

1. まえがき

1.1 わが国における橋梁建設の現状

最近、公共事業関係の予算が大幅に減っていること、大型プロジェクトがなくなりつつあること、補修・補強を要する橋梁が増えてきているがそれらは大きく黒字になるような仕事になっていないことなどのために、橋梁業界の景気が非常に悪くなってきている。その関係で、橋梁業界の技術者が他の業界へと出て行ったり、希望する学生が橋梁関係の会社に就職するのが難しくなっている。このように、現在、橋梁業界は大きな過渡期にきている。この節では、このような状況を把握し、これからの橋梁工学の動向について考えてみた。

なお、この節は、文献1)を参考にまとめた。

1.1.1 現状の把握

橋梁建設の現状を以下にまとめる。

- ・明石海峡大橋、多々羅大橋などの長大橋の建設など、日本の橋梁技術は、世界のトップレベルに達しつつある。しかし、世界では、独創性という面で、日本の橋梁技術は、あまり評価されていないようである。
- ・ところが、現在ではこのような長大な橋梁の建設が少なくなってきた。
- ・公共事業関係の予算が大幅に減らされて、競争原理をベースとした合理化および低コスト化が、橋梁建設の大きな課題となってきた。
- ・その関係で、鋼材とコンクリートまたは新素材とをうまく利用した複合橋梁の開発が活発になってきた。
- ・損傷が問題となる古い橋梁が増えてきた。これらの橋は、着実に毎年、1年ずつ古くなっていく。
- ・兵庫県南部地震の後、強地震動に対する橋梁構造物の安全性について明確にすることが、要求されるようになった。
- ・これに関連して、耐震設計において重要な部材である支承や基礎構造物の合理的な耐震設計法の検討・開発が必要になってきた。
- ・高架橋など、橋が町の景観に占める割合が大きくなった。
- ・今までの橋梁工学は、必ずしも、利用者や周辺住民の意見を聞いて発達してきたものではない。
- ・したがって、橋梁業界の仕事が、利用者や周辺住民に理解されていない、あるいは批判を受けている場合もある。
- ・国土交通省近畿地方整備局の課題（近畿のいま）として、以下の4つがあげられている。すなわち、「経済活力の低下からの回復」、「歴史的文化資産や国際交流の伝統を活かしたまちづくり」、「東南海・南海地震等の災害に備えた対策」、および「自然と共生した美しい地域づくり」の4つである。橋梁業界で言えば、競争原理に基づいたコスト縮減であり、環境との調和に配慮した安全で豊かで美しい橋梁建設、既存橋梁のリフレッシュ、および歴史的橋梁・国際的技術レベルにある橋梁の建設・保存である。
- ・世界的に橋梁の設計基準を統一しようという動きがあり、日本はそれに大きく遅れつつある。
- ・土木工学、その中にある橋梁工学も若者に人気がなくなってきた。

- ・橋梁工学は、古典芸術的な側面を持つようになってきた。すなわち、人気がない上に、その世界に入ると、給料は安いし、結構難しい面がある。数学もいるし、コンピュータも使う。
- ・土木技術者の社会的地位が年々低くなってきている。イギリスでは、偉大な英国人10人の中の第2位に土木技術者（橋梁技術者）のブルネルが入っている。
- ・土木技術者の技術者倫理が問われる出来事が増えている。
- ・大学における授業では、橋梁工学は、鋼構造も含めて、半期で2単位のところが多い。
- ・すなわち、今までの技術の蓄積を若者にほとんど伝承できない状況にある。
- ・コンピュータの発達により、設計・製作の自動化がかなり進んだ。
- ・伸縮継手、標識柱、照明柱、遮音壁、橋歴板などの附属構造物の損傷・事故が多くなってきた。これらの事故・損傷は、橋の強度に特に問題ない場合が多いが、第3者被害につながると社会に与えるインパクトが非常に大きい。
- ・公共構造物だけに、第3者被害や、技術的な不備に対する社会責任が厳しく追求される。
- ・既存構造物の維持管理では、現在の利用者のために必要な補修や補強の費用が将来の人々に負債を残す形でカバーされる。したがって、国からの予算はあまり期待できなくなり、いい仕事にならなくなりつつある。補修・補強でなく、再生・創造の発想が必要になっている。
- ・橋梁の仕事では、毎年、土木工学科で橋梁工学を勉強し、橋梁業界に就職することを希望して卒業する若者すべてが、食べていけなくなっている。
- ・会社の方も、リストラが進み、技術者の人数にゆとりがなく、知識を充電する時間がなくなりつつあるのではないか。また、橋梁業界全体の発展のために貢献できるゆとりがなくなりつつある。

1.1.2 これからの橋梁工学

以上の現状を踏まえ、これからの橋梁工学のありかたについて、以下にまとめる。

- ・維持管理をいい仕事、黒字になる仕事に切り変えることができるようなマネジメント技術を開発する必要がある。
- ・このように、これからは、工学だけでなく、経済学や経営学などを含むマネジメント学のようなものも勉強する必要がある。
- ・住民や利用者に満足していただけるように、既存構造物を再生、あるいは、かなり手を加えて新しいものに創造できる技術を開発する必要がある。
- ・橋梁工学を、鋼材を主とした工学から、どんな材料、すなわち鋼材でもコンクリートでも、その他の新素材でも扱える工学に再生する必要がある。特に、この本のテーマであるケーブル部材も、もっと気がるに利用して、経済性、合理性、および新しい構造を創造していけるようにならなくてはいけない。
- ・また、構造的にも、上部構造だけでなく、橋脚、および、それ以下の基礎構造物も含めて、全体の合理化・経済性を追求していく必要がある。
- ・さらに、土木以外の分野でも役立つような工学、すなわち現在の橋梁工学は、その適用範囲が土木分野における範囲を超えた領域も含めたものに拡大・再生する必要がある。

- ・地震はこれからも絶対になくならないし、レベル2の強地震動に対する耐震設計法は、まだ十分でない。したがって、これからもより合理的な耐震設計法の開発が必要である。
- ・安全と環境と経済性とを配慮したバランスのとれた橋梁工学への再生が必要である。
- ・明石海峡大橋に至るまでの膨大で深遠な橋梁技術の伝承のコンパクト化が必要である。
- ・特に、過去に起こった事故や損傷は、要点をコンパクトにまとめておく必要がある。
- ・国内では橋梁技術が世界レベルにまで達したが、それらの技術を使ってやるべき仕事が減ってきている。これらの技術を海外で生かし、仕事を取るためにも、海外でも活躍できる技術者を育成する必要がある。
- ・そのために、ISOに関連する世界的な設計基準の勉強・教育が必要である。大学では、わが国独自の道路橋示方書の説明的な教育からの脱出が必要である。道路橋示方書、その他の海外の示方書・指針を使わない、純解析的に行う橋梁の設計法、すなわち示方書・指針における近似設計式を使わない最適で合理的な無駄のない橋梁の設計法についても検討しておき、国際的な競争に打ち勝つ力を付けておく必要がある。このような力を身に付けておけば、他業界にも出て行きやすい。
- ・国際的な技術資格を取得しておくことが必要である。
- ・英語による技術者教育を導入する必要がある。
- ・さまざまなところにコンピュータが導入されている。コンピュータに強い技術者を優遇する傾向の育成が必要である。
- ・橋梁工学は、何かにつけ、納税者である一般の人々の理解と協力の上に成り立っているのだから、一般の人々に橋梁工学と橋梁業界について十分に知っていただくための活動が必要である。そのために、橋梁業界を紹介する簡単な本やホームページの作成が必要である。
- ・我が国の橋梁技術が世界的な水準になってきたためか、最近、我々もそうであるが、特に、若い技術者や研究者は、海外の文献をあまり読まなくなってきた。国際化という意味からも、海外の動向に目を向けることが大切である。
- ・業界および橋梁技術者を守る力強い組合の設立が必要である（医師会や弁護士会などのように）。
- ・橋梁技術者の社会的地位の向上に心がける必要がある。
- ・それに関連して、土木技術者倫理を徹底することが必要である。
- ・そのために、土木技術者各自が、土木技術者倫理に書かれている高邁な倫理規定を堅持できるということを証明するために、技術士や土木学会認定の技術者資格、および博士号を取得することも必要である。

