

## PC スノーシェットの耐衝撃性向上に関する実験的研究

### EXPERIMENTAL STUDY ON UPGRADING IMPACT RESISTANCE OF PC SNOW-SHEDS

竹本伸一<sup>\*</sup>, 今野久志<sup>\*\*</sup>, 川瀬良司<sup>\*\*\*</sup>, 三上 浩<sup>\*\*\*\*</sup>, 岸 徳光<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Shin-ichi TAKEMOTO, Hisashi KONNO, Ryoji KAWASE, Norimitsu KISHI

- <sup>\*</sup> ドーピー建設工業(株)札幌本店 部長代理 設計部 (〒060-0001 札幌市中央区北1条西6丁目)  
<sup>\*\*</sup> 工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒0062-8602 札幌市豊平区平岸1丁目3)  
<sup>\*\*\*</sup> 構研エンジニアリング(株)次長 防災対策部 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)  
<sup>\*\*\*\*</sup> 工博 三井建設(株)主席研究員 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)  
<sup>\*\*\*\*\*</sup> 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

キーワード: PC スノーシェット, TLAS, AFRP シート, 曲げ補強, 耐衝撃性  
 (PC snow-shed, TLAS, AFRP sheet, flexural strengthening, impact resistance)

#### 1. はじめに

平成10年11月, 北海道南西部の国道229号歌棄(うたすつ)覆道にて比較的小規模な落石により主桁フランジ部が損傷し, 国道上にコンクリート片が落下する事故が発生した. 本覆道は冬期における国道への雪崩および多量の積雪を防止するためのPC製スノーシェットであり, 落石荷重を想定した構造設計となっていない. このことから, 今後の落石事故の再発を憂慮し, 本覆道の耐衝撃性向上に関する補強工事を行うこととなった.

著者らはこれまでPC/RC製落石覆道の緩衝工として上層から敷砂, RC製芯材, 発泡スチロール材(以後, EPS材)を積層した三層緩衝構造(以後, TLAS)を独自に開発し, 実規模実験や数値解析的検討によりその優れた緩衝効果を確認している<sup>1)</sup>.

一方, 桁の曲げ耐力向上のためには, 軽量で施工性が良く高引張耐力を有する繊維強化プラスチック(以後, FRP)シート接着工法に着目した実験研究により, 各研究機関においてその補強効果が確認されている. 著者らによる既往の研究において, 炭素繊維強化プラスチック(以後, CFRP)シートの他, しなやかで非電導体であるアラミド繊維強化プラスチック(以後, AFRP)シートによる補強工法が衝撃的荷重に対して特に有効であることを明らかにし

ている<sup>2)</sup>.

以上のことから, 本研究では歌棄覆道に代表されるスノーシェットにおける上部工PC桁の効果的な耐衝撃性能向上法を確立することを目的としてTLASの設置およびAFRPシート接着による曲げ補強工法を提案し, 実規模PC桁を用いた重錘落下衝撃実験により本補強工法の有効性について検討を行った.

#### 2. 実験の概要

##### 2.1 試験体

図-1には本実験に用いた試験体の形状寸法, 配筋および歪ゲージ貼り付け位置を示している. 試験体は歌棄覆道スノーシェットの上部工T型PC桁を再現し実大規模で製作したものである. 試験体の設計はコンクリートの設計基準強度を58.8MPaとし, 主鉄筋にはSD295A D13, PC鋼より線にはSWPR7A1T-12.4を用い, PC鋼より線の緊張力を84.63kN/本として行っている. 実験時におけるコンクリートは材齢が31日で平均圧縮強度 $f_c = 60.47$ MPaであった. 表-1には軸方向筋の力学的特性を示している.



