

(93) 雪沢大橋 (仮称) の設計とサドルシステムの性能試験

秋田県北秋田土木事務所
 アジア航測(株)道路・橋梁部
 (株)銭高組 土木本部 正会員○布下 浩
 (株)エスイー 営業本部 正会員 木部 洋

越前谷宏昭
 長谷川政裕

1. はじめに

雪沢大橋は、秋田県大館市から小坂を経由して十和田湖に至る延長約 42km の主要幹線道路大館十和田湖線 (樹海ライン) の一部として建設される。雪沢大橋の橋長は 177.1m で、構造形式は主塔が独立 2 本柱の 3 径間連続エクストラード PC 橋であり、斜材にはポリエチレン被覆された工場製作ケーブルを、主塔部の斜材定着構造には斜材が主塔部を貫通して固定するサドル構造を採用した。今回、この固定構造にエクストラード PC 橋では初めて、現場組立ての鋼製スリーブを用いたネジ定着方式を採用し、施工の省力化とサドル部疲労性能の向上対策を実施している。本稿では、雪沢大橋の計画と設計およびサドルシステムの性能試験について報告するものである。

2. 橋梁概要

雪沢大橋の橋梁諸元を以下に示し、全体一般図を図-1 に示す。

- 構造形式：3 径間連続エクストラード PC 箱桁橋
- 橋 長：177.1m
- 支 間：70.3m + 71.0m + 34.4m
- 幅 員：車道 (7.0 ~ 8.5)m 歩道 (2.0 ~ 2.25)m × 2
- 平面線形：R=400m ~ A=150m ~ ∞
- 横断勾配：4.0% (片勾配) ~ 2.0% (山勾配)
- 主桁形式：2 室箱桁
- 主塔形式：独立 2 本柱
- 斜 材：ファン型 2 面吊り 19S15.2 (F500PH)

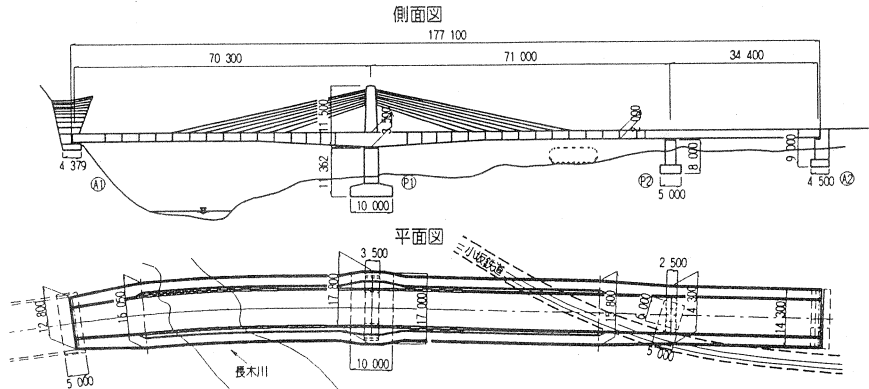
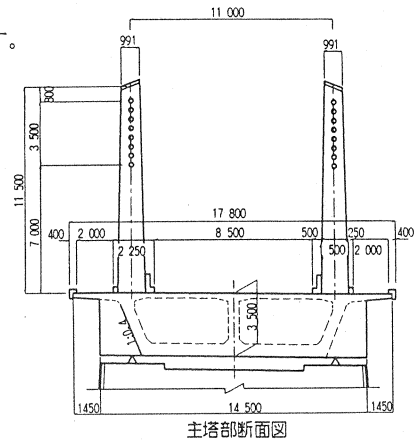


図-1 全体一般図

3. 基本構造の選定

本橋は、秋田県が指定する「長木渓谷緑地環境保全地域」内に位置し、樹海ラインの中でも特に自然豊かで景観的にも優れた地域に建設されるため、路線景観上の要となる様に周囲との調和に細心の注意を払い橋梁形式の選定を行った。初期段階として詳細な植生調査と現地踏査を行い、周辺地域が潜在的にもっている環境資源を抽出すると同時に、景観上特に重要となる視点や景観整備のポイントを整理した。次に「見える部分を少なくする」、「見えるものを小さくする」、「見えるものをきれいにする」という観点から、パース、模型、CGを作成し、あらゆる角度から本橋の”見え方”を検証した。最終的に橋梁形式として3径間連続エクストラドーズドPC橋を選定した理由を以下に示す。

