラードズド PC 橋と他の大偏心外ケーブル PC 桁橋が最新の橋梁技術に占める重要な地位にもかかわらず、エクストラードズド PC 橋に相当する日本語の名称がいまだなく、エクストラードズド PC 橋というものに対する解釈の幅はかなり広い。「大偏心ケーブル PC 橋」という語は意味がさらに不確かであるが、「エクストラードズド PC 橋」(図-1)¹⁾と他の「大偏心外ケーブル PC 桁橋」(偏心の大きな外ケーブル方式の緊張材を持つ PC 桁橋。ひとつのモデルの概念を図-2 に示す)の両方を含む意味で使われ始めた。二者に共通する構造特性もあるが相違点も多く、いずれの分類の橋も構造特性が一般化されたわけではなく、設計示方書もこれらの橋に特有の規定はいまだ定めていない。よってこの種の橋の計画・設計に際して先例を参考にする場合には、設計の条件を部分的に踏襲することは危険であって、安全で耐久的な橋が堅実に施工できるような計画・設計のためには、構造性能の的確な解析と材料学と施工の最新の知識をもとに総合的で合理性のある検討が必要である。以下にこれらの二つの橋の形式につき、ごく限られた例ではあるが構造の概要を紹介し、構造特性については筆者の個人的見解を述べる。

2. エクストラードズド PC 橋の出現と構造特性

PC 連続桁橋と PC 連続ラーメン橋の技術が完成され

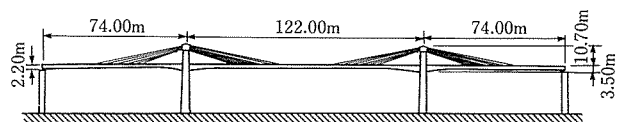


図-1 エクストラードズド PC 橋の構造の概要図
(小田原ブルーウェイブリッジより作成)

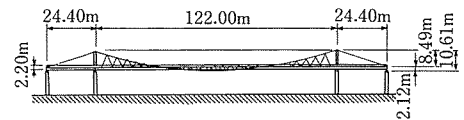


図-2 大偏心外ケーブル PC 桁のひとつのモデル構造

て間もなく、これと形状の全く異なる斜張橋が出現し急速に普及し、現在両者は共存している。低い塔と斜材を持ち、桁高が従来より小さい連続ラーメン橋がスイス人の Menn によりガンター橋として造られた。ガンター橋の斜材ケーブルは最終段階ではコンクリートの斜版で覆われ、外観は斜材ケーブルの見える斜張橋とは全く異なる全コンクリート橋梁ではあるが、張出し架設時は斜材ケーブルとして機能している意味で斜張橋の一種である。ガンター橋は斜張橋の塔が高いことと桁橋の桁高の大きさや重量の問題を同時に軽減している。わが国ではこれをエクストラードズド PC 橋の原型とする説がある。他方 PC の新しい構造概念として PC 桁橋の緊張材の偏心を桁高さの範囲以上に大きくとることにより耐荷性能を高める有利性を形に現す外ケーブル方式の連続桁橋(または連続ラーメン橋)の原理がエクストラードズド PC 橋という名でフランス人の Mathivat により発表され、猪股によりわが国に知らされた。このようにエクストラードズド PC 橋の構造特性は、斜張橋を原型として変形された斜張橋の一種であるとする説と、また、外ケーブル方式 PC 連続桁の一種である説とがある。

3. エクストラードズド PC 橋の理論、前提条件と多様性

エクストラードズド PC 橋の形状と耐荷機構の関係の



* Jun YAMAZAKI
日本大学
理工学部土木工学科
教授

理論的考察は、小宮²⁾、岡・春日³⁾、長井⁴⁾らが、実際に行った設計の豊富な経験に基づいて述べている。計画・設計においてどのような形状とすべきかを機能上の理由とともに与えるものである。この論議は筆者の力の及ぶところではないので上記の文献に譲り、本稿では触れていない。