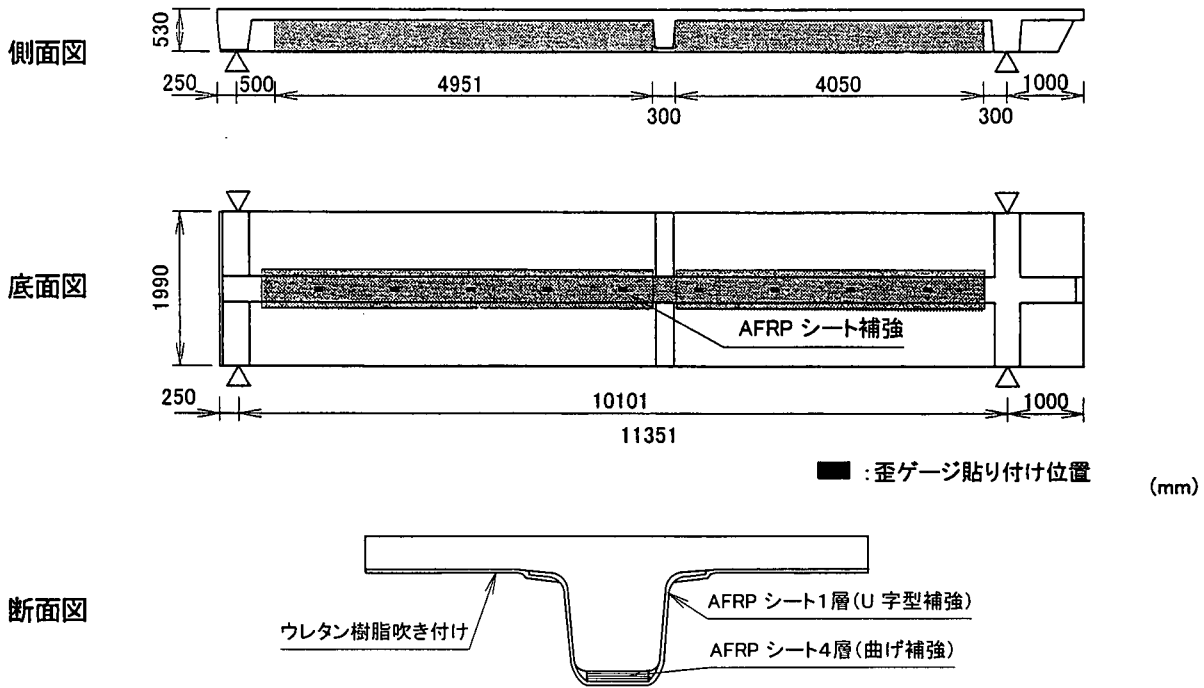


図-3 AFRP シート補強の概要

した。また、本研究では主桁部の曲げ補強設計を行うために、1組のスノーシェッド骨組構造に関する有限要素法による三次元弾性衝撃応答解析を行っている。紙面の都合によりその詳細は省略することとし、ここではその概要のみを述べる。数値解析にあたって、入力衝撃荷重は以下のようにして決定した。すなわち、1) 入力衝撃荷重は TLAS によって主桁頂版上に伝達される衝撃力(伝達衝撃力)を用いる。その波形は最大値が前述のようにして評価された 2.01 MN であり、剛基礎上の実験結果に基づき、継続時間が 70 ms で台形分布状であると仮定する、2) TLAS による荷重分散は剛基礎上の実験結果に基づき、4 m 四方内で等分布的であると仮定する、3) 従って、主桁の荷重分担率は考慮せず、上述の仮定に基づいて算定された分布荷重を主桁頂版上に作用させる、である。その結果、主桁中央部に載荷した場合の応答値が最大となり、その時の最大曲げモーメントは載荷点部で 2.26 MNm となる。

### (3) AFRP シート曲げ補強設計

本補強設計では、このようにして求められた最大曲げモーメントに対して、前述のように AFRP シートを主桁下面に貼り付けることにより耐力強化を図ることとした。ここでは、最大伝達衝撃力およびこれに基づく最大曲げモーメント値はあくまでも概算値であることを前提に、経済性を考慮して、目付