- ①斜材を架設に利用できる合理的な構造である。
- ②自然と調和する適度なボリューム感がある。
- ③桁高が低く桁下の公園利用者への圧迫感が少ない。
- ③主塔高が低く山の稜線や鳥の飛翔経路を侵さない。

また、斜材には施工の省力化と少しでも斜材を細く見せたいという景観性への配慮から、予め防錆用のポリエチレン被覆が施されているプレファブケーブル（SEEE F500PH）を採用した。そして、主塔サドル部の定着構造には、「単純で疲労性能に優れた構造」という観点から、従来の構造とは異なる新しいサドル構造を採用した。

4. 上部工の設計

4.1 主桁の設計

完成系における断面力は平面骨組モデルにより詳細な施工段階を考慮して算出し、平面線形の影響によるねじりモーメントは立体骨組モデルにより算出した。

4.2 斜材の設計

斜材の許容引張力を桁内PC鋼材と同様の $0.6P_u$ （ P_u ：引張強さ）に設定できる目安値は、一般に活荷重による応力

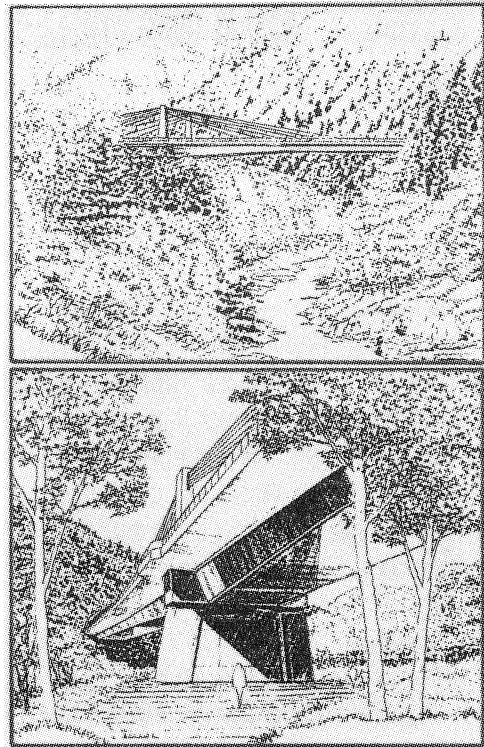


図-2 完成予想図

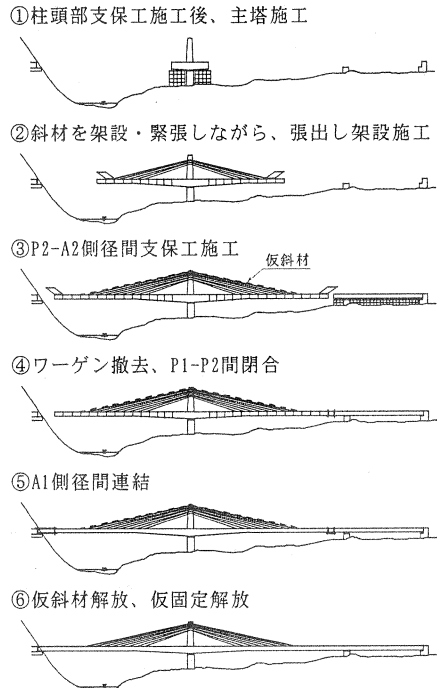


図-3 施工順序図

表-1 主要工事数量

区分	種別	仕様	単位	数量
主桁	コンクリート	$\sigma_{ck}=40N/mm^2$	m ³	1577
	鉄筋	SD295A	t	216
	PC鋼材	12S12.7,1T28.6 他	t	52
主塔	コンクリート	$\sigma_{ck}=40N/mm^2$	m ³	76
	鉄筋	SD295A	t	16
斜材ケーブル		19S15.2 (F500PH)	m	821