このような状況を踏えて、これからの橋梁業界では、鋼橋業界とPC橋業界との競争でなく、お互いに協力して、周辺環境に配慮し、今までにない独創的なアイデアで新しい構造物を創造したり、既存の橋梁構造物を再生したりすることで、次世代を担う若者にも、周辺住民にも評価されるようにすることによって、この苦境を乗り越えていく必要がある。鋼橋関係者とPC橋関係者とで協力して完成したこの本「ケーブルを使った合理化橋梁技術へのノウハウ」が、このような方向への緒（いとぐち）になればと期待したい。

1.2 ケーブル系橋梁の歴史と現状

1.2.1 鋼橋

吊形式の橋梁は、つたやかづら等の蔓(つる)に引張強度が期待できる植物を材料として用いた原始的な吊橋に端を発し、世界各地に存在し、石橋よりもその歴史は古いといわれている。しかし、耐久性に乏しく、変形も大きく通行時に大きくたわむため重量物を運ぶのに不適當で、また雨水などにより朽ちるため、たびたび架けなおす必要があった。

したがって、近代構造物としての発展は、18世紀末の産業革命による鉄、特に鋼の大量生産が可能になったことによる。初期の吊橋では、鋼が主要な引張部材にチェーンやアイバーといった形で使用されたが、材料的な安定性に欠き破断しやすかった。その後、信頼性があり、強度が高く、しかも扱いやすいワイヤロープや平行線ストランドが開発されると、大部分の吊形式橋梁は、これらを用いて作られるようになった。また、橋梁形式としては、吊橋より斜張橋の方が古くから提案され、架設された。しかし、材料の問題や高次不静定となる構造的な難しさから落橋が相次ぎ、その発展は、第2次世界大戦後の電子計算機の出現を待たねばならなかった(斜張橋は、以下の(2)で詳述する)。

(1) 吊橋

近代吊橋は、19世紀初期、アメリカ合衆国のフィンレイの架けたジェイコブズクリーク橋(支間21m, 1801年)に始まるとされる¹⁾。それらはケーブルチェーンの破断などにより数年のうちにはほとんどが落橋した。その後、イギリスでのアイバーチェーンの発明(1817年)によりメナイ吊橋(支間168m)が架けられるなど、吊橋の技術発展の歴史は、欧州に舞台が移り、フランスでは、ワイヤを用いてかなりの数の吊橋が架けられた。また、1841年のJ.A.ローブリングの特許による平行線ケーブルのエアスピニング(以下、ASと略)工法でナイアガラ鉄道橋(支間240m)が1855年に完成し、その成功により次々とスパンを伸ばした。さらに、20世紀の始めに、モイセエフのたわみ理論の適用によりマンハッタン橋が架けられ、アメリカ合衆国を中心としてジョージワシントン橋(支間1,067m, 1931年)、ゴールデンゲート橋(支間1,280m, 1942年)といった長大吊橋が実現した。しかし、経済性の追及から桁の剛性をあまりにも小さくして風の動的作用によりタコマナロウズ橋(支間853m)が落橋(1940年)するなどの事故も生じた。しかし、補剛トラス形式で耐風性能を上げたり、ヨーロッパを中心とした流線形の箱桁を採用により、これらの問題を解決し、ハンバー橋(支間1,410m, 1981年)、グレートベルト東橋(支間1624m, 1998年)などが架けられ、スパンが伸びることとなる。

日本の近代吊橋の建設は、昭和37年の若戸大橋(支間370m, 1962年)からと大きく遅れて始まった。その後、関門橋(支間712m, 1974年)などでAS工法のほかプレファブストランド(以下、PSと略)工法なども導入され平行線ケーブルによる架設が本格化した。その結果、本州四国連絡橋の因島大橋(支間770m, 1984年)、大鳴門橋(支間876m, 1985年)、下津井瀬戸大橋(支間940m, 1988年)、南備讃瀬戸大橋(支間1,100m, 1988年)、そして世界最長の明石海峡大橋(支間1,991m, 1998年)が建設され、支間長の世界ランキング上位30橋中3分の1を占めるまでに至った(表-1.2.1)。

また、これらの技術は、レインボーブリッジ(支間500m, 1997年)、白鳥大橋(支間720m, 1998年)、安芸灘大橋(支間750m, 2000年)などと国内の橋梁のみならず、永宗大橋(支間400m, 2000年)、廣安大橋(支間500m, 2003年)、楊州大橋(支間1,600m, 建設中)など、韓国や中国でも活用

されている。さらに、今後も紀淡海峡大橋を始めとして大型プロジェクトの計画があり、その実現が期待される。

表-1.2.1 最大支間 世界ランキング (吊橋) 2005.10.20現在

順位	橋名	中央支間長 (寸法単位：m)	国名	完成年・月
1	明石海峡大橋	1,991	日本	1998.4
2	グレートベルト東橋	1,624	デンマーク	1998.6
3	江蘇潤揚長江大橋南沙	1,490	中国	2005.4
4	ハンバー橋	1,410	イギリス	1981
5	江陰長江公路大橋	1,385	中国	1999.9
6	香港青馬大橋	1,377	中国(香港)	1997
7	ベラザノナロウズ橋	1,298	アメリカ	1964
8	ゴールドンゲート橋	1,280	アメリカ	1937
9	ヘガクステン橋	1,210	スウェーデン	1998
10	マキノ橋	1,158	アメリカ	1957
11	南備讃瀬戸大橋	1,100	日本	1988.4
12	ファーティースルタンメハット橋	1,090	トルコ	1988
13	ボスポラス橋	1,074	トルコ	1973
14	ジョージワシントン橋	1,067	アメリカ	1931
15	来島第3大橋	1,030	日本	1999.5
16	来島第2大橋	1,020	日本	1999.5
17	4月25日橋	1,013	ポルトガル	1966
18	フォース道路橋	1,006	イギリス	1964
19	北備讃瀬戸大橋	990	日本	1988.4
20	セバーン橋	988	イギリス	1966
21	湖北宜昌長江大橋	960	中国	2001.4
22	下津井瀬戸大橋	940	日本	1988.4
23	湖北西陵長江大橋	900	中国	1996
24	広東虎門大橋	888	中国	1997
25	大鳴門橋	876	日本	1985.6
26	タコマナロウズ橋	853	アメリカ	1950
27	因島大橋	770	日本	1983.12
28	イルティシユ河橋	750	オーストリア	2000.1
29	安芸灘大橋	750	日本	2000.1
30	ニューカルキネス橋	728	アメリカ	2003.10
31	白鳥大橋	720	日本	1998
32	関門橋	712	日本	1973

(2) 斜張橋

吊形式橋梁の中で最近著しく発展した構造形式として斜張橋が挙げられる。近代の斜張橋²⁾の歴史は比較的新しく、スウェーデンのストレームズンド橋(支間 183m, 1955年)から始まり、ドイツを中心に発展した。初期の近代斜張橋には、ケーブルにロックドコイルロープ、あるいはスパイラルロープが用いられている。1950年代から1960年代にかけてドイツを始めとする欧州で建設された斜張橋には主にロックドコイルロープが使用された。代表的な斜張橋として、テオドルホイス橋(支間 260m, 1957年)、ゼフェリン橋(支間 302m, 1959年)、クニー橋(支間 319m, 1969年)などが挙げられる。わが国では、勝瀬橋(支間 128m, 1960年)が最初の斜張橋となる。

ロックドコイルロープは平滑な表面のため防食上有利であり、また断面が密で空隙率が小さいため同径のスパイラルロープに比べて高い強度が得られる。わが国でも初期にはロックドコイルロー

プが用いられたが、次第にパラレルワイヤストランドを束ねた平行線ケーブルが採用されるようになった。豊里大橋(支間 216m, 1970 年), 末広大橋(支間 250m, 1975 年), および大和川橋梁(支間 355m, 1984 年)が代表例である。この形式のケーブルは、吊橋のメインケーブルと同様の施工法により現場でストランドを束ねて断面を構成するものである。