小田原ブルーウェイブリッジ^{1),5)} (図-1) は場所打ち張出し施工による3径間ラーメン(74 m+122 m+74 m)であり、塔、桁と橋脚は連続している。起工間近かの最新のエクストラードドPC・鋼複合橋である木曾川橋⁴⁾は5径間連続桁(5×275 m)で、塔と桁は連続し、橋脚上に免震支承で支えられ、スパン中央部は死荷重を減ずるために鋼桁とされ、コンクリート桁部はプレキャストセグメントで計画されている。この二橋を比較しただけでも、エクストラードド橋という名称は同じでも構造特性、設計・施工方法は多様に異なるものが存在することがわかる。現在まで構造特性を論ずる場合にエクストラードド橋という時は、単に完成系の構造特性を意味するのではなく張出し架設により施工されることを前提条件としている。よって構造は完成系のみではなく架設時の構造系の応力状態も配慮して定められたものである。

最初のエクストラードドPC橋は、活荷重による斜材の応力の変動が十分小さくなるように設計されたが、活荷重による斜材の応力の変動は、(1)スパン長(死活荷重比を変化させるため)、(2)スパン・塔の高さ比、(3)桁と斜材の荷重分担比、等が影響要因であり、設計の要求に応じて適切に選ぶべきものである。

4. サドル構造、斜材ケーブルの防食、防振、耐疲労性

エクストラードドPC橋の特徴である低い塔の頂部に集中して数段の斜材ケーブルを定着することは困難なため、斜材ケーブルを貫通させサドル形式で支持する。サドルで斜材ケーブルは滑動に対して固定する⁵⁾。斜材ケーブルの防食のために、鋼より線のエポキシ被覆・亜鉛メッキ、またグラウトおよびこれらの組み合わせたものをPEまたはFRP管に収納する。風に対する防振対策は斜材ケーブル両端部での曲げ応力を緩和するための構造および材料の工夫、または斜材ケーブルに取り付けるダンパーにより行う⁵⁾。これらは斜張橋の場合と同じであるが、斜張橋よりも斜材ケーブルの角度が小さく、長さも短いため斜張橋ほど要求は厳しくない。活荷重に対する耐疲労性の要求も斜張橋より緩やかである。

5. エクストラードドPC橋とPC桁橋の緊張材の応力の比較

最初のエクストラードド橋の設計では、斜材ケーブルの活荷重による応力増加は、斜張橋の場合よりはるかに小さく、従って斜材ケーブル緊張時の許容応力度を設計基準強度 f_{pud} の60%としてよいことが判明した。これは桁橋の緊張材の許容応力度と同じである。この斜材ケーブルの緊張時の応力状態から、エクストラードド橋を斜張橋の一種としてではなくむしろ桁橋の一種と位置付ける考え方もある。ケーブル緊張時の許容応力度を桁橋と同じに出来るように設計することは可能であるとはいえず、それが普遍的に最善であることが確立したわけではない。緊張材の応力状態は、スパン長や斜材ケーブル角度などの構造の形状により変化するものであり、設計事例もまだ多くはないので、エクストラードド橋としての構造特性が狭い範囲に確定されているわけではない。

6. 大偏心外ケーブル方式PC桁、有限変位理論、終局強度の不足と対策

桁内外ケーブル方式のPC桁は、コンクリート桁と緊張材が結合部以外では分離しているため、緊張材に付着のある内ケーブル方式の桁のようなコンクリートと緊張材からなる通常の梁理論は成り立たない。構造解析は変位に基づくコンクリート桁の変形と緊張材の変形に基づく一種の有限変位構造解析理論により行われる。佐藤・山本らは46 mの2径間セグメント構造の設計につき⁶⁾、小坂・川田・玉置らはスパン50 mの3径間構造の試設計につき⁷⁾それぞれ構造解析理論と結果を示した。

