

実規模 PC スノーシェッドの耐衝撃性向上に関する重錘落下衝撃実験

Prototype Weight Falling Impact Test on Upgrading Impact Resistance of PC Snow-Sheds

岸 徳光* 今野 久志** 三上 浩*** 川瀬 良司**** 栗橋 祐介*****

Norimitsu KISHI, Hisashi KONNO, Hiroshi MIKAMI, Ryoji KAWASE, and Yusuke KURIHASHI

* 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)

** 工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

*** 工博 三井建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

**** (株)構研エンジニアリング (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

***** 工修 室蘭工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

In this study, in order to establish an upgrading design procedure on impact resistance of PC snow-sheds, a new method is proposed which is composed of: 1) setting of Three-Layered Absorbing System (TLAS) on the roof to attenuate and to disperse the impact force generated due to falling rocks; 2) bonding of Aramid Fiber Reinforced Plastic (AFRP) sheet on the lower surface of the girder to upgrade the flexural capacity of girder; 3) spraying of Urethane resin on the lower surface of flange to protect concrete spalling. To confirm the applicability of the proposed method, the weight falling impact tests are conducted by using prototype T-shaped PC girders. The results obtained from this study are as follows: 1) PC girders can be rationally upgraded by bonding AFRP sheet on the lower surface of girder; 2) concrete spalling at the lower surface of flange can be effectively protected by spraying Urethane resin; and 3) applying a proposed estimation method on impact force, upgrading design of PC snow-sheds can be easily performed.

Keywords: PC snow-sheds, AFRP sheet, TLAS, impact resistance, impact test

1. まえがき

切り立った岩盤を背に配し日本海沿岸に面している一般国道 229 号 (北海道南西部) では平成 8 年 2 月に豊浜トンネル, 平成 9 年 8 月には第 2 白糸トンネルにおいて相次いで大規模岩盤崩落が発生している。また, 平成 10 年 11 月には同国道歌棄 (うたすつ) 覆道において比較的小規模な落石により, フランジ部コンクリートが国道上に剝落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大量な積雪の防止を目的とした PC 製スノーシェッドであり, 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, 今後の本覆道における岩盤の経年変化に伴う落石事故の発生を憂慮し, 耐衝撃性の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 (Expanded Poly-Styrol, 以後 EPS) を積層した三層緩衝構造 (Three-Layered Absorbing System, 以後 TLAS) を独自に開発し, 実規模実験や数値解析の検討によりその優れた緩衝効果を確認している¹⁾。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 (Fiber Reinforced Plastic, 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^{2)~4)}。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^{5), 6)}。

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ドにおける上部工 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 と主桁部には AFRP シート接着による曲げ補強工法を, またフランジ部下面には衝撃荷重載荷による裏面剝離を抑制するためにウレタン樹脂吹き付け工法を提案し, 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妥当性について検討を行った。本実験では, 研究を効率的に実施するために, 次の 2 つの項目に分けて実験を行うこととした。すなわち,

- 1) フランジ部への落石を想定し, 裏面剝離・剝落に関するウレタン樹脂吹き付け工法の有効性を確認する実験;
- 2) 主桁部への落石を想定し, 提案する緩衝性, 曲げ補強効果の有効性を確認する実験である。