1970 年代に、斜張橋は、支間長が 200~400m 程度の中規模の橋梁形式として、世界各地で建設されるようになった。例えば、デュイスブルクノイエンカンプ橋(支間 350m, 1971 年), アースキン橋(支間 305m, 1971 年), およびウェストゲート橋(支間 336m, 1978 年)のように、ケーブル段数は少数段、ケーブル断面は大断面の場合が多い。少数段形式の斜張橋では、一ヶ所あたりのケーブル張力が大きく、桁部でケーブルをスプレーするためケーブル定着構造が複雑になり、定着作業も煩雑になることが問題であった。従来のケーブルには、例えばロックドコイルロープの場合は弾性係数・引張強度が平行線ケーブルに比べて低く設計上不利である。一方、平行線ケーブルの場合は機械的性質に優れているものの、架設ケーブルに沿った足場上での防食作業が必要となるなどの課題があった。また、斜張橋に用いるケーブル材料には、高い応力変動に耐える疲労強度の優れたソケット定着構造が必要となり、また、腐食により損傷した事例などから防食性能の向上などが求められた。

1980 年代には、斜張橋の規模も次第に大型化し、支間長 400m を超える規模の斜張橋も建設されるようになった(表-1.2.2)。長大化に伴い、斜張橋の構造形式も次第にケーブルを集めて束ねるタイプ(以下、集合ケーブルタイプと呼ぶ)からモノストランドマルチケーブル形式へと変化した。マルチケーブル形式は、一箇所あたりのケーブル張力が小さく桁への応力を分散でき、ケーブル定着構造も簡易になる。さらに、桁の架設に本体のケーブルを利用することで合理的な施工が可能となるため、長大化する斜張橋には合理的な形式である。ケーブルにもマルチケーブル形式のニーズに適合したタイプが求められ、従来のケーブルに替わる新たなケーブル材料として、疲労強度の高いソケット定着構造を持ち、直径 7mm の PC 鋼線を平行に束ねポリエチレン管に挿入して空隙にグラウト材を充填する平行線ケーブルが開発された。マルチケーブル形式の斜張橋の増加に伴い、このグラウトタイプの平行線ケーブルが用いられるようになった。ハレ・ボグズ橋(支間 373m, 1982 年), 岩黒島橋・櫃石島橋(支間 420m, 1988 年), 天保山大橋(支間 350m, 1991 年)などで、この方式のケーブルが採用されている。

グラウトタイプの平行線ケーブルは、防食作業の改善が図られたものの、架設現場での充填作業が必要であった。この問題点の解決を目指して開発されたのが被覆平行線ケーブルである。被覆平行線ケーブルは、亜鉛めっき鋼線で構成されたストランドの外周にポリエチレンの押出し被覆を施したもので、両端には疲労強度の高いソケットが取り付けられている。リーリングアンリーリング時の型崩れを防止するため、強度特性の低下しない範囲でストランドにわずかなよりが加えられている。したがって、力学特性は平行線ケーブルと同等であり、防食性能も高く、現場での防食作業が不要となった。この被覆平行線ケーブルは、1990 年前後から現在までに建設された支間長 400m を超える多くの長大斜張橋、例えば、横浜ベイブリッジ(支間 460m, 1989 年), 東神戸大橋(支間 485m, 1994 年), 名港中央大橋(支間 590m, 1998 年), 多々羅大橋(支間 890m, 1999 年)などで採用されている。さらに、支間長 1,000m を超える長大斜張橋にも使用が予定されている。また、細径の PC ストランドをポリエチレン被覆して現場で束ねて定着する方式のケーブルも開発され、ノ

ルマンディー橋(支間 856m, 1995 年)などに用いられている。

表-1.2.2 最大支間世界ランキング (斜張橋)

2005. 10. 20 現在

順位	橋名	中央支間長 (寸法単位：m)	国名	完成年・月
1	蘇州蘇通長江公路大橋	1,088	中国	2008 予定
2	ストーンカッターズ橋	1,018	中国	2007 予定
3	厦門厦章大橋	900	中国	建設中
4	多々羅大橋	890	日本	1999.5
5	ノルマンディー橋	856	フランス	1995
6	仁川大橋	800	韓国	建設中
7	南京長江三橋	648	中国	2005.10
8	南京長江二橋	628	中国	2001
9	武漢白沙州長江大橋	618	中国	2000
10	ニューミシシッピ川橋	610	アメリカ	建設中
11	福建青州閩江大橋	605	中国	2001
12	上海楊浦大橋	602	中国	1993
13	名港中央大橋	590	日本	1998
14	上海徐浦大橋	590	中国	1996
15	舟山桃天門大橋	580	中国	建設中
16	リオン・アンティリオン橋	560	ギリシャ	2005
17	スカルズンド橋	530	ノルウェー	1991
18	汕頭蚶石大橋	518	中国	1998
19	安徽安慶長江大橋	510	中国	建設中
20	鶴見つばさ橋	510	日本	1994
21	湖北荊州長江大橋	500	中国	2002
22	生口橋	490	日本	1991
23	オーレスンリンク橋	490	デンマーク	2000
24	東神戸大橋	485	日本	1994
25	女神大橋	480	日本	2006
26	湖北劉黄長江大橋	480	中国	建設中
27	香港汀九大橋	475	中国	1999
28	西海大橋	470	韓国	2000
29	アレックスフレザー (アニス) 橋	465	カナダ	1986
30	武漢軍山長江大橋	460	中国	2001
31	横浜ベイブリッジ	460	日本	1989.9
32	第2フーグリー橋	457	インド	1989
33	重慶大佛寺長江大橋	450	中国	2001
34	ラマ5世 (チャブラヤ) 橋	450	タイ	1987.9
35	抗州湾大橋	448	中国	2007 予定
36	重慶長江二橋	444	中国	1996
37	ルナ橋	440	スペイン	1983
38	バイチャイ橋	435	ベトナム	2006
39	安徽銅陵長江大橋	432	中国	1996
40	吸水門橋	430	中国(香港)	1997
41	上海南浦大橋	423	中国	1991
42	岩黒島橋・櫃石島橋	420	日本	1998.4

1990 年前後から、モノストランドから成るマルチケーブル形式の斜張橋のケーブルには、力学特性や防食性能ともに、ケーブルの制振対策の問題がクローズアップされるようになった。斜張橋のケーブル部材は基本的に断面が円形で構造減衰も小さく、風による振動が発生しやすい。さらに、斜張橋ケーブルは、支間長の増大に伴いケーブル長も 500m 程度まで長尺化し、基本モードの固有

振動数も低下する傾向にある。斜張橋ケーブルの風による振動現象は、従来から知られている渦励振に加えて、降雨時に発生するレイン・バイブレーション、並列ケーブルに発生するウェイク・ギャロッピングなどが発生するようになった。特に、ポリエチレンで防食被覆された表面が平滑なケーブルには、レインバイブレーションがしばしば認められるようになった。レインバイブレーションは、降雨時にケーブル表面に形成される水路により空力的に不安定になり発生する振動であり、マルチケーブル形式の斜張橋ケーブルの重要な課題として種々の検討がなされた。

レインバイブレーションを抑制する対策として、ケーブル定着部近傍に減衰装置を設置する方法がある。しかし、斜張橋ケーブルが長尺化するにつれ取り付け位置や構造等の制約から十分な制振効果が得られない場合がある。ケーブルの相互連結方式は、多数の振動モードに対応した対策が困難であり、連結ケーブルの維持管理にも問題点がある。このような観点から、ケーブル自身で制振効果を持つ空力的対策に着目した研究が進められた。その結果、ケーブルの表面に突起を付した平行突起方式が開発された。表面に突起を持つ円断面には、平滑な表面と比較すると設計風速域で大きい風荷重（抗力）が発生し、長大斜張橋の全体系設計にはケーブルの風荷重の影響が無視できなくなることから、レインバイブレーション制振効果と同時に抗力係数の低減化を図ったインデント加工方式が考案されるに至った。世界最長支間を有する多々羅大橋³⁾に採用されている。このポリエチレン被覆ケーブルの空力的対策は、押出し被覆プロセスにおいてケーブル表面にインデント加工を施したもので、優れた防食性能を維持しつつ制振対策に適応させたものである。