供用限界状態から終局限界状態までの外ケーブルの応力増加が付着のある鋼材より小さいため終局強度が不足する場合がある。梅津・藤田らは、基礎的実験研究により外ケーブル方式PC桁の偏心を大にすることにより、終局強度を向上できることを示し、精度良く解析できる方法も示した⁸⁾。フランスでは、桁内外ケーブル方式を中間支持点で固定する装置が使われているという⁹⁾。

7. 偏向部(デビエータ)と緊張材のフレッチング疲労

外ケーブル方式の桁の緊張材の位置の保持は、必要箇所に設けた偏向部と呼ぶコンクリートの突起または隔壁に空けたダクトに通すことで行う。ダクトはゆるやかな曲率と口径変化を与えた鋼管で形成され、緊張材を格納したPE管が鋼管に接する。この部分での鋼より線の状態は、応力、曲げ角度、グラウトまたは他の防錆材、鋼より線のエポキシ被覆の材質や塗布方法などにより個々に異なる。フレッチング疲労は素線同士が接触した部分が破壊の起点になると考えられており、応力的・化学的環境に依存すると推測されるが、フレッチング疲労強度

の予測方法はまだ確立していない。実験に基づく研究は、テキサス大学の Breen により、またわが国では梅津・新井・上田らにより進められており既に重要な知見が公表されている¹⁰⁾。

8. 大偏心外ケーブル方式 PC 桁の形状の極限モデル

大偏心外ケーブル方式 PC 桁の形状の特徴を明確にするために極限の状態のモデルを考えて諸量の数値を用いて形状の特徴の考察を試みる。詳細は参考文献 11) に示される。与えられたスパンに対して、(1) 桁高最小、(2) フルプレストレス、(3) 断面係数最小、(4) ケーブルサグ最小、を拘束条件と仮に定めた。断面積は当然小さい方が良いが、(3) にかかなり規定される。桁高最小条件は活荷重たわみの制限から、また断面係数最小はモーメント設計用値の範囲と許容応力度とからそれぞれ通常の PC 桁橋と同じ方法で定まる。前記の条件を満たすように諸量は逐次論理的に求まる。許容応力度 100 kgf/cm^2 、活荷重を 400 kgf/m^2 、箱桁断面とし、中央スパン長を小田原ブルーウェイブリッジと同じ 122 m 、サイドスパン 24.4 m の 3 径間連続梁とした場合の形状の極限は図-2 のようになった。桁高は 2.2 m 、プレストレス力は 4560 tf 、断面係数 Z は 5.58 m^3 (理論最小値 2.79 m^3)、ケーブルサグは 10.61 m 、 $\phi 15.2$ 鋼より線本数は 304 本である。活荷重によるたわみ・スパン比は $1:1073$ 、緊張材の応力の変動は設計基準強度 f_{pud} の 2.8% となった。

9. モデル大偏心外ケーブル方式 PC 桁の P- δ 効果

上記のように極限までコンクリート部材をスレンダーにすると終局限界状態では、変形(たわみ)による軸力の付加モーメントが生ずる。死活荷重の 1.7 倍に耐えることが解析で確認されたが曲げ耐力における付加モーメントの比率は 50% にもなった¹¹⁾。設計荷重を超える荷重の範囲の安全のために桁内にも鋼材を配置する必要がある。この例では圧縮引張とも上下の床版に施工できる限界に近い鉄筋量が必要となった(矩形断面の引張鉄筋比で 0.8%)。その場合の付着の有無、またプレキャストセグメント工法の継ぎ目の検討などはまだ十分明らかにはされていない。

10. エクストラードード橋とモデル大偏心外ケーブル方式 PC 桁の形状と耐荷機能の比較

この二つの形式の比較をする前提として耐荷機能を、他の参考文献 3) でも行われているようなコンクリート桁とケーブルが分担する荷重の比率で考えてみる。PC

の特性として死荷重はプレストレスにより支えられるから(教科書などの表現を借りれば Load balance または Dead load is carried free などと同じ意味)、以後の論議は、活荷重の桁とケーブルの分担比であり、それは剛性の比と同じことである。