変動が 50N/mm² 以下である。本橋では活荷重による斜材の応力変動は 20 ~ 43N/mm² であり、許容引張力を 0.6Pu (=2969kN) に設定した。また斜材許容値の妥当性については疲労試験により確認した。

4.3 サドル構造の設計

(1) 構造概要

本橋のサドル構造には、エクストラードード PC 橋として初めて、現場組立ての鋼製スリーブを用いたネジ定着方式を採用した。本構造のネジ部には、PC 定着工法として使用実績の多い、外周にネジ加工を施した鋼製スリーブ（呼称、F型マンション）を使用している。斜材緊張後に半割りにした鋼製スリーブを、斜材のポリエチレン被覆が施されていない所定の位置に取付け、スリーブ内にエポキシ樹脂を注入し、その硬化によってケーブルとスリーブを一体化させている。（以下、本文中ではこの定着装置をエポキシマンションと呼称する。）また本サドル構造の特徴を以下に示す。

- ①サドル内部は応力変動の影響を受けない。
- ②単管構造であるため、グラウトや内管配置の必要がない。
- ③ネジ定着であるので、斜材の交換や再緊張が容易である。

エポキシマンションを用いたサドル構造では、斜材張力導入直後にサドル両端がネジ定着されるため、サドル内部には導入時の斜材張力が残留する。斜材自由長部では、施工ステップの進捗やクリープにより導入時の張力が減少するため、完成時においてサドル内部は自由長部より高い斜材張力が保たれる状態となる。従って、斜材に生じる応力変動はエポキシマンション部分で吸収され、サドル内部は応力変動の影響を受けない構造となる。（図-5 参照）ただし、本構造が成り立つには、次に示す2つの条件が満たされていることが必要である。

- ①サドル内部と自由長部の張力差が、斜材の応力変動量以上であること。 $[\Delta P_{min} > \Delta P +]$
- ②張力差がエポキシマンションの付着強度以下であること。 $[P_{\tau} > \Delta P_{max}]$

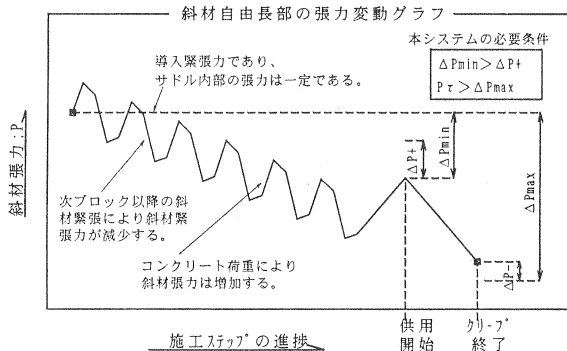


図-6 斜材張力差の関係図

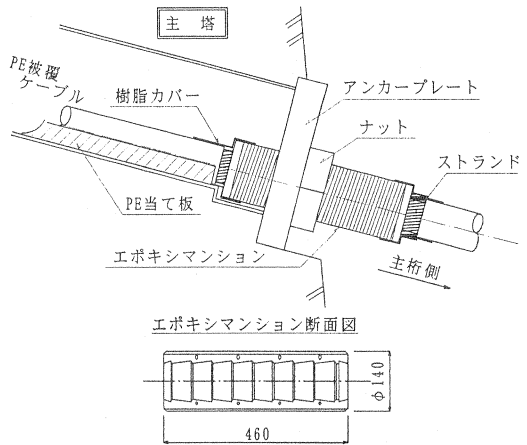


図-4 サドル部構造図

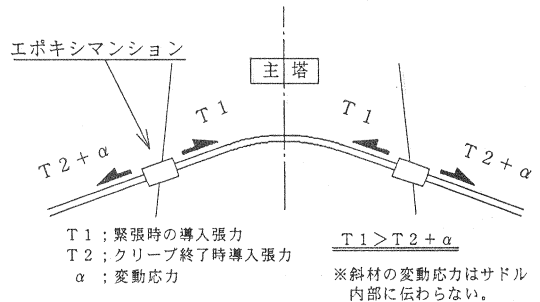


図-5 サドル構造概念図

ここに、

- Δ P+; 活荷重、温度荷重などによる斜材張力の増加量
- Δ P-; 活荷重、温度荷重などによる斜材張力の減少量
- Δ Pmax; サドル内部と自由長部の張力差の最大値
- Δ Pmin; サドル内部と自由長部の張力差の最小値