このように、近年著しく発展した斜張橋形式とケーブル材料の技術的変遷には相互に密接な関係がある。すなわち、構造形式の発展とあいまってケーブル材料の開発が進められ、直面する様々な技術的な課題を解決しながら新たな構造形式を実現してきたと言える。この長大化の過程において開発されたケーブル材料とその周辺技術を含めた高度な先端技術には、規模の大小に拘わらずこれからのケーブル系橋梁の発展に寄与できる大きな可能性が秘められている。そのためには、ケーブル材料の特徴をよく見極め、設計面ばかりでなく施工性も考慮に入れた総合的な視点で取り組むことが必要となろう。そうすることによって、今後のケーブル材料とケーブル系橋梁の更なる展開が期待できる。

(3) 設計法

1) 吊橋の解析法

吊橋の構造解析の基礎となるたわみ理論がメラン(Melan)⁴⁾によって導かれ、その解法がシュタイマン(Steinman)⁵⁾、およびチモシェンコ(Timoshenko)⁶⁾によって論じられた。さらにブライヒ(Bleich)⁷⁾らによる線形化たわみ理論が示されてから、吊橋の実用計算法に関する研究が多くの研究者によって扱われてきた。たとえば、ペリー(Perry)⁸⁾による影響線解法やハウラネック-シュタインハルト(Hawranek-Steinhardt)⁹⁾の著書に見られるようなグリーン(Green)関数を利用した実用計算法は、設計にもよく利用された。ところが、電子計算機の使用の普及により、たわみ理論固有の非線形方程式を忠実に解くという努力が再び試みられるようになった。

わが国でも、海峡を渡る長大吊橋が古くから試案されており、それらの計画を推進するための優れた論文が数多く提出されている。これらの論文の中でも、吊橋に鉛直荷重が作用する場合の研究に注目すると、倉西¹⁰⁾による三連モーメント式を出発点としたマトリックス構造解析法、島田¹¹⁾の積分方程式に立脚した実用的解法、後藤の有限変形法¹²⁾を用いた一連の研究などがある。

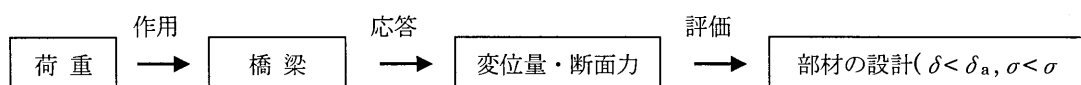
ところで、吊材を連続体とみなすいわゆる膜理論を用いた伝達マトリックス法として、エスリンガー(Esslinger)の研究¹³⁾がある。この方法は、簡明な伝達マトリックスと境界条件を表すマトリックスとの掛算で解析でき、未知数は部材数に比例して増大せず、橋端の初期条件と中間の境界条件のみに左右される。また、変断面の補剛桁を有する吊橋の取り扱いも容易で、タワーステーなどを有する吊橋にも拡張できるなどの利点がある。その反面、吊橋の伝達マトリックスの要素内には、双曲線関数で表される項が混在するため、計算精度の低下を生ずるおそれがある。すなわち、吊橋の静的特性を表すシュタイマン(Steinman)の補剛係数の逆数 $1/s=cl$ は、長大吊橋の場合 $cl=20\sim 30$ にも達し、双曲線関数項の値は著しく大きいものとなる。中井ら¹⁴⁾は、双曲線関数項を分離・単位化する方法を吊橋に適用し、上述のような欠点を改良されている。さらに、活荷重による水平張力 H_p は、従来、ケーブル方程式により別途に求められていたが、これらも伝達マトリックスの中に組み入れるようにされている。

一方、電子計算機の著しい進歩により、吊橋の解析法は膜理論から吊材離散理論へと移行した。プグスリー(Pugsley)¹⁵⁾は、ケーブルおよび補剛桁の吊材との取付点における適合条件から吊材力に関する連立方程式を与え、吊材離散理論を確立した。さらに、吊橋を離散的な骨組構造にモデル化して有限変位理論によって解析する方法を一般化された。また、サーファン(Saafan)¹⁶⁾は、軸方向力の影響を考慮した部材剛性行列を用いた一般マトリックス変位法を吊橋の鉛直面内変位解析に適用した。この解析法により膜理論の基本仮定はもちろん、それまでの吊材離散理論に含まれているモデル化の仮定を全て排除した一般的解析法が確立された。

2) 設計荷重と部材設計

上述した吊橋や吊床版橋のように変位が大きい橋梁では有限変位理論によるが、それらの橋梁を除いては、通常微小変位理論に基づいた構造解析により算出された断面力を用いて、許容応力度設計法により橋梁各部材の断面寸法や材質が決定されている。許容応力度設計法に基づく設計の流れを図-1.2.1に示す。設計荷重は、道路橋示方書¹⁷⁾や各機関における設計基準等¹⁸⁾に規定されており、荷重強度ならびにその載荷方法は、橋梁形式、橋梁の規模、架橋位置等を考慮して、設定されている。また、荷重と橋梁の応答との関係については、荷重特性を考えれば動的解析による設計が適する場合もあるが、一般には静的解析により実施されている。その際、動的な応答特性を考慮した荷重の強度や載荷方法、許容応力度の低減、動的特性を考慮した部材の照査法などについて検討され、静的解析に基づく設計法に反映されている。

現在、電子計算機、解析法・設計法、材料、製作・架設等の技術の進歩、荷重に関するデータの蓄積、交通形態の変化などに対応して、より合理的かつ経済的な設計荷重や限界状態設計法に基づく性能照査型設計法に関する研究が進められている。特に、わが国は風や地震などの自然条件が厳しいため、吊形式橋梁の設計においては、耐風・耐震設計は重要な設計課題である。



δ : 応答変位量, δ_a : 許容変位量, σ : 応答応力度, σ_a : 許容応力度

図-1.2.1 許容応力度設計法の流れ図

3) 耐風設計

1940年11月7日、旧タコマ ナロウズ (Tacoma Narrows) 橋がわずか 19m/s の風により激しいねじれ振動を起し、落橋に至った¹⁹⁾。本橋は、架設時から微風によりたわみ振動が発生していたことから、振動観測が実施されており、克明な落橋の様子が記録されていた。この事故を契機として、風洞実験を中心とする長大ケーブル系橋梁の動的な空力安定性の研究が精力的に行われるようになった。

風による応答は、図-1.2.2のように分類される²⁾。一般に、吊橋、斜張橋、アーチ橋などの吊形式橋梁は剛性が低く、風により振動しやすいため、静的作用のほか、動的作用に対する設計が重要となる。この動的作用による振動問題に対して、主桁、塔、ケーブル、および吊材では、風洞実験により耐風安定性の確認を行い、空力学的に優れた断面形状の採用、またダンパーの設置等による防振対策が実施されている²⁰⁾。

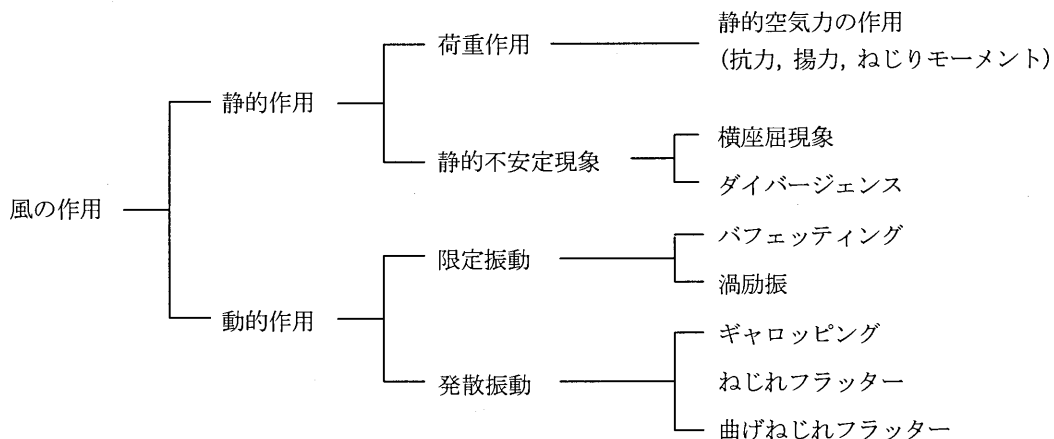


図-1.2.2 風による応答の分類

4) 耐震設計

耐震設計については、中・小橋梁では、一般に地震力が小さいことから1つの橋梁を1点で固定支持する構造の採用例が多く、静的解析により設計されている。長大橋では1点固定支持にすると地震力が、その点に集中する。そこで、多点弾性支持による地震力の分散および弾性支持方式による長周期化等により地震力の低減が図られている。また、すべての支点上で橋軸方向に可動とするオールフリー形式の吊橋や斜張橋では、構造系全体で免震化が図られた構造となっている。これらの長大橋梁では、応答スペクトル法や時刻歴応答解析法などの動的解析により設計されている。これらの支持方法やダンパーなどに関する研究^{21)・22)}が数多く報告されている。しかし、これらの橋梁の地震時挙動については、設計地震動による応答値が弾性範囲内にとどまることを前提に調査・検討されていた。