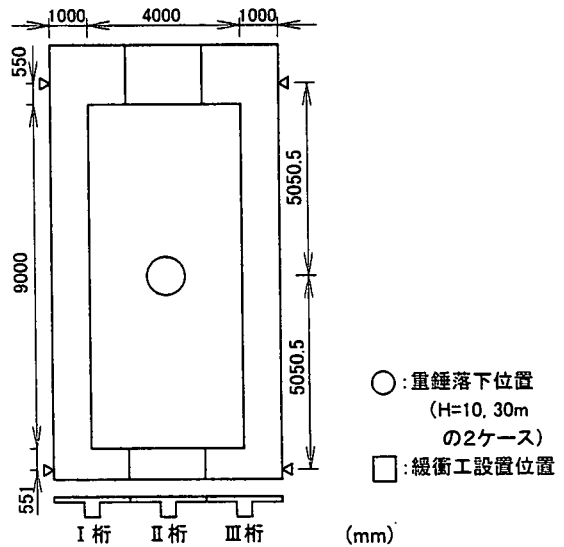


図-4 PC 桁の構成図

け量  $820 \text{ g/m}^2$  (厚さ 0.565 mm)、幅 24.3 cm の AFRP シートを 4 層貼り付けることとした。その結果、主桁の曲げ耐力は無補強時の 0.86 MNm からその 1.77 倍である 1.52 MNm まで向上させることができた。この補強量の妥当性は後述の実験結果により検討することとする。本実験で採用した AFRP シートの材料特性は、弾性係数：126.5 GPa、引張強度：2.48 GPa、終局時引張歪：約 2% で終局時まで弾性状態を保持する。また、曲げ補強シ

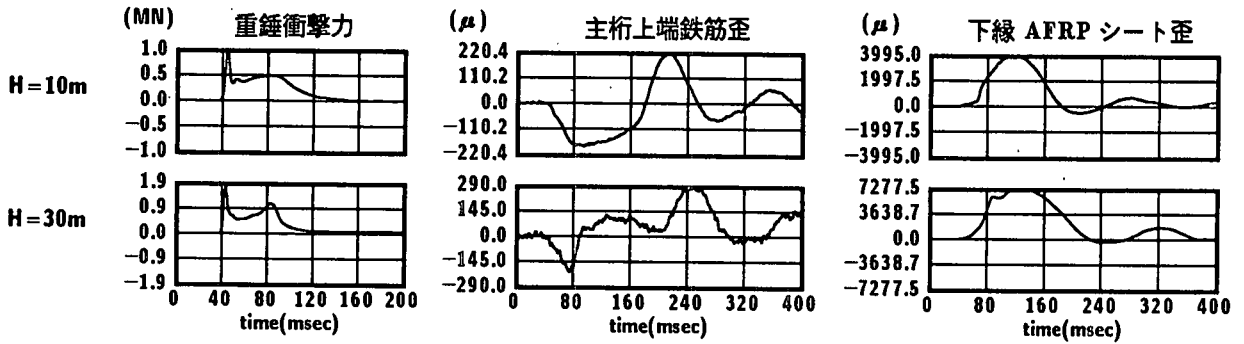


図-5 重錘衝撃力、載荷点直下の主桁上端鉄筋歪および AFRP シートの歪波形

ートの剝離防止および桁のせん断補強を目的として同 AFRP シート1枚を全長に渡りフランジハンチ部まで巻き付ける U 字型補強を施している。図-3には AFRP シート補強の概要を示している。

### 2.3 実験方法

図-4には PC 桁の構成図を示している。本研究では既設のスノーシェッドに近似した状態で実験を行うため、PC 桁試験体を横並びに3体配置し、TLAS を図のように 9 m × 4 m の範囲に設置している。

実験は 2 ton の鋼製重錘をトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、自由落下させることにより行っている。試験体は単純支持状態にできるだけ近似させるように鋼棒 50 φ 上に設置している。また、リバウンドによる試験体の跳ね上がりを防止するため、支点を据え付けている H 型鋼と桁上縁に配置した支持治具 (鋼棒 50 φ) を PC 鋼棒により緊結している。実験ケースは重錘の落下高さ H = 10 m および想定落石エネルギー 588 kJ が作用する H = 30 m とした全 2 ケースである。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力算定のための重錘加速度、載荷点変位、曲げモーメント分布算定のために 100 cm 間隔で測定した主桁軸方向上端鉄筋歪および下縁 AFRP シート歪分布である。なお、主桁部の歪および変位は中央に配置した II 桁で測定している。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験結果の概要