2. 実験概要

2.1 歌棄スノーシェッド上部工 PC 桁

図-1 には本実験に用いた試験体の形状寸法, 配筋お

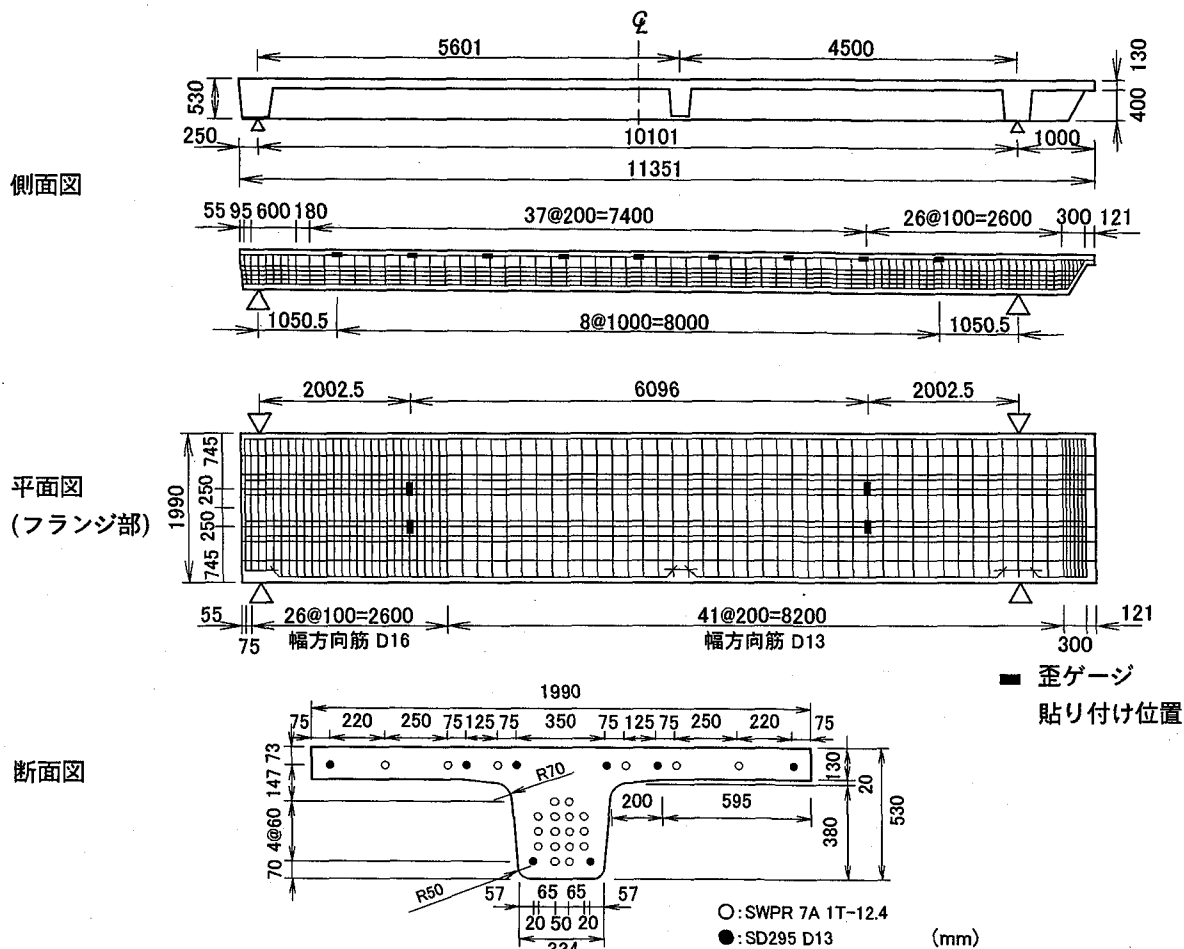


図-1 試験体の概要

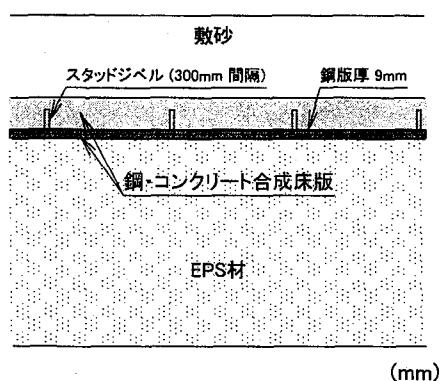


図-2 TLAS の概要図

表-1 コンクリートの力学的特性

材齢 (日)	ポアソン比	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)
31	0.185	27.9	60.47

表-2 軸方向筋の力学的特性

補強材名	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (GPa)	引張強度 (GPa)
鉄筋	205.9	0.390	0.531
PC 鋼より線	195.0	1.88	2.06

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ドの上部工 T 型 PC 桁を再現し実大規模で製作したものである。試験体はコンクリートの設計基準強度を 58.8 MPa とし、主鉄筋には SD295A D13、PC 鋼より線には SWPR7A 1T-12.4 を用い、鋼より線の緊張力を 84.63 kN/本 として設計している。表-1 には実験時のコンクリートの力学的特性、表-2 には軸方向筋の力学的特性を示している。