1995年(平成7年)1月17日に兵庫県南部地震が発生し、多数の橋梁に甚大な被害^{23)・24)}をもたらした。この地震による経験を踏まえ、大地震に対する設計地震動や耐震設計法について各機関において数多くの研究が行われてきた。これらの大地震動に関する研究成果に基づき、2002年(平成14年)4月に改訂された道路橋示方書²⁵⁾では、マグニチュード7級の内陸直下型やプレート境界型の地震動(レベル2地震動)、およびそれに対する耐震性能照査法が規定された。

吊形式橋梁のように地震時の挙動が複雑な橋梁では、大地震時の挙動をより精度良く評価するため、部材の材料的非線形性を考慮した動的解析法(非線形時刻歴解析法)による耐震性能照査法が採用された。この耐震設計法では、部材の構成、寸法、材質等を決定する際、部材の強度だけでなく、弾性限界以降の部材のねばり、すなわち部材のじん性の確保が重視されている。

また、1964年の新潟地震以降問題とされていた落橋防止対策や液状化対策については、不測の事態に対して落橋等の致命的な損傷を防止するフェイルセーフ的考え方、および、その装置や設計法が明確にされ、液状化する地盤の取扱いが厳しく規定された。

5) 座屈および耐荷力照査法

吊橋や斜張橋の塔部材およびアーチ橋のアーチリブの座屈および耐荷力については、一般に骨組構造モデルによる弾性座屈解析、非線形座屈解析、弾性有限変位解析、および弾塑性有限変位解析などにより照査されている^{26)~28)}。

各部材の設計は、2)で述べたように、線形有限変位理論や微小変位理論に基づいた解析により算出される断面力を用いて、許容応力度設計法により行われている。部材を構成する補剛板(補剛された板)が圧縮応力やせん断応力により座屈が生じないように設計することを前提に、曲げ応力度が卓越する部材では、局部座屈を考慮した許容圧縮応力度により応力の照査を行い、その断面寸法および材質が決定されている。また、橋脚や塔の柱部材は、軸方向力と曲げモーメントとを同時に受ける部材として、応力の照査および安定の照査が行われている。道路橋示方書に基づく軸方向圧縮力を受ける部材の照査方法は、有効座屈長を用いて両端ピン支持の柱にモデル化し、応力の照査と安定の照査を行う方法である。この有効座屈長に関しては数多くの研究が行われている^{27)~29)}が、一般には、弾性座屈解析により求められた弾性座屈荷重を用いて、オイラーの座屈理論式から逆算する方法が用いられている。

長大橋の耐荷力照査法としては、弾性有限変位解析および弾塑性有限変位解析による終局時の荷重パラメータ(設計荷重倍率) α_{\max} が所要の荷重パラメータ α_{req} を満足するか否かを照査する方法が用いられている。これは、橋梁の着目部材に対して最も危険な荷重状態を想定し、荷重係数設計法的な考えに基づき、作用荷重を漸増させ、弾性有限変位解析または弾塑性有限変位解析により安定性を照査する方法である。しかし、用いる荷重の組合せ方法および荷重の漸増方法については、まだ統一された方法がなく、各橋梁で異なっているのが現状である。

6) 耐荷力照査法と部材の安全率

長大橋梁で行われている耐荷力照査の実施例では、死荷重などの荷重パラメータは一定値として、活荷重などその他の荷重を増分させる方法、あるいは、すべての荷重を同じ比率で増加させる方法が用いられることが多い。前者の方法において、一定値として考慮される荷重としては、死荷重のほか、斜張橋のケーブルや吊橋・アーチ橋の吊材の死荷重時張力(計算上のプレストレス力)、および製作・架設誤差荷重などである³⁰⁾。

しかしながら、安全性を評価する上で、各荷重強度の不確かさはもちろんのこと、材料強度および部材強度の信頼性、荷重・構造などのモデル化や構造解析の精度、製作・架設誤差、人的誤差、構造物の重要度、未知の現象などを考慮する必要がある。また、これらの不確定要因のうち、解析において、荷重として評価できるもの、材料特性としてモデル化できるもの、および初期不整として解析に組み入れることができるものがある。したがって、安全性を評価するための構造解析にお

いて、解析に用いる荷重パラメータを設定する上で、解析で考慮できる不確定要因については極力解析で評価することにより、荷重パラメータの中に含まれる不確定要因をできるだけ少なくしておくことが重要である。また、解析で考慮できる不確定要因については、弾塑性有限変位解析等により橋梁の弾塑性挙動や終局強度へのそれら要因による影響度を明らかにしておく必要がある。

一方、部材の安全性の評価については、道路橋示方書によれば、主桁、塔、アーチリブ、橋脚などの鋼製部材の許容応力度は、降伏点 σ_y および座屈強度に対して安全率 $\nu = 1.7$ を基本に設定されている。これに対し、ケーブルや吊材の許容値は、破断荷重を安全率 $\nu_c^* = 2.5 \sim 4.0$ で除して算出することが規定されている。このように安全率は、各部材で異なっているが、吊形式橋梁全体の剛性はケーブルに負うところが大きいため、ケーブルの安全率と橋梁全体の終局強度との関係を明らかにしておくことも重要である。その際、ケーブル部材の $\sigma - \varepsilon$ 曲線をできるだけ忠実に再現したトリリニア型にモデル化し、より厳密な解析により橋梁全体の弾塑性挙動および終局強度特性を把握しておくことが重要である³¹⁾。

ところで、斜張橋のケーブルのプレストレス力は、主桁および塔に発生する曲げモーメントおよびケーブル張力をできるだけ小さく、かつ均一にするために導入される計算上の張力である。すなわち、解析では、まず完成系のケーブル張力 $\langle D + PS \rangle$ を下記の(i)~(v)の条件を満足するように設定する。つぎに、完成系のモデルに死荷重を載荷させた時の断面力等 $\langle D \rangle$ を計算する。したがって、プレストレス力による断面力等の値は $\langle PS \rangle = \langle D + PS \rangle - \langle D \rangle$ で算出されるものである。

- (i) 塔に曲げモーメントを生じさせない。
- (ii) 主桁の曲げモーメントを均一かつ最小にする。
- (iii) マルチケーブルでは、各段ケーブルの配置前後での張力差を小さくする。
- (iv) 混合桁の場合、その接合部の曲げモーメントをできるだけ小さくする。
- (v) 桁閉合時における閉合部材端の曲げモーメント M を $M \cong 0$ としておく。

上記のことから、斜張橋の終局限界状態の解析にあたり、このプレストレス力 $\langle PS \rangle$ を一定にしたまま死荷重 $\langle D \rangle$ のみを増加させるなどの載荷方法を行うと、死荷重とプレストレス力とによる完成系 $\langle D + PS \rangle$ の主桁および塔の曲げモーメントのバランスを故意に崩すことになるので注意しなければならない³²⁾。

なお、合理的かつ経済的な設計を行う上で、吊形式橋梁の各部材の適切な安全率の設定は重要な課題である。

(4) 架設方法

橋梁の架設には、古くからロープが用いられ、19世紀以降には、ワイヤロープが数多く用いられていたことが、フォース鉄道橋の写真集³³⁾ やブルックリン橋の架設時の絵図³⁴⁾ におけるキャットウォークや塔頂クレーンなどに見受けられる。これらでは、人力あるいは機械式のウィンチを駆動力として滑車と組み合わせて部材の吊り上げ、吊り降しなどに利用されていた。

この他、ケーブルクレーンという、木製あるいは鋼製のタワー間にトラックケーブルと呼ばれるワイヤを張り渡し、キャリヤと呼ばれる吊具で荷物を吊りながら供給できるクレーン設備は、山間の材木搬出や谷間の橋梁架設において、かなり古くから用いられていたと考えられる。