(2) エポキシマンションの設計

上述のとおり、本サドル構造ではサドル内部と自由長部の張力差をエポキシマンションが負担することになる。本橋における最大張力差は、最下段の斜材においてクリープ終了時に $\Delta P = 545\text{kN}$ となる。また硬化したエポキシ樹脂の最低付着強度は $\sigma\tau = 15.5\text{N/mm}^2$ であり、安全率 $\gamma = 3$ とした場合のエポキシマンションの必要長は以下のとおり算出できる。なお、本橋においてはエポキシマンション長を 460mm とした。

$$P\tau = \sigma\tau \times \phi_s \times \pi = 15.5 \times 76 \times \pi = 3700\text{N/mm}$$

$$l_{\min} = \Delta P / P\tau \times \gamma = 545,000 / 3,700 \times 3 = 442\text{mm}$$

ここに、 $P\tau$: エポキシマンション設計付着強度

ϕ_s : ストランド径 (76mm)

l_{\min} : エポキシマンション必要長

5. サドル構造の性能試験

5.1 被覆ポリエチレン圧縮クリープ試験

斜材ケーブルは防錆材を塗布した後、ポリエチレン被覆 ($t=10\text{mm}$) を施しているため、保護管の配置やグラウトは不要となる。しかし、サドル部ではケーブルに大きな腹圧力が作用し、ポリエチレン被覆には高い圧縮力が作用することになる。この腹圧力によりポリエチレン被覆に損傷が生じると、長期的な防錆が確保できなくなる。このためポリエチレンの圧縮強度試験および長期圧縮耐力に関して圧縮クリープ試験を実施した。

(1) 圧縮試験

圧縮強度試験の結果、被覆ポリエチレンの圧縮降伏耐力として $17 \sim 20\text{N/mm}^2$ の値が得られた。また、ケーブルのポリエチレン被覆に作用する設計支圧応力度は、ヘルツ理論により次式にて算出した。ただし、ヘルツ理論により圧縮力を受ける材料は、降伏圧縮力に達する以前においては弾性接触をしていると仮定した。

$$\sigma_{pe} = W / (2 \times a)$$

$$W = P / R$$

$$a = \left\{ \frac{4}{\pi} W \frac{R_1 \times R_2}{R_1 - R_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right\}^{1/3}$$

ここに、 R : サドルの曲げ半径 ($R = 3\text{m}$)

P : ケーブル張力 ($P = 0.6P_u = 3000\text{kN}$)

a : 材料 1,2 がヘルツ接触する幅は $2a$ となる。

R_1, R_2 : 材料 1,2 の曲げ半径

E_1, E_2 : 材料 1,2 の弾性係数

ν_1, ν_2 : 材料 1,2 のポアソン比

上式によると、鋼製サドルと直接接触する場合、ポリエチレン被覆の支圧応力度は 40N/mm^2 近くになり、試験値としての降伏圧縮応力度を上回ることになる。そのため、本システムでは斜材のポリエチレン被覆に作用する圧縮応力度を低減させる目的で、サドル内部にポリエチレン製の斜材受け座を配置した。これにより、ポリエチレン被覆に生じる設計支圧応力度は、降伏圧縮応力度以下の $\sigma_{pe} = 10\text{N/mm}^2$ 程度に抑えることが可能となった。

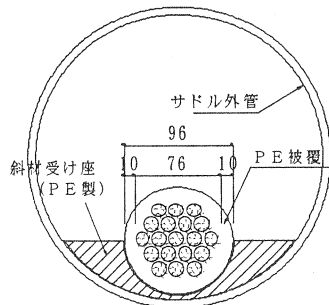


図-7 サドル部断面図

(2) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験の試験概要を表-2に示す。圧縮クリープ試験の結果を用い、設計支圧応力度に安全率 $\gamma = 1.2$ を考慮した $\sigma_{FE} = 12\text{N/mm}^2$ の圧縮応力下におけるポリエチレン被覆の寿命予測を行った。なお、寿命予測は試験データを基にラルソン・ミラー法により行い、図-8に耐用年数-ひずみの相関グラフを示す。100年後の圧縮ひずみは21.3%となり、被覆厚さの1/4のひずみが発生するには400年以上を必要とする結果が得られ、これらの結果から、設計応力レベルにおける被覆ポリエチレンの耐久性は十分であることを確認した。