2.2 主桁の曲げ補強設計

PC 桁の補強設計では、想定落石エネルギーとして直径 $\phi = 1$ m、質量 $M = 1.5$ ton、落下高さ $H = 40$ m の落石に相当する 588 kJ を設定している。ここでは、スノーシェッドが鉛直荷重として深さ 2 m の積雪荷重および自重のみを考慮して設計されていることより、緩衝構造には敷砂単層に比較して軽量で衝撃緩和、荷重分散性に優れている TLAS を採用することとした。TLAS の構成は落石崩壊直後の応急復旧時に覆道頂版部に設置した 50 cm 厚の EPS を裏層材として、9 mm 厚の鋼版

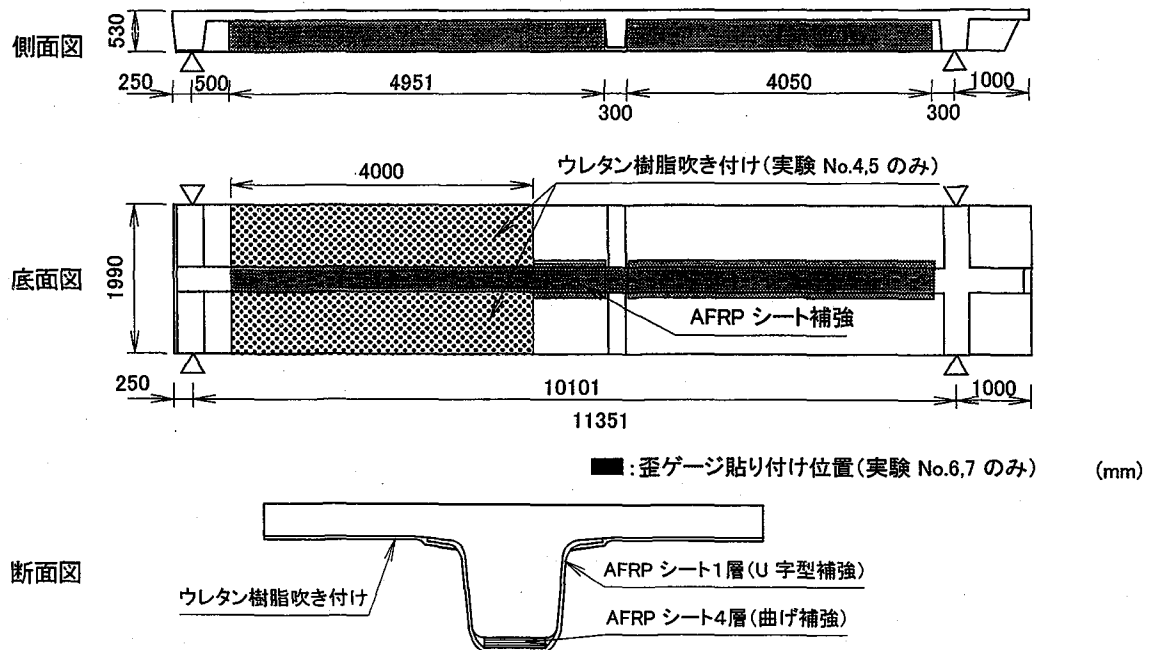


図-3 補強の概要

を芯材 RC 版の補強材として流用することとした。頂版上載荷重をできるだけ低減するために、TLAS は図-2 に示すように、1) EPS 材上に設置された鋼版に 300 mm 間隔で直径 19 mm、高さ 80 mm のスタッドジベルを溶植し、その上にコンクリートを吹き付けることにより、厚さ $h_c = 10$ cm の鋼・コンクリート合成床版 (芯材) を現場施工する。2) その上に表層材として $h_s = 20$ cm 厚の砂を敷くことにより TLAS を完成させることとした。本 TLAS の設置により、上述の設計落石エネルギーに対する最大伝達衝撃力はロックシェッドを対象とした評価法⁷⁾ に基づき 2.01 MN として概算評価できる。なお、最大伝達衝撃力を定式化する際に用いられる芯材に作用する衝撃力波形および最大衝撃力値 P_0 は、本実験ケースのように表層敷砂厚および芯材厚がロックシェッドを対象とする場合に比較して薄く、構造物が撓化性に富んでいる (緩衝構造の質量を無視した状態における最低次固有振動周期 $T_0 = 0.1$ sec) 場合の実測例がないことにより、前述のようにロックシェッドを対象とした TLAS 構造の場合と同様に剛基礎上の波形データに基づいて周期 30 msec の正弦半波波形で、ラーメ定数を $\lambda = 1.96$ MPa とする振動便覧式の値 $P_0 = 2.4$ MN とした。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 msec 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。このように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、目付け量 820 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、曲げ補強シートの剝離防止および桁のせん断補強を目的として同 FRP 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。なお、著者らによる既往の研究より、コンクリートと FRP シートの曲げ付着性能を向上させるためにはコンクリート表面処理法としてチッピング処理がもっとも有効であることが明らかになっている⁸⁾。従って、本実験においても曲げ