日本最初の吊橋とされる皇居内に架けられた山里橋(支間 73m, 1866年)では、主ケーブルやステ

ワイヤの材料として鋼材が使用されていることから、この頃すでにワイヤロープが輸入、あるいは国産化されていたと思われる。

架設工法としてのケーブル式架設は、他の工法に比べて新しく、(昭和の初めに岐阜県の大田人道橋(支間 21m, 1925 年)アーチ 3 連の架設に斜吊り工法が用いられたのが始まりとされる³⁵⁾。固定アーチの西海橋(支間 216m, 1955 年)が斜吊り工法で完成されている。この斜吊り工法は、輸入された技術であったが、直吊り工法は、国産の技術であり、土讃線の吉野川橋梁のトラス主構(支間 77.5m, 1933 年)を架設するにあたって、国鉄の技術陣によって開発され、汎用性のある工法として確立された³⁶⁾。その後のケーブル式架設は、橋下の条件が困難な場合に現在でも多用され、本州四国連絡橋の大三島橋(支間 300m, 1979 年)へと適用支間を伸ばし、吊能力も 1,200kN を超える重量の相吊り架設に対応できるようになっている。しかし、閉合するまでの不安定さからケーブル式架設は、数多くの事故を起こしており、今日でも高度な技術を要求される難度の高い架設工法である。

吊橋や斜張橋での架設でも、その進歩に大きく貢献したのは、ケーブルのジャッキによる引込み架設方法の開発・改良である。現在は、すでに $\phi 200\text{mm}$ 近い太径のケーブルまで、連続して引込み定着が可能となり、取扱いも良く経済的であり、長大橋梁や大型建築構造物にも転用され、ケーブル式橋梁の発展に貢献している。

1.2.2 PC 橋

道路橋および鉄道橋としての PC 橋におけるケーブル構造として、まず、主桁構成の観点からは、コンクリート部材内に PC ケーブルを配置した構造が主流であった。この方式を内ケーブル方式という。この場合、例えば連続桁構造では、中間支点付近の負曲げモーメントによる桁断面上部、また支間中央部の正曲げモーメントによって桁断面下部に発生する引張応力に対し、コンクリートが引張りに弱いという弱点を補うため、プレストレスを与える方法として PC ケーブルが配置される。特に近年では、高品質な構造を目指したセグメント化の傾向や、上部構造の軽量化や構造的合理化を目指した合成構造や混合構造を採用する傾向が認められる。一方、支間が大きくなるにつれ主桁断面が大きくなり、結果的に自重が大きくなること、また主桁の桁下制限の影響も考慮して、桁構造から吊構造へ、すなわち、エクストラドーズド PC 橋あるいは PC 斜張橋の構造へと発達してきた。

また、完成後の主桁作用に対して配置される本主構造部材としての PC ケーブル(以下、本設ケーブルという)とは別に、架設時に一時的に使用される架設ケーブルもある。

ここでいうケーブル系橋梁とは、基本的に橋梁の本設ケーブルに外ケーブルを使用した橋梁、PC 桁橋、PC 斜張橋、大偏心外ケーブル PC 橋、およびエクストラドーズド PC 橋である。さらに、これらの橋梁において架設時に一時的に架設ケーブルを用いた PC 橋もある。本節では、これらの橋梁の変遷を述べる。

(1) PC 橋の歴史¹⁾

PC の概念が芽生え出したのは、1880 年代の後半とされている。1860 年頃ヨーロッパで鉄筋コンクリートが考案されたが、研究開発が進むにつれて鉄筋コンクリートに宿命的につきまとう、ひび割れへの対応が問題となった。その発生を防ぐ補強方法としてコンクリートにプレストレスを与

える着想が生まれたといわれている。このようにプレストレスの概念が生まれて約 40 年が過ぎた 1926 年、フランスのフレシネー(E.Freyssinet)がコンクリート打設前に高強度の鋼線を用いて、それに 400N/mm^2 を超える引張応力を与える方法を考案して特許を出願し、PC 構造の実用化は大きく前進し始めた。1930 年代に入ると、フレシネーをはじめとする主としてヨーロッパの研究者たちによりコンクリートの収縮やクリープ、鋼材のリラクゼーション等を考慮した PC 構造理論の整備が進んだ。その後、PC 構造の正しい評価が可能となって、実際の構造物に種々の形で実用化された。1939 年、フレシネーによって大きな緊張力を導入した鋼材をコンクリート部材に定着する定着体と鋼材の緊張を容易に行える緊張用の特殊ジャッキが考案され、PC 構造の広範囲な実用化が可能となった。その後、主要な定着工法として、1949 年にはスイスの BBRV 方式、ドイツのバウルーレオンハルト(Baur-Leonhardt)方式、およびディビダーク(Dywidag)方式等あわせて 30 以上の定着工法が相次いで開発された。1950 年には、旧西ドイツで張出し施工による初めての PC 橋が建設され、PC 橋のスパンの長大化に大きなインパクトを与えた。

一方、わが国に PC 構造技術が導入されたのは、1929 年にフランスのフレシネーが日本政府に対し PC 構造技術の特許「補強コンクリート製品の製造法」を出願したことに始まる。この頃から一部の学者や団体で PC 構造技術の基礎的研究がなされていたようである。しかし、いずれの研究も戦争の激化に伴い中断された。戦後の PC 構造技術の研究は、国を挙げての事業として再開された。

このような環境の中、PC 構造の実用化のトップバッターとなったのは、PC マクラギである。道



写真-1.2.1 長生橋

路橋では、写真-1.2.1 に示すように、1951 年、石川県にプレテンション工法による長生橋(桁長 $3.84\text{m} \times 3$ 径間)が誕生した。

一方、ポストテンション工法による道路橋の第 1 号は、1953 年、フレシネー工法で施工された福井県の十郷橋(橋長 7.35m)である。その後、1954 年には、本格的な PC 橋が施工されるようになり、鉄道橋では信楽線の第 1 大戸川橋梁(桁長 31m)が竣工、道路橋では福島県の上松川橋(桁長 $40\text{m} \times 3$ 径間)が着工された。

1955 年に、土木学会は、急速な PC 構造の普及に呼応して、「プレストレスコンクリート設計

施工指針」²⁾を制定した。これは、PC 構造技術が実用化されて 4 年目という異例な早さであり、官・学・民が協力して PC 構造技術を強力に推進していたためである。

(2) 道路橋の変遷¹⁾

PC 構造技術が日本に導入された頃の PC 技術者が、先進国である欧米の技術に学び、追い付こうとする意欲と熱意が PC 構造の大いなる発展に寄与している。

1956 年には、わが国最初の PC 箱桁橋である金剛大橋(支間 31m, 橋長 125m) が大阪府に誕生した。つづいて、1958 年には、ディビダーク工法が導入され、わが国最初の PC 桁の張出し架設工法により、神奈川県に支間 51m で橋長 75m の嵐山橋が施工された。現在の技術から見ると、支間 51m の PC 桁橋は、技術的に特に取り上げるような橋梁でないが、当時の技術レベルから見ると、画期的な橋梁であった。

その後、1962 年には、わが国初の斜張橋である島田橋(橋長 38.7m)が岐阜県に建設された。そして、1966 年に、わが国初のプレキャストセグメントによる張出し架設工法で目黒架道橋(支間 39.5m) が首都高速道路に建設された。その後も急速なピッチで多数の PC 橋が建設されてきた。

さらに道路橋については、高速道路網が全国各地方へと伸び、各所で PC 構造の長大橋が見られるようになった。このような環境の中、設計・施工の基準となる道路橋示方書についても、1978 年には道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編³⁾が制定され、プレストレストコンクリート道路橋関係の基準が整備された。

施工技術についても、新しい技術の開発、また海外からの技術導入も活発に行われ、張出し架設工法による PC 橋の支間長の伸びや、斜張橋、エクストラロード橋、アーチ橋、ならびに大型移動支保工、押出し工法、およびプレキャストセグメント工法を用いた PC 橋、さらには鋼などとの複合等の新しい形式の橋梁など、多くのタイプの PC 橋が開発・採用されてきている。特に、複合構造橋梁については、**図-1.2.1**に示すように、上部構造の軽量化、構造の合理化、経済性等により、箱桁断面のコンクリートウェブに波形鋼板を用いた波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の採用が増加してきた。また、本構造を活用した斜張橋やエクストラロード橋も建設されている。さらに、**図-1.2.2**に示すように、鋼管をウェブに用いた複合トラス橋も建設されている⁴⁾。

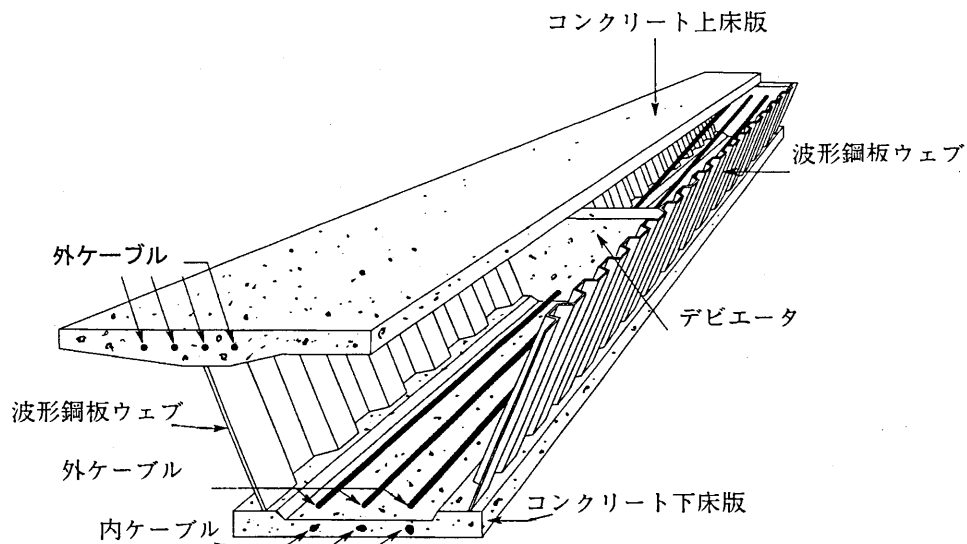


図-1.2.1 波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の概念図

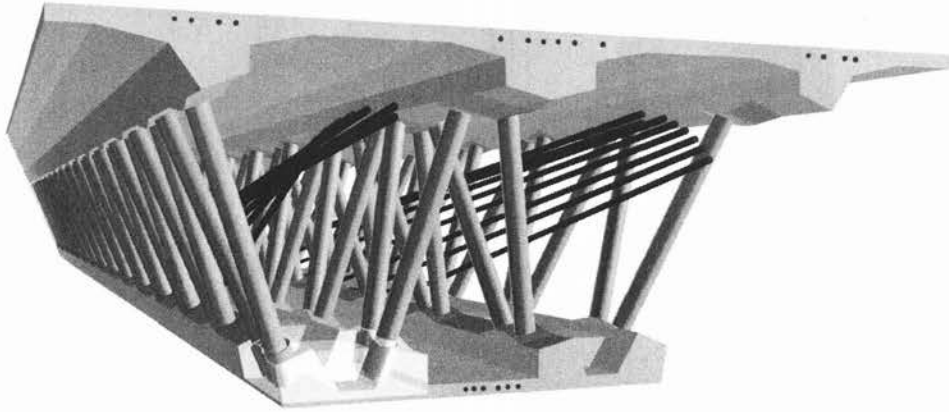


図-1.2.2 複合トラス橋の概念図

(3) ケーブル系橋梁の変遷

ここでいうケーブル系橋梁とは、コンクリート部材の断面内に配置されていない外ケーブルを基本的に箱桁断面の内側あるいは外側に配置した橋梁をいう。これらの橋梁は、支間の増大や構造技術の発展に伴って、図-1.2.3の3通りの構造に区分できる。

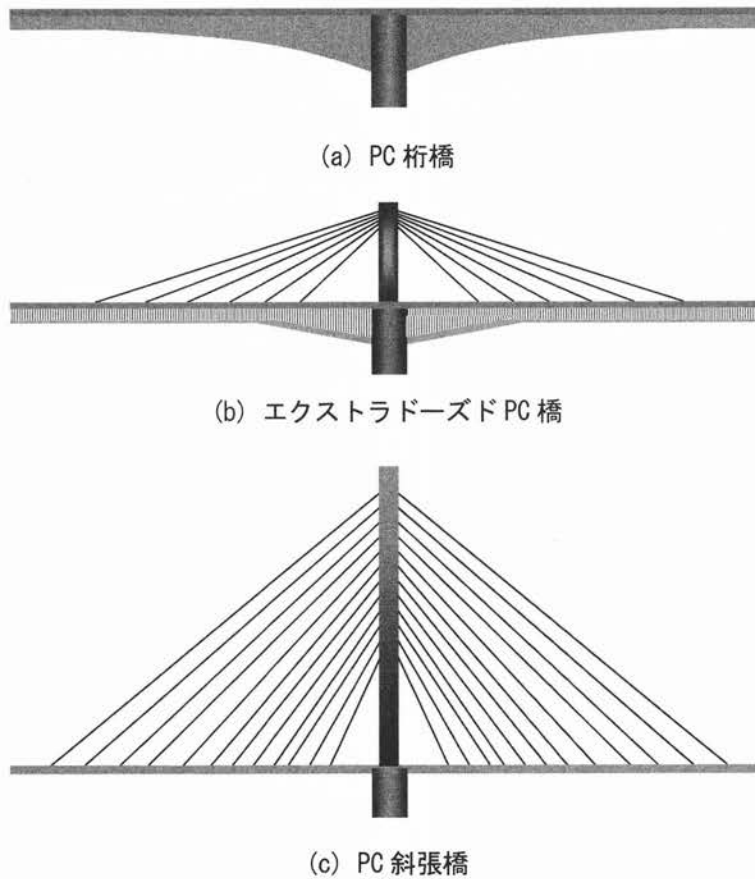


図-1.2.3 ケーブル系 PC 橋梁の構造の種別

まず、PC 箱桁橋の箱断面内に外ケーブルを用いたケーブル系橋梁は、自重の軽減や PC ケーブルの維持管理等を考慮した構造として普及してきた。PC 桁橋の中でもプレキャストセグメント工法を用いて全ケーブルを外ケーブルとした例もある。近年では、支間長の増大に伴って PC 箱桁橋から、コンクリートウェブに波形鋼板や鋼管トラス材を用いた合成構造や複合トラス構造が発展してきた。これらの複合橋では、ウェブに鋼材が使用されるため、必然的に連続ケーブルは外ケーブルとなる。

桁橋に続いて、さらなる支間長の増大に伴って、PC 斜張橋が建設されるようになった。これは、支間長の増大に伴う桁高の増加や自重の増加を斜張橋という合理的な構造提案によって解決したものである。当初の PC 斜張橋は、鋼斜張橋に追随しての適用が多かった。しかし、鋼に比べコンクリート主桁の自重が大きいことによるハンディキャップは、PC 鋼材の品質の向上とケーブル斜材の緊張力を大きくすることにより克服された。さらに主桁を鋼との複合化構造にすることによってさらなる長支間化が図られている。近年では、PC 斜張橋のさらなる合理化を追求して、コンクリートウェブを波形鋼板ウェブに置換した波形鋼板ウェブ PC 斜張橋が建設されるようになった。このように、主桁を鋼とコンクリートとの複合構造にすることによってさらなる長支間化が図られている。その代表的な橋梁が矢作川橋(最大支間長：235m)である。

次に、桁橋と斜張橋の間の支間長を補間する PC 構造技術として開発されたのが、エクストラロード PC 橋である。本構造は、フランスの J.Mathivat 氏により提唱された新しい PC 構造形式である。支点上に主塔を設けて、外ケーブルを桁高の範囲以上に大偏心させた構造形式で、景観上からはむしろ PC 斜張橋に近いものといえる。本構造に対して、さらに主桁を鋼とコンクリートとの複合構造にすることによってさらなる長支間化が図られている。本構造の代表的な橋梁が、木曾川橋(最大支間長：275m)と揖斐川橋(最大支間長：271.5m)である。最近では、PC 斜張橋と同様、さらなる合理化を追求して、コンクリートウェブを波形鋼板ウェブに置換した波形鋼板ウェブエクストラロード PC 橋が建設されるようになってきた。その代表的な橋梁が日見橋(最大支間長：180m)や栗東橋(最大支間長：170m)である⁵⁾。