重錘落下高さ H = 10 m の場合にはひび割れ等の損傷は認められず、落下高さ H = 30 m とした場合においても後述のとおり若干のひび割れが確認されたものの大きなひび割れの開口や AFRP シートの破断は確認されていない。また、落下高さ H =

30 m の場合の最大変位は 13.6 cm、残留変位は 1.24 cm であり、それぞれ PC 桁純スパン長の 1/75, 1/815 程度と小さなものとなっている。これらのことから、本補強工法を施した PC 桁は想定落石エネルギー 588 kJ が主桁中央部に作用した場合においても十分に健全であるものと判断される。従って、覆道主桁部は TLAS の設置および提案の補強方法を適用することにより、設計落石エネルギーに対して十分な断面耐力を有していることが明らかになった。

### 3.2 各応答波形分布性状

図-5には重錘衝撃力、載荷点直下の主桁上端鉄筋歪、下縁 AFRP シートの歪波形を比較して示している。重錘衝撃力波形は既往の研究結果同様 TLAS を設置した場合に特徴的な短周期で最大値を示す第1波目と比較的低振幅で長周期の第2波目の波動が連続した分布性状を示している。一方、載荷点直下の主桁下縁 AFRP シート歪波形を見ると、落下高さが H = 10 m の場合には立ち上がりから約 140 ms 経過後にリバウンド状態に移行しているのに対して、落下高さが H = 30 m の場合におけるリバウンドは約 160 ms 経過後となっていることより、落下エネルギーの増大により PC 桁の塑性化が進行していることをうかがわせる。しかしながら、両歪は零レベルに復元後負荷荷状態に移行していることより、補強設計条件と同一の落石エネルギーである落下高さ H = 30 m の条件下では桁は終局に至っていないことがわかる。従って、主桁の曲げ補強設計時に概算した伝達衝撃力は実験結果と比較して後述のようにならかなり安全側の値となっているものと推察される。

