

学位論文題名

長大吊橋 PWS ハンガーシステムの
構造特性と設計法に関する研究

学位論文内容の要旨

長大吊橋ハンガーシステムは、補剛桁からの荷重を主ケーブルに伝達する機能を有する主要構造であるが、主ケーブル、主塔および補剛桁等に比べて比較的取替えが容易であるということから、我国の長大吊橋は、従来、損傷時の取替えや数年毎の塗装の塗替え等を前提として、CFRC (Center Fit Rope Core) 型のストランドロープを、主ケーブルに取付けたケーブルバンド上で逆U字状に鞍掛けし、補剛桁ハンガー定着部で支圧定着する、CFRCハンガーシステムが一般的に用いられてきた。

これに対して、世界一の長大吊橋である明石海峡大橋(橋長: 3,911m、中央径間長: 1,991m、1998年完成)では、塗装や取替え等の維持補修コストを含むライフサイクルコスト(LCC) ミニマムの視点から、近年、長大斜張橋で多用されている高強度の亜鉛メッキ鋼線を集束したものをポリエチレン(PE)管で被覆した平行線ケーブル(PWS: Parallel Wire Strand)を橋軸直角方向に2本配置し、上下端でピン定着するPWSハンガーシステムを、世界で初めて適用した。

本研究は、明石海峡大橋を対象に、これまでほとんど研究発表や事例報告がなされていなかった、長大吊橋PWSハンガーシステムを構成するケーブルバンド、補剛桁ハンガー定着構造およびハンガーロープ等の力学挙動や構造特性および耐風性等について種々の解析的な検討を行い、その結果を基に、現時点で最適と思われる設計法の提案を行うことによって、長大吊橋PWSハンガーシステムの体系化を図ることを目的とした。

本研究は8章で構成され、各章の概要は下記のとおりである。

第1章では、本研究の目的、その背景となる長大吊橋ハンガーシステムや、関連領域である長大斜張橋ケーブルの耐風性等の既往の研究に関する調査結果および本研究の研究内容等について記述した。

第2章では、米国、欧州および我国における長大吊橋ハンガーシステムの変遷や機能について調査し、その結果を基に、従来方式のCFRCハンガーシステムと新方式のPWSハンガーシステムに対して、力の伝達機構、構造特性、製作・施工性および維持管理等の特徴や問題点等の基本概念について比較検討した。

第3章では、長大吊橋ハンガーシステムの構造解析法について文献的に調査検討し、その結果、本橋の静的構造解析法として、橋軸直角方向のダブルハンガーの精密なモデル化や電子計算機の大容量化に対応可能な立体骨組構造解析法を適用し、鉛直力に対しては線形化弾性有限変位解析法を、過大な変形が発生する水平力に対しては弾性有限変位解析法を適用した。また、動的構造解析法としては、風の乱れによる不規則振動論の問題を統計的手法によって論じたDavenportの理論式によるガスト応答解析法を適用した。

第4章では、世界的にも例を見ない、橋軸直角方向にダブルハンガーを有するピン定着横締め方式ケーブルバンドについて、常時および暴風時の2次元有限要素解析により、力学挙動や構造特性等を検討した。解析に当っては、被締付け体が剛性或支点条件等の評価が困難な主ケーブルであるため、種々の物理量の想定を行ったが、その結果、ケーブルバンド応力については、常時、暴風時とも、オーダー的には想定した断面形状で概ね妥当であり、暴風時のピンプレート接点部においても、過大な合成応力や応力集中が発生しないことを明らかにした。また、ケーブルバンド変位は、空隙率換算値を過去の長大吊橋の施工実績と比較した結果、許容範囲内であることを把握した。

第5章では、補剛桁ハンガー定着構造として採用したピン定着構造について、面内力に対する2次元有限要素解析と、面外力に対する平板解析を実施して、1枚板方式と補強板方式との比較、常時および暴風時の補強板方式ピン定着構造の力学挙動や構造特性等を検討した。また、同一構造に対して実施された3次元有限要素解析や実物大試験体による静的試験や疲労試験等の検討結果についても検証した。その結果、ピン定着構造として採用した補強板方式について、ピン孔のピン接触部での過大な応力の発生、暴風時のピンの片面補強板への”片当り”による塑性変形の発生、補強板外周溶接部への応力集中や補強板外周部の側止端部からの疲労亀裂の発生とピンプレートへの進展の可能性等について明らかにした。

第6章では、長大吊橋PWSハンガーの風による振動特性や耐風安定性等について、文献的、解析的に検討した。その結果、予想される風による振動現象のうち、長大斜張橋ケーブルでしばしば問題となるレインバイブレーションとウェイクギャロッピングの発生の可能性は少なく、渦励振については、疲労に対して問題になるような振動は発生しないが、約20m/sec以下の比較的低風速域で、いずれかのPWSハンガーが振動することを把握した。また、ガスト応答については、PWSハンガーに対する累積疲労損傷度照査を行った結果、暴風時の橋軸直角方向の大きな曲げ応力の発生と、ダブルハンガーに対するハンガー張力の不均等性の影響により、中央径間中央部の短ハンガー部で疲労損傷の恐れがあることを明らかにした。