モデルでは「スパン・サグ比」は $11.5:1$ 、「ケーブルと桁の荷重分担比」は $40:60$ であることが導かれた。これらの値は、設計条件として任意に与えたのではなく、論理的に導かれたものである点に特色がある。

PC の弯曲したケーブルにより桁に作用する上向力は、ケーブルの「偏心」ではなくて「サグ」に関係する。エクストラードード橋の斜材ケーブルは塔頂と桁の間にあるから上向力はケーブルの量と角度、すなわち塔の高さに関係する。よってケーブルにより桁に作用する上向力を比較する場合は、エクストラードード橋は塔の高さ、モデルの場合はサグを取るのが適切である。小田原のエクストラードード橋の塔高さは 10.7 m でモデルのサグ 10.6 m とほぼ一致する。小田原のエクストラードード橋の斜材ケーブルの $\phi 15.2$ 鋼より線本数は 304 本でモデルと一致する。このように同じコンクリート桁断面に対し、プレストレスの緊張材の量と、上向力の要因である塔高さとサグが一致する意味で、二つの構造は PC として類似している。ただしプレストレスに関するモデルでの検討は供用限界状態の荷重に対するのみであり地震荷重は検討していない。小田原ブルーウェイブリッジでは、橋脚と結合する部分の桁に斜材ケーブルとほぼ等量の内ケーブルが配置されており、モデルでは終局強度のための鉄筋を併用している。

11. 大偏心ケーブル PC 橋の多様な形式

エクストラードード PC 橋は実施例が数、規模、形とも異なる橋が出現し、構造の特色も明らかとなってきた。大偏心外ケーブル PC 連続桁橋も構造の有利性は明解である。張出し架設の場合は、エクストラードード PC 橋とする必要があり、支保工が使用できる場合は、大偏心外ケーブル PC 連続桁橋が使用できる。

PC 桁橋を成り立たせるための緊張材の効果を高める補強の考え方には様々な観点があるため、構造のかたちには様々なものがある。

スイスのガンター橋や名取川橋のような斜版橋と呼ばれる形式、フィンバックと呼ばれる形式のアメリカのバートンクリーク橋やスイスのリツ橋は、等断面の連続梁の桁高の範囲を超える偏心をとった緊張材を桁と一体に作ったコンクリート版の中に収納した形式は「内ケーブル方式の大偏心ケーブル PC 橋」である。

上路式の自旋式吊り橋の一例を池田・則武ら¹²⁾が実験室規模の構造物を示したが、構造の成立ちから見て大

偏心ケーブルPC橋の一種である。

桁の上側にケーブルのある自碇式吊り橋がシュツットガルトのシュライヒにより数多く設計されてきており、橋の形状と力学の関係および美観を考える上で多大の啓示が得られる。しかし吊り構造としての特徴が強く、プレストレスが構造の成立ちの必要条件となっているものは筆者の調べた範囲では見当たらないので今回の検討の対象には入れていない。

吊り床版上路橋（速日峰橋，潮騒橋）は，形が自碇式吊り橋に似ているが，外的アンカーを用いるので大偏心外ケーブルPC橋の対象としなかった。

12. 美 観

最初のエクストラードード橋の形式選定のひとつの理由は構造物としての美観であった。景色や光と橋の形状と色彩が調和し，無駄と醜い要素がなく，車を走らせる人の目に視界の広さと安心感を与え，夜間も柔らかな照明で包むような走行誘導性が確保されていることが体感できるであろう。美観設計を担当した大野の形状，色，高欄などの橋梁付属物，および照明に関する理念の一端は参考文献¹³⁾に示されている。

13. おわりに：将来性と技術的社会的意義

世界で最初のエクストラードードPC橋がその概念と名称の発祥の地フランスにはなく日本の小田原ブルーウェイブリッジとして建設されたことは興味深い。発注者と設計・施工関係者が新しい試みの保証のために材料・構造の強度・耐久性とそれらの物理的・化学的裏付けの研究を実証的に積み重ねてきた。