表-3 実験ケースの一覧

実験 No.	実験ケース名	緩衝工	補強材	載荷方法	重錘落下高さ H (m)	載荷位置
1	N-N-S2	—	Ⅱ桁のみウレタン樹脂吹き付け	単一載荷	2	フランジ部
2	TLAS-N-S10	TLAS	—		10	
3	TLAS-N-S30				30	
4	TLAS-U-S10				10	
5	TLAS-U-S30				30	
6	TLAS-A-S10	TLAS	AFRP シート		10	主桁中央部
7	TLAS-A-S30				30	

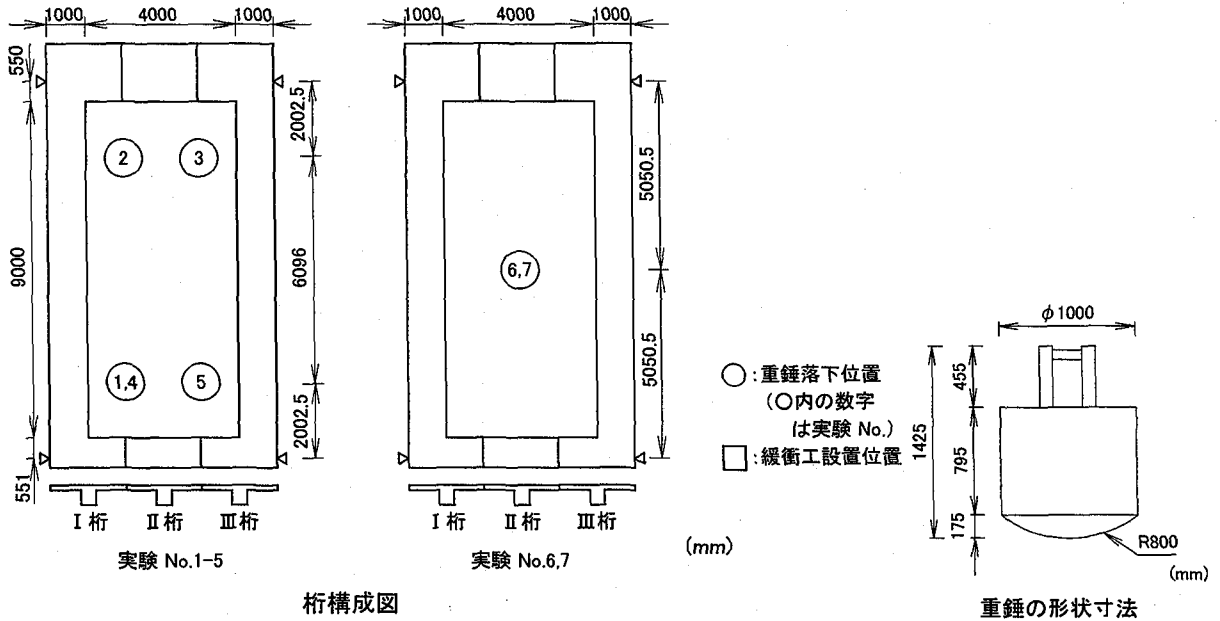


図-4 各実験ケースの桁構成および重錘の形状寸法

補強シートの接着部である底面にはチッピング処理を施し、AFRP シートを接着することとした。

2.3 ウレタン樹脂吹き付け工法

本覆道の落石事故時にはフランジ部のコンクリートが大きく剝落していることから、本補強工法では落石時のコンクリート片の剝落を抑制するためウレタン樹脂吹き付け工法の採用を試みた。本実験に用いたウレタン樹脂は硬化時間が 14 ～ 30 分程度で、耐水性、耐候性および耐薬品性に優れた超速硬化タイプのスプレー式ウレタン樹脂である。物性試験結果、引張強度は 10.6 MPa、破断までの伸び率は 50 % であり、コンクリート剝落防止には有効的に作用するものと判断される。なお、過去の土木用途における施工実績としてはカルバートボックスの外周防水や橋脚の保護被覆などが挙げられる。図-3 には AFRP シートの貼り付けおよびウレタン樹脂吹き付けの概要を示している。

2.4 実験方法および実験ケース

実験は全て 2 ton の鋼製重錘を用いて行っており、研究を効率的に遂行するために、以下の 2 つの項目に分けて実施した。すなわち、

- 1) TLAS を設置して主桁フランジ端部に重錘落下衝撃荷重を載荷した場合のウレタン樹脂吹き付けによる裏面剝離・剝落防止効果の確認実験。本実験では主桁の応答値は小さいものと判断されることより、試験桁を有効に活用するために、両支点から 1/4 スパン長の点に載荷することとし、主桁フランジ部に AFRP シート補強は施していない。なお、落石による被害状況確認のために、緩衝工およびウレタン樹脂吹き付け処理を施していない場合に関する実験も実施している。
- 2) TLAS を設置し、かつ主桁を AFRP シートにより曲げ補強して主桁中央部に重錘落下衝撃荷重を載荷した場合の主桁の耐衝撃性確認実験。本実験では、フランジ部の面外変形としての応答が小さいものと判断されることより、ウレタン樹脂吹き付けは施していない。

表-3 に実験ケースの一覧を示す。実験ケース名は第 1 項が緩衝工の種類 (N: なし, TLAS: TLAS), 第 2 項が補強材料の種類 (N: 無補強, A: 主桁下面部を AFRP シート補強/主桁中央部載荷の場合, U: フランジ下

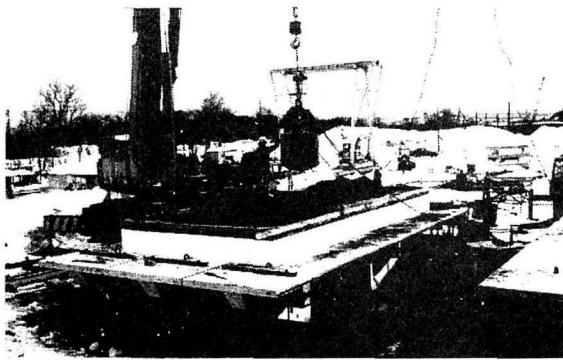


写真-1 実験状況

面部をウレタン樹脂吹き付け処理/フランジ部載荷の場合), 第3項は重錘落下高さ(m)を示している。また, N-N-S2 は後述のように隣り合うⅠ, Ⅱ桁のフランジ端部載荷の場合であるが, Ⅱ桁フランジ部のみにウレタン樹脂吹き付け処理を施しウレタン樹脂吹き付け処理の有無によるフランジ部の破壊性状の差異を検討している。

図-4には各実験ケースにおけるPC桁の構成, 緩衝工設置位置, 重錘落下位置および重錘の形状寸法を示している。本実験では, 図のように全てのケースにおいて3桁構成としている。なお, 3桁構成の場合には各桁を左から順にⅠ桁, Ⅱ桁, Ⅲ桁と呼ぶこととしている。本研究ではより厳しい条件下で耐衝撃性を評価することとし, 特に桁の横締め処理は施していない。緩衝工は, 既設状態で落石事故時を再現したケース(N-N-S2)を除き, 3桁に渡ってTLASを9m×4mの範囲に設置している。また, フランジ端部載荷の場合にはTLASの損傷は局所的であることより, TLASの取り替えはせずに実施した。一方, 主桁上載荷の場合には, 各実験ごとにTLASを取り替えて実験を実施している。

全ての実験は2tonの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50φ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型钢と桁上縁に配置した支持治具(鋼棒50φ)をPC鋼棒により緊結している。写真-1には3桁構成時の実験状況を示している。

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, 主桁フランジ付け根部断面方向上下端鉄筋歪, 曲げモーメント分布算定のために100cm間隔で測定した主桁軸方向上下端鉄筋歪分布および同様の間隔で測定した変位分布である。なお, 主桁の鉄筋歪および変位は中央部に配置したⅡ桁のみで測定している。さらにAFRPシートの剝離状況を検討するために, TLAS-A-S10/30に限定して全長に渡って25cm間隔に歪ゲージを貼り付け, シートの歪分布を測定している。(図-3参照)。なお, 桁の曲げモーメント分布算定のためには, 桁下端のひび割れが大きくなり下端鉄筋歪の信頼度が低