### 3.3 主桁の曲げモーメント分布

図-6には、断面分割法によって概算した曲げモーメント分布の経時変化を落下高さ H = 10, 30 m

1.0 MNm

○ : H=10m  
● : H=30m

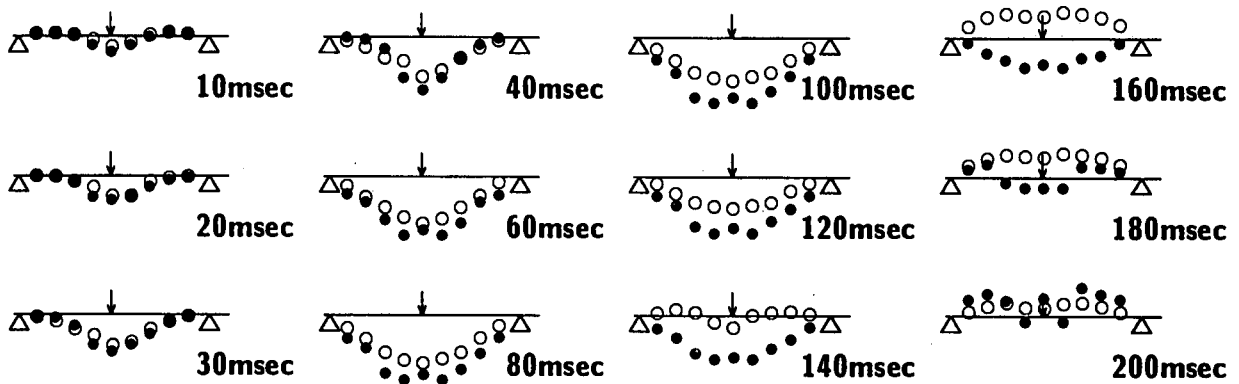


図-6 曲げモーメント分布の経時変化

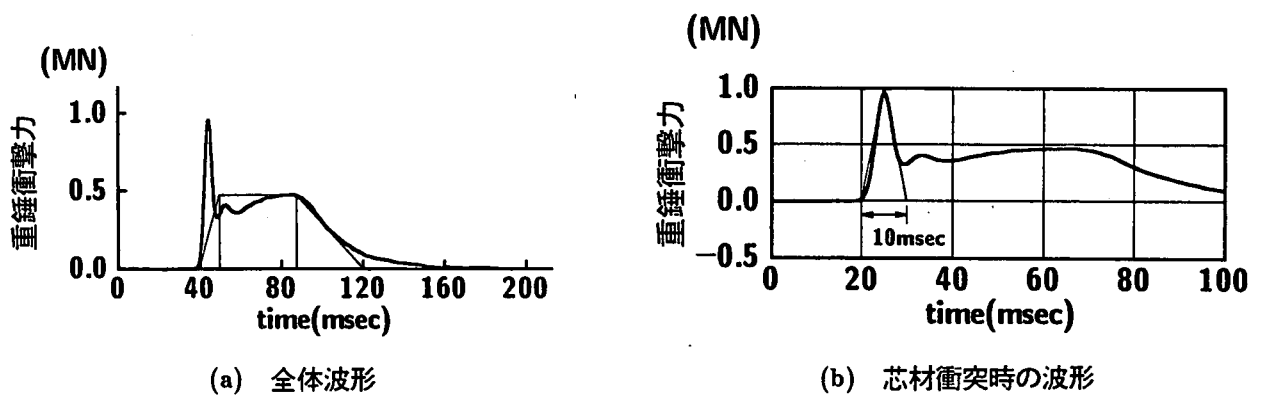


図-7 重錘衝撃力および伝達衝撃力波形分布 (H = 10 m)

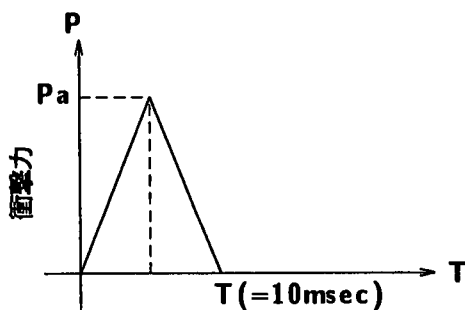


図-8 作用衝撃力波形分布

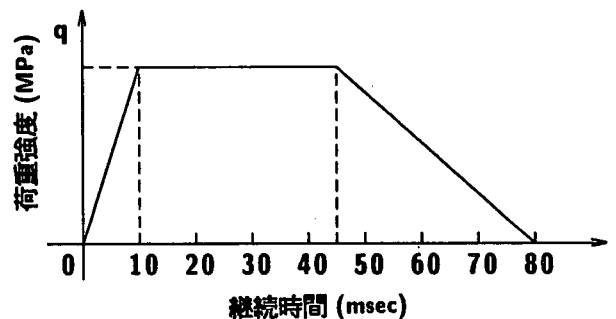


図-9 伝達衝撃力波形分布

で比較して示している。なお、各断面の曲げモーメント値は PC 鋼より線に導入されている初期プレストレス量、各材料の強度特性を考慮し、断面内の歪の線形変化の仮定のもとに上端鉄筋歪と下縁 AF RP シート歪波形を入力して断面分割法により概算した。図より、衝撃初期にはスパン方向に3次モードが卓越する分布性状を示しているが、時間の経過とともに静的に等分布荷重が載荷する場合と同様放物線状となっており、TLAS の設置によって衝撃

荷重が効率よく分散されていることを裏づけている。各ケースの最大モーメント値はいずれも立ち上がりから 80 ms 前後経過した時点で発生しており、落下高さ H = 10 m, 30 m でそれぞれ 0.91 MNm, 1.13 MNm となっている。前述のように、補強設計時点で概算した最大曲げモーメント値は 2.26 MNm, 補強後の桁の曲げ耐力は 1.52 MNm であることより、応答曲げモーメント値に関しても本 PC 桁は未だ終局に至っていないことがわかる。