「大偏心外ケーブルPC橋」という範囲に分類できる橋には様々な形状のものがあり設計方法も一律に定まったものはないが，共通して，どの形状のものも力学理論の理由が明解であり，コンクリート，鋼材，型枠など使用材料を削減して環境負荷を低減でき，軽量化また塔を低くすることによる耐震性の向上などから安全性も高い将来性に富んだ高性能の構造である。

昨年改定された土木学会コンクリート標準示方書の耐震設計編は，従来の仕様形式から性能要求形式に大きく変革した。同示方書の全体の次期改定では性能要求形式となることが予告されており，コンクリート構造の設計は，発注者が要求性能を示し，要求をどのように満たすかの設計者の技術力を競わせる環境へ動きだした。

エクストラードードPC橋ならびに大偏心ケーブルPC橋の発展を見れば，示方書などの設計規準に依存・従属することなく，産・官・学が協力して構造型理論と材料学の探求の正道を歩んで次々と新たな構造が現出し，今後世界的規模で環境に適合する橋梁の建設の技術競争

力が問われる時代にわが国の橋梁技術が十分対応できる活力があることを示している。

謝 辞

本稿の主題に関連する多くの道路・鉄道の橋梁および文献を引用できなかったのは筆者の力不足のためであり，読者および関係者のご寛恕を賜りたい。エクストラードードPC橋について小田原ブルーウェイブリッジに関してしか述べられなかったのは，技術内容をある程度多面的に関係者から話を聞くことができたのがこの橋に限られたためである。財・高速道路技術センターの「西湘バイパス（改築）橋梁構造物に関する技術検討委員会」委員各位，日本道路公団構造技術課，東京第一建設局，小田原工事事務所，住友・鹿島共同企業体各位よりエクストラードードPC橋について賜ったご教示に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 城野嘉明，多久和勇，春日昭夫，岡本裕昭：エクストラードードPC橋の計画と設計，橋梁と基礎，92-12，pp. 11~17
- 2) 小宮正久：エクストラードードPC道路橋の設計に関する一考察，土木学会論文集，No. 516/VI，1995，pp. 27~39
- 3) 岡 米男，春日昭夫，山崎 淳：エクストラードード橋の構造特性に関する一考察，プレレストレストコンクリート，Vol. 39，No. 2，1997
- 4) 長井 正：PC・鋼複合5径間連続エクストラードード橋（木曾川橋）の全体構造系の検討，第6回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，1996，pp. 451~456
- 5) 小野寺勇，相葉和俊，木水隆夫，春日昭夫，岡本裕昭：小田原港橋の施工，橋梁と基礎，94-7，pp. 2~6
- 6) 佐藤信雄，渡辺将之，鶴岡松生，山本 徹：内外ケーブル併用プレキャストセグメント工法を適用した添川高架橋の設計，第6回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，1996，pp. 309~314
- 7) 小坂寛己，川田成彦，春日昭夫，玉置一清：外ケーブルPC橋の曲げ終局耐力に関するケース・スタディ，第6回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，1996，pp. 287~292
- 8) Umezu, K. Fujita M. Tamaki K. Arai H & Yamazaki J : Study of the ultimate flexural strength of 2-span continuous beams using external cables, FIP Symposium 1996 London
- 9) エスイー協会・フランスの橋梁技術者による講演会資料，1996
- 10) 梅津健司，藤田 学，新井英雄，上田多門：外ケーブル偏向部のフレッチング疲労特性に関する研究，第6回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，1996，pp. 281~286
- 11) 高原裕一，山縣敬二，藤田 学，山崎 淳：大偏心外

—特集／論説—

- ケーブルPC橋の設計の合理性, 第6回プレストレスト
コンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,
1996, pp. 427~432
- 12) 池田尚治, 則武邦具, 山口隆裕, 南 浩郎: 吊床版構造
を活用した自碇式複合PC橋に関する研究, 第3回プレ
ストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論
文集, 1992, pp. 207~212
- 13) 大野美代子: 橋の付属物, 橋梁と基礎, 95-8, pp. 72~
75

【1997年2月11日受付】