表-4 実験終了後の状況(フランジ部載荷)

実験ケース名	実験終了後の状況
N-N-S2	フランジ部が陥没しⅠ桁のコンクリート片が大きく剝落
TLAS-N-S10	損傷なし
TLAS-U-S10	
TLAS-N-S30	フランジ部がたわみ局所的にコンクリートが剝離
TLAS-U-S30	フランジ部はたわむもののコンクリートの剝落はなし

下することが予想されたことより, 上端鉄筋歪と下縁AFRPシート歪を用いることとした。

3. 実験結果および考察

3.1 主桁フランジ端部載荷実験

1) 実験終了後のひび割れ性状

表-4にフランジ部載荷実験終了後における試験体の状況の一覧を示す。また, 図-5にはフランジ部が損傷したケースに関するフランジ裏面のひび割れ性状および破壊状況写真を示している。図および写真より, N-N-S2のⅠ桁フランジでは重錘落下部が激しく損傷しコンクリート片が大きく剝落していることがわかる。これより, N-N-S2では落石事故時とほぼ同様の破壊状況が再現されていることがわかる。また, このことから歌棄覆道の主桁フランジ部は無補強の状態で落石エネルギー39kJ程度で破壊に至ることが明らかとなった。なお, ウレタン樹脂吹き付け処理を施しているⅡ桁フランジの場合にはコンクリートの剝落が発生していない。これより, この程度の落石エネルギーの場合にはウレタン樹脂吹き付け処理により, 効率的にフランジ部コンクリート裏面剝離・剝落を防止することが可能であることがわかる。

TLASを設置した場合, 落下高さ $H = 10\text{ m}$ (入力エネルギー $= 196\text{ kJ}$)ではウレタン樹脂吹き付け処理の有無に関わらずひび割れ等の損傷は見られない。従って, 図にはひび割れ状況および破壊状況写真を示していない。一方, 落下高さ $H = 30\text{ m}$ (入力エネルギー $= 588\text{ kJ}$)の場合において, 無補強の場合には半スパンに渡ってフランジ部下縁にコンクリートの剝落が発生している。しかしながら, ウレタン樹脂吹き付け処理を施した場合には約半スパンに渡ってひび割れが発生するもののコンクリートが剝落するまでには至っていない。これより, 本スノーシェッドフランジ部の耐衝撃性は, TLASの設置および主桁フランジ下面部にウレタン樹脂吹き付け処理を施すことにより, TLASを設置しない場合と比較して, 入力エネルギー的に15倍以上の向上が図られ, 本補強設計の想定落石エネルギー588kJがフランジ端部に入力される場合に対しても満足するものであることが明らかとなった。

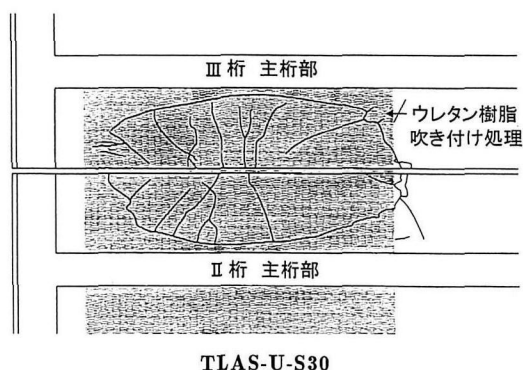
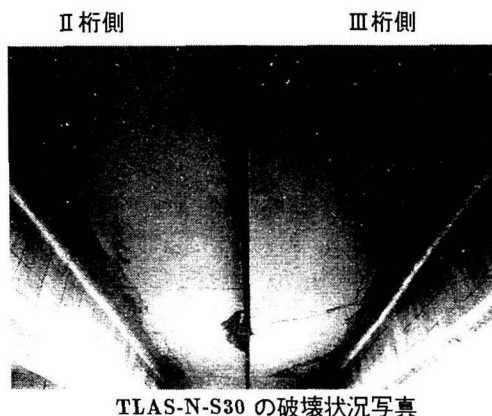
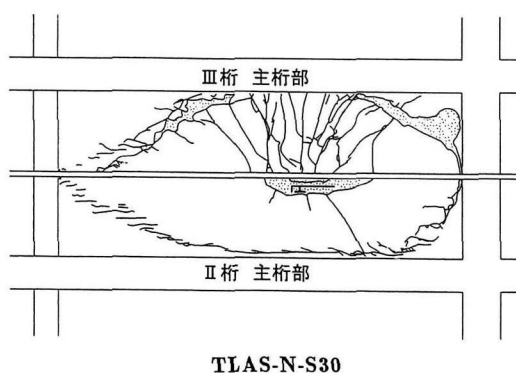
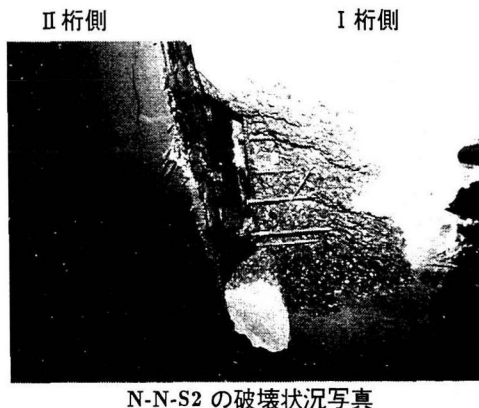
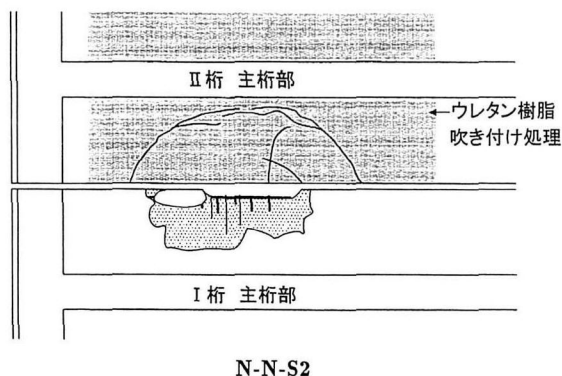
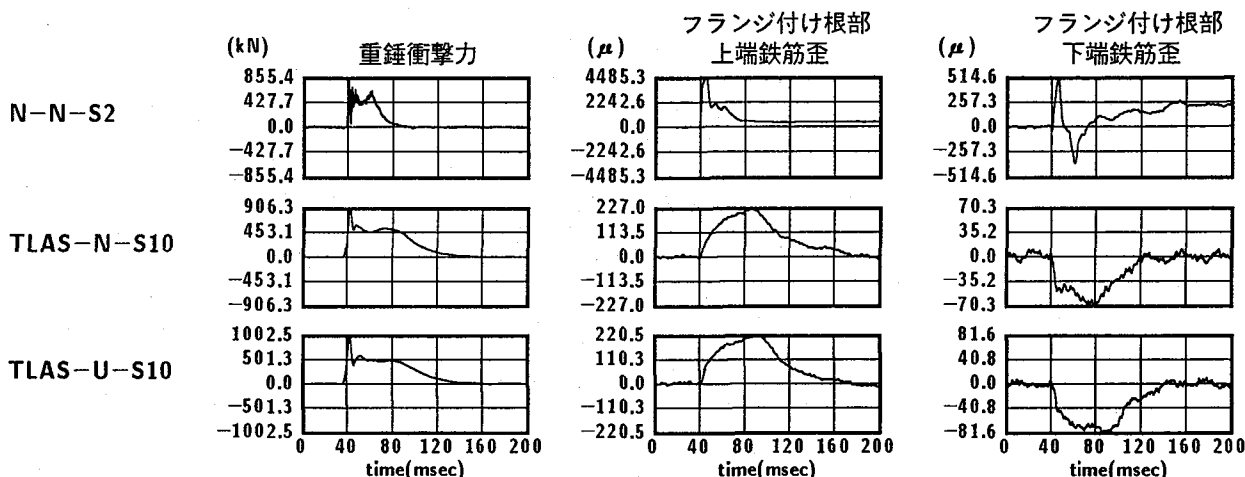


図-5 フランジ部裏面のひび割れ分布性状および破壊状況写真

2) 各種応答値の時刻歴波形分布性状

図-6には重錘衝撃力およびフランジ付け根部断面方向上下端鉄筋歪の波形分布性状を N-N-S2、および落下高さ $H = 10 \text{ m}$ の TLAS-N/U-S10 に関して示している。N-N-S2 の重錘衝撃力は本実験ケースが主桁フランジ部への直接載荷の場合であるにもかかわらず、約 40 msec と比較的継続時間の長い波形分布となっている。これは、重錘落下によってフランジ部が激しく損傷し、大きく陥没したためと考えられる。TLAS-N/U-S10 の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（芯材に衝突時の衝撃力）と比較的低振幅で長周期の第2波目（主桁に

伝達される衝撃力）の波動が連続した分布性状を示している。また、フランジ付け根部断面方向上下端鉄筋歪波形を見ると、TLAS を設置していない場合には、落下初期に上下縁で、 500μ 以上の引張歪が発生しており、貫通するひび割れが発生していることをうかがわせる。一方、TLAS 設置の場合には、上端において 220μ 程度の引張歪が発生しているものの、下端では $70 \sim 80 \mu$ 程度の圧縮歪を示しており、上縁に小さいひび割れが発生している程度であるものと推察される。また、波形の継続時間も重錘衝撃力と同程度で $100 \sim 120 \text{ msec}$ となっており、TLAS 設置による緩衝効果を確認することができる。



図ー6 重錘衝撃力およびフランジ付け根部上下端鉄筋の歪の波形分布性状

表ー5 実験結果の一覧 (フランジ端部載荷)

実験ケース名	最大重錘最大 衝撃力 (kN)	フランジ付け根部上端 最大鉄筋歪 (μ)	フランジ付け根部下端 最大鉄筋歪 (μ)
N-N-S2	855.4	4,485	515
TLAS-N-S10	906.3	227	-70
TLAS-U-S10	1002.5	221	-82
TLAS-N-S30	2190.3	12,965	2,667
TLAS-U-S30	2130.7	*	*

* 測定不良のためデータなし

3) TLAS の荷重分散効果

表ー5に主な測定項目に関する実験結果の一覧を示す。表中、フランジ付け根部断面方向上下端鉄筋歪にはⅡ桁載荷点部の実験結果を用いている。なお、TLAS-U-S30のフランジ付け根部上下端鉄筋歪のデータは測定不良のため記載されていない。まず、重錘落下高さが5倍異なるN-N-S2とTLAS-N/U-S10の結果を比較する。TLAS-N/U-S10の場合における最大重錘衝撃力値はN-N-S2の場合に比べて50～150kN程度大きい。フランジ付け根部の最大歪は前述の通り逆に大幅に低減していることより、TLASを設置することによる緩衝効果を数値的にも確認することができる。また、TLAS-N/U-S10とTLAS-N/U-S30の場合における実験結果を比較すると、落下高さ $H=30\text{m}$ の場合は補強設計条件と同一の落石エネルギーであることより、最大重錘衝撃力が $H=10\text{m}$ の場合に比べて2倍程度の増加であるものの、TLAS-N-S30の場合におけるフランジ付け根部上下端鉄筋歪はいずれも2,000 μ 以上の引張歪を示し、上下に貫通するひび割れが発生する状態に至ることがわかる。

また、ウレタン樹脂吹き付け処理の主桁への影響について調べると、ウレタン樹脂吹き付け処理の有無による各応答値に大差が無いことから、ウレタン樹脂吹き付け処理を施すことによってコンクリートの裏面剝離・剝落を効率的に抑制するものの、主桁全体の耐衝撃性向上効果は小さいものと考えられる。

3.2. 主桁部載荷実験

1) 実験結果の概要

主桁部載荷実験のうちTLAS-A-S10/S30はTLASの設置およびAFRPシート補強の適用が耐衝撃性能の向上効果に与える影響を検証する実験ケースである。重錘落下高さ $H=10\text{m}$ (入力エネルギー=196kJ)の場合にはひび割れ等の損傷は認められず、落下高さ $H=30\text{m}$ (入力エネルギー=588kJ)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 $H=30\text{m}$ の場合の最大変位は13.6cm、残留変位は1.24cm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、提案した補強工法を施したPC桁は想定落石エネルギー588kJ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と判断される。また、本実験結果より、覆道主桁部は提案するTLASの設置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を確認することができた。

2) 各応答波形分布性状

図ー7にはTLAS-A-S10/30に関する重錘衝撃力、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。重錘衝撃力波形に関しては、図ー6のフランジ端部載荷時の場合と類似な性状を示しており、載荷位置に著しく影響されないことがわかる。