5.2 サドル構造疲労試験

本橋のサドルシステムは、サドル内部に高張力が残留する構造であり、一般にはエクストラドーズドPC橋のサドル部はフレッチング疲労を伴うことから斜材の疲労強度を低下させることが知られている。そこで、本橋では新しいサドルシステムを採用するにあたり、実橋モデルを対象にした疲労耐力試験を実施した。

試験装置を図-9に示す。アクチュエーター直下に取り付けた供試体ブロックは2段目の斜材をモデル化したもので、ケーブルの曲げ半径を3.0m、斜材角度を17.5度としている。載荷荷重は、ケーブルの下限応力度を引張強度の60%(0.6Pu)に設定し、斜材の応力振幅は設計最大応力変動($\Delta\sigma = 43\text{N/mm}^2$)に安全率 $\gamma = 1.5$ を考慮し $\Delta\sigma = 70\text{N/mm}^2$ とした。

(1) ケーブル耐力

200万回繰り返し載荷後、ストランドの破断およびフレッチング・コロージョンの発生は確認されなかった。また、疲労試験終了後にストランドの引張試験を実施した結果、全ストランドにおいて引張強度の規格値を満足した。

(2) エポキシマンション耐力

疲労試験終了後にエポキシマンション部分を取り出し、ケーブル引抜き試験を実施した結果、エポキシマンションの残留引抜き強度は830kNと測定された。これは設計作用荷重に対して、約1.5倍の安全率となる。

また一方のエポキシマンションを解体し内部を観測した結果、マンション円周方向に亀裂が認

表-2 圧縮クリープ試験概要

試験項目	圧縮クリープ試験
測定項目	時間-ひずみ曲線
試験温度	23℃
試験応力	12, 18, 21 N/mm ²
試験数	各 n=2
試験時間	300hr
試験寸法	サイコロ型試験片 10×10×10mm

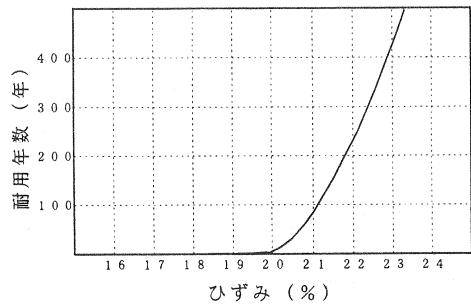


図-8 PE被覆の耐用年数グラフ

表-3 疲労試験概要

試験装置	曲げ半径	3.0m	
	偏向角	17.5°	
載荷条件	ケーブル引張荷重	下限	3000kN
		上限	3200kN
	応力振幅	70N/mm ²	
	載荷繰返し回数	200万回	
試験項目	1) ケーブル耐力		
	2) エポキシマンション耐力		
	3) ケーブル被覆PE耐力		

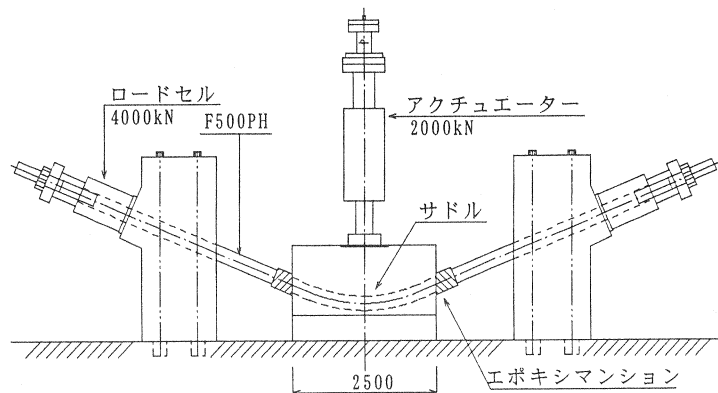


図-9 疲労耐力試験装置

められ、ストランドとの付着面に剥離による空隙が見られた。これらは、施工不良によるエポキシ樹脂の注入量不足が原因と考えられ、実施工では現場作業となるエポキシ樹脂の注入方法の改善改良が課題となった。