第7章では、第3章から第6章までの研究結果を基に、ケーブルバンド、補剛桁ハンガー定着構造およびハンガーロープ等に関する設計荷重、構造解析法、応力算定法および安全性判定法等の長大吊橋PWSハンガーシステムの設計法について検討した。さらに、この検討結果を基に、安全性・耐久性、景観性、製作・施工性および維持補修費を含むLCCミニマムの視点で捉えた経済性等を総合的に考慮して、明石海峡大橋のハンガーシステムとして最適な使用区分の選定や、応力・変形等の解析を行い、疲労損傷の可能性の高い一部短ハンガーを除く全橋の80%にわたって、PWSハンガーシステムを採用した。

第8章は結論であり、本研究で得られた知見を各章毎に総括し、来るべき21世紀のビッグプロジェクトである超長大吊橋への適用に対する課題と展望を記述した。

学位論文審査の要旨

| | | |
|----|-----|--------|
| 主査 | 教授 | 佐藤浩一 |
| 副査 | 教授 | 角田 典史雄 |
| 副査 | 教授 | 三上 隆 |
| 副査 | 教授 | 城 攻 |
| 副査 | 助教授 | 林川俊郎 |

学位論文題名

長大吊橋 PWS ハンガーシステムの 構造特性と設計法に関する研究

長大吊橋は主塔、主ケーブル、補剛桁、アンカレッジ、ハンガーの5つの要素から成り立っている。その中で主塔、主ケーブル、補剛桁、アンカレッジの4要素は取り替えが出来ないものとして設計されている。一方、それらに比べ、ハンガーは比較的取り替えが容易であるため、我国では、損傷時の取り替えや塗装の塗り替えを前提として、CFRC (Center Fit Rope Core) 型のストランドロープを、主ケーブル上に取付けたケーブルバンド上で逆U字状に鞍掛けし、補剛桁ハンガー定着部で支圧板定着するCFRCハンガーシステムが一般的に用いられている。明石海峡大橋のような世界一の長大吊橋にこのシステムを用いれば、ハンガー長は長くなり、また、ハンガーの塗装面積も増加し、維持管理費まで含めると、莫大なライフサイクルコスト(LCC)になる。このため、CFRCハンガーシステムに代わるものが必要になり、近年長大斜張橋で多用されている高強度の亜鉛メッキ鋼線を集束したものをポリエチレン(PE)管で被覆した平行線ケーブル(PWS: Parallel Wire Strand)を上下端でピン定着するPWSハンガーシステムを適用し、ハンガーシステムの構造特性とその設計法を提示しているところが本論文の骨子である。

本論文は8章から成り立っているが、大別して、次の4点について論じている。

第一点目は、世界にも例を見ない橋軸直角方向ダブルハンガーとしたピン定着横締め方式ケーブルバンドについて、力学的挙動や構造特性等を取り扱っている。結論として、一般部のケーブルバンド応力は、常時および暴風時とも、オーダー的には想定した断面形状で概ね妥当であり、形状変化部の応力集中に対しては、形状のスムージング化により、大幅な改善が図ることが出来るという知見を得ている。

第二点目は、補剛桁ハンガー定着構造として採用したピン定着構造について、力学的挙動や構造特性等を取り扱っている。結論として、1枚板方式と補強板方式との比較の結果、より一体的に機能する1枚板方式の方が応力挙動に優れているが、補強板方式との間に特

に有意な差がないため、経済的に優れている補強板方式を採用している。

第三点目は、これまで研究発表や事例報告がされていない長大吊橋PWSハンガーの風による振動特性や耐風安定性等について取り扱っている。結論として、PWSハンガーに予想される風による振動現象のうち、長大斜張橋ケーブルでしばしば問題となるレインバイブレーションとウェイクギャロッピングの発生の可能性が少ないという知見を得ている。渦励振については、約20m/sec以下の比較的low風速域でいずれかのPWSハンガーが振動することが予想されるため、何らかの制振装置を設置した方が良いとの知見を得ている。ガスト応答については、実橋に忠実な吊橋全体系立体骨組構造解析モデルに対して、PWSハンガーの累積疲労損傷度照査を行った結果、暴風時橋軸直角方向の大きな曲げ応力の発生と、ダブルハンガーに対するハンガー張力の不均等性の影響により、中央径間中央部の短ハンガー部では、疲労損傷の恐れがあるとの知見を得ている。

第四点目は、以上の研究結果を基に、長大吊橋PWSハンガーシステムを構成するケーブルバンド、補剛桁ハンガー定着構造およびハンガーロープ等に関する設計荷重、構造解析法、応力算定法および安全性判定法等の設計法について検討している。さらに、この検討結果を基に、耐久性、景観性、製作・施工性および維持管理費を含むライフサイクルコスト(LCC)ミニマムの視点で捉えた経済性等を総合的に考慮して、明石海峡大橋のハンガーシステムとして最適と判断される使用区分の選定や応力・変形等の解析を行い、疲労損傷の可能性の高い一部短ハンガーを除く全橋の80%にわたって、PWSハンガーシステムを採用している。これは、従来のCFRCハンガーシステムとの異種のハンガーシステムとの併用を意味することであり、製作・施工面での煩雑さは否定できないが、耐久性、景観性等も含めて総合的に比較検討した上で選定したもので、LCCミニマムという所期の目標はほぼ達成することができたとの知見を得ている。

これを要するに、著者は、これまで研究発表や事例報告がされていない長大吊橋PWSハンガーシステムについて、ケーブルバンド、補剛桁ハンガー定着構造およびハンガーロープ等の力学的挙動や構造特性および耐風安定性等について種々の解析的な検討を行い、その結果を基に、現時点で最も適当と思われる設計法の提案を行うことによって体系化を図ることに成功したものであり、橋梁工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。