また、ケーブル系橋梁として忘れてはならないのが、大偏心外ケーブル PC 橋である。エクストラロード PC 橋で用いられた外ケーブル構造は、大偏心外ケーブル PC 橋へと拡張され、PC 構造の適用分野がより拡大された。すなわち、外ケーブルを桁高の範囲内に配置する限りにおいて、曲げ耐荷力はボンド式の内ケーブル PC 桁に比べて小さくなる。これを克服するため、図-1.2.4 に示すように、外ケーブルを桁高の外に配置して、偏心量を大きくした構造形式が開発されてきた。本構造において、ケーブルをデビエータやストラットで支持した構造を擬似的なトラス構造と見なされることから大偏心ケーブルトラス PC 橋とも言われている。

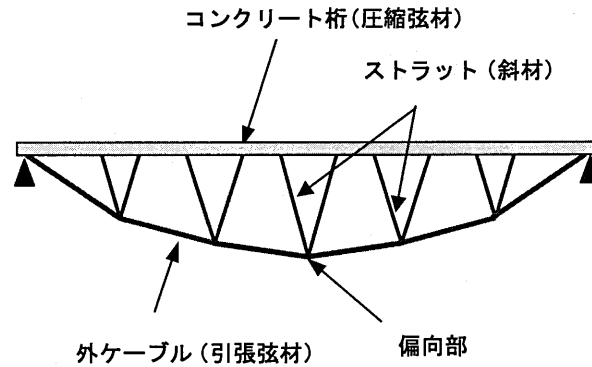


図-1.2.4 大偏心外ケーブルPC橋

さらに、大偏心ケーブルトラス PC 橋を発展させた新しい構造形式の橋が開発され、適用されてきた。これが、自碇式上路 PC 吊橋と称されている構造形式で、大偏心ケーブルトラス PC 橋と外観はよく似ている。しかし、桁高をさらに低くしており、吊り構造の考えを採用している点が異なる。鉛直材を介して主桁としての PC 桁を支持する外ケーブルを桁の両端に定着し、外ケーブルに作用する張力の水平成分を桁軸方向にプレストレスとして導入する構造となっている。

参考文献

(1.1)

- 1) 北田俊行：これからの橋梁工学，平成 16 年度横河ブリッジ技術講習会，テキスト，2004.6.30

(1.2)

- 1) 大田孝二，深沢 誠：橋と鋼，建設図書，2000.2.
- 2) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造進歩調査小委員会(編)：鋼斜張橋—技術とその変遷— 鋼構造シリーズ 5，土木学会，1993.
- 3) 藤原 亨，真辺保仁，山口和範：多々羅大橋ケーブルの制振対策，橋梁と基礎，Vol.33, No.5, pp.16~19, 1999.5.
- 4) Melan, J. : Theorie der eisernen Bogenbrücken und der Hängebrücken , Handbuch der Ingenieurwissenschaften, 1888.
- 5) Steinman, D.B. : A Generalized Deflection Theory for Suspension Bridge, Trans. of, ASCE, Vol.100, 1935.1.
- 6) Timoshenko, S. : Steifigkeit von Hängebrücken, ZAMM, 1928.
- 7) Bleich, F., C.B. McCullough, R. Rosencran and G.S. Vincent : Mathematical Theory of Vibration in Suspension Bridges, Bureau of Public Roads, U.S. Dept. of Commerce, Government Printing Office, Washington, D.C, 1950.
- 8) Peery, D.J. : An Influence Line Analysis for Suspension Bridges, Proc. of ASCE, ST 12, 1954.12.
- 9) Hawrenek, A. and O. Steinhardt : Theorie und Berechnung der Stahlbrücken, 1958.(橋・小松訳：鋼橋の理論と計算).
- 10) 倉西 茂：行列による吊橋の構造解析，土木学会論文集，第 81 号，pp.1~7, 1962.5.

- 11) Shimada, S. : Programming for Digital Computation of Suspension Bridge under Vertical, Horizontal and Torsional Loadings, Trans. of JSCE, No.102, 1964.2.
- 12) 後藤茂夫 : 有限変形法による吊橋の解法, 土木学会論文集, 第 156 号, pp.1~10, 1968.8.
- 13) Esslinger, M. : Suspension Bridge Design Calculated by Electric Computer, Acier-Stahl-Steel, Vol.27, No.5, 1962.
- 14) 中井 博, 野口二郎 : 伝達マトリックス法による吊橋の構造解析, 土木学会論文報告集, 第 255 号, pp.31~45, 1976.11.
- 15) Pugsley, A.G. : A Flexibility Coefficient Approach to Suspension Bridge Theory, Proc. of ICE, 32, 1949.
- 16) Saafan, A.S. : Theoretical Analysis of Suspension Bridges, Proc. of ASCE, Vol.92, ST4, 1966.
- 17) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 丸善, 2002.
- 18) 例えば, 本州四国連絡橋公団 : 上部構造設計基準・同解説, 1989.
- 19) 平井 敦 : 鋼橋Ⅲ, 技報堂, 1956.
- 20) Ito, M., et al.(Eds.) : Recent Developments and their Future, Proc. of the Cable - Stayed Bridges Seminar, Yokohama, Japan, 10 ~ 11 December, Elsevier Science Publishers, 1991.
- 21) 土木学会・本州四国連絡橋・鋼上部構造研究小委員会 : 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書 - 櫃石島・岩黒島斜張橋に関する検討 -, 1980.
- 22) 阪神高速道路公団 : 東神戸大橋工事誌, 1994.
- 23) 阪神高速道路公団(監修), (財)阪神高速道路管理センター : 大震災を乗り越えて - 震災復旧工事誌 -, 1997.9.
- 24) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(土木学会他) : 阪神・淡路大震災調査報告, 土木構造物の被害, 橋梁, 丸善, 1996.12.
- 25) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 2002.
- 26) 崎元達郎, 奈良 敬, 小松定夫, 北沢正彦 : 曲げが支配的な主塔を有する長支間斜張橋の耐荷力に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 36A, 土木学会, pp.111~122, 1990.3.
- 27) 本州四国連絡橋公団 : 吊橋主塔設計要領・同解説, 1989.
- 28) 野上邦栄, 成田信之 : 鋼斜張橋主塔の構造特性と座屈に関する実績調査研究, 構造工学論文集, Vol. 38A, 土木学会, pp.167~180, 1992.3.
- 29) 東海構造研究グループ(SGST) : 骨組構造物の座屈設計法に関するフォーラム(下), 橋梁と基礎, Vol. 29, No. 1, pp.37~45, 1995.
- 30) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会(編) : 鋼構造物の終局強度と設計, 鋼構造シリーズ 6, 土木学会, 1994.
- 31) 野口二郎, 北田俊行, 引口 学 : 斜張橋の部材安全率と橋梁全体の終局強度との関係, 構造工学論文集, Vol. 47A, 土木学会, pp.137~146, 2001.3.
- 32) 北田俊行, 野口二郎, 丹生光則, 狩野正人 : 鋼斜張橋の耐荷力解析におけるプレストレスの取扱いに関する一考察, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 1996.
- 33) Moubray House Press : Bridge Across the Century ; The Story of the Forth Bridge, 1985.
- 34) ENR: The Brooklyn Bridge 100th PR, 1983.5.
- 35) 池田 肇 : 鋼橋架設の変遷, 橋梁と基礎, Vol.16, No.8, pp.28~34, 1981.8.

36) 阿部英彦, 中野昭郎: 架設工法の歴史, 橋梁と基礎, Vol.16, No.8, pp.11~18, 1982.8.

(1.3)

- 1) PC 建設業協会 50 年史 1955-2005[昭和 30 年~平成 17 年], プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2005.
- 2) プレストレストコンクリート設計施工指針, 土木学会, 1955.
- 3) 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編, 日本道路協会, 1978.
- 4) 新たな展開を示す PC 構造, プレストレストコンクリート技術協会, 1991.
- 5) PC 斜張橋・エクストラードズド橋, 設計施工基準(案), プレストレストコンクリート技術協会, 1991.

ケーブル系橋梁の写真館



荒津大橋 (福岡市)



アルバート橋 (イギリス ロンドン市)