(3) ケーブル被覆ポリエチレン耐力

サドル部ポリエチレン被覆の亀裂検測、肉厚測定の結果、異常はなく十分な耐力を確認した。

5.3 エポキシマンション施工試験

サドル部耐力試験の結果、施工不良によるエポキシの注入不足が確認された。また、現場でのエポキシマンション組立て作業は主塔上の狭い空間という厳しい施工条件下での作業となるため、実施工に先立ち現場での施工試験を実施した。また、施工試験を実施するにあたり疲労試験段階から下記の箇所を改良した。

- ①エポキシ樹脂注入孔を大きくした。また、止水処理を施すためスリーブ両端にネジなしの部分設けた。
- ②2分割されたスリーブの接合精度を向上させるため、外径ネジがずれないように別途にノックピンを取付けた。
- ③マンションの接合ボルト径をランクアップし本数を増やした。

エポキシ樹脂の注入は上下に取付けたホースのうち下側の注入ホースから漏斗により自然流下で

行い、注入量は注入側と排出側のホース内水位によって確認した。養生方法はバンドヒーターによる加熱養生とし、養生時間は約40℃で24時間とした。養生終了後に硬化したエポキシマンションを解体し充填状況を確認したところ、マンション内に空隙は観測されず十分エポキシ樹脂が充填されていることが確認できた。

6. おわりに

雪沢大橋は平成13年1月の工事竣工を目標に現在施工中である。本橋での設計とサドル部の性能試験により、本サドルシステムは疲労性能に優れていることを確認することができた。今後は、エポキシマンションの軽量化（エポキシマンションの部品重量が重く人力となるマンション組立て作業に負担がかかるため。）や、エポキシ注入作業における品質管理方法の確立が継続的な課題となる。なお、今回の試験の成果が外ケーブル機能の拡大につながれば幸いです。

参考文献

- 1) 長谷川・川辺・椛木・高橋：緑地環境保全地域に架ける雪沢3号橋の計画と設計，土木学会第55回年次学術講演会概要集
- 2) 布下・川辺・立花・及川：雪沢3号橋サドルシステムの性能試験と施工試験，土木学会第55回年次学術講演会概要集

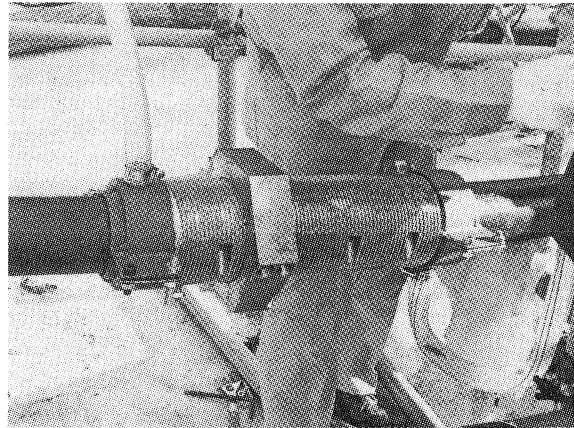


写真-1 エポキシ樹脂注入状況

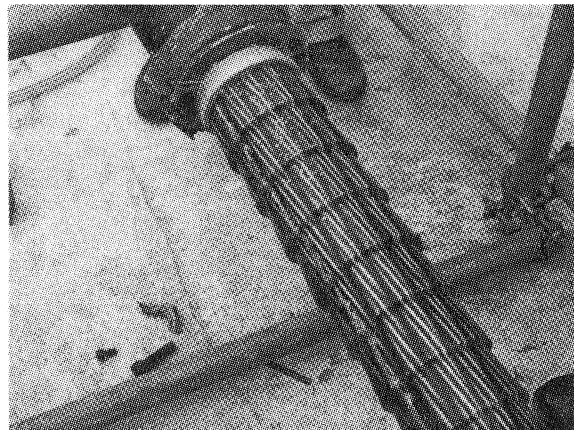


写真-2 エポキシ樹脂充填状況