#### 4. 実験結果に基づいた衝撃力、最大曲げモーメントの推定

本論文では TLAS を用いた場合における補強設計のための最大伝達衝撃力の算定を、前述の通りロックシェッドを対象とした場合の仮定に基づいて算定評価している。しかしながら、補強設計した条件下で実験結果が得られたことより、ここでは実験結果に基づいて伝達衝撃力および衝撃応答解析により求められる最大応答曲げモーメント値を再度概算することとする。H = 30 m の場合には、重錘の落下エネルギーが大きく芯材の損傷程度が大きくなるため、重錘の芯材衝突時における衝撃力が小さく評価される可能性がある。これより、ここでは落下高さが H = 10 m の場合の実験結果を用いて評価するものとする。

図-7には重錘衝撃力波形に関する全体波形と芯材衝突時の初期の波形の拡大図を示している。(b)図より、重錘が芯材に衝突する時の重錘衝撃力波形はほぼ継続時間が 10 ms で時間的に二等辺三角形分布を示している。また、最大重錘衝撃力は約 1 MN で、ラーメ定数を  $\lambda = 1.96 \text{ MPa}$  とする振動便覧式の値である 1.27 MN より小さい値となっている。これより、安全側で評価するために芯材に作用する衝撃力波形を、図-8に示すように継続時間が  $T = 10 \text{ ms}$  の二等辺三角形分布、最大重錘衝撃力が当初の設計時と同様に  $\lambda = 1.96 \text{ MPa}$  とする振動便覧式の値と仮定する。文献 3) の考え方に従って概算評価すると、H = 10, 30 m の場合における最大伝達衝撃力値はそれぞれ 499 kN, 964 kN となる。また、衝撃応答解析を実施するために、伝達衝撃力波形を図-7(a)の全体波形に基づいて、図-9のような台形状分布に仮定する。このような仮定のもとに、H = 30 m に関する一組のスノーシェッド骨組について、前述と同様に有限要素法を用いた三次元弾性衝撃応答解析を行うと、スパン中央部で 1.27 MNm の最大曲げモーメントが得られる。前述のように実験結果の応答歪から算定した最大曲げモーメント値が 1.13 MNm であることより、上述の衝撃力の評価過程はほぼ妥当なものであることがわかる。なお、1.27 MNm の曲げモーメントに対して AFRP シートの補強量を算定すると、当初の設計

と同様目つけ量  $820 \text{ g/m}^2$  (厚さ 0.565mm)、幅 24.3 cm の AFRP シートが 3 層 (補強後の曲げ耐力 1.32 MNm) となる。

従って、本論文で適用した TLAS 構造の場合には、ロックシェッドを対象とした伝達衝撃力に関する評価過程を基本として、芯材に作用する衝撃力波形分布および伝達衝撃力波形分布をそれぞれ、図-8、図-9 のように修正することによって、合理的にスノーシェッドに作用する伝達衝撃力の評価およびスノーシェッドに関する衝撃応答解析が可能になるものと判断される。

#### 5. まとめ

本研究は国道 229 号の歌棄スノーシェッド上部工 PC 桁の耐衝撃性能の向上を目的として、TLAS の設置および AFRP シート補強工法を採用し、落石の発生を想定した実大規模の実証実験により、本補強設計法の有効性を検討したものである。本研究により得られた知見を取りまとめると、

- (1) TLAS の設置と AFRP シートを用いた曲げ補強工法の併用により PC スノーシェッドは想定エネルギーを有する落石荷重が作用した場合においても十分に健全性を保持することが可能である。
- (2) PC スノーシェッドに TLAS を適用する場合にはロックシェッドを対象とする衝撃力評価過程を基本として、芯材に作用する衝撃力波形および伝達衝撃力波形分布を修正することにより実挙動に対応した衝撃応答解析および耐衝撃補強設計が可能となる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの耐衝撃設計，1998。
- 2) 三上 浩，岸 徳光，谷本俊充，小山田欣裕：軸衝撃力を受ける RC 柱の各種巻き付け材料による補強効果，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 1517-1526，1997。
- 3) 佐藤昌志，岸 徳光，松岡健一：三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1337-1346，1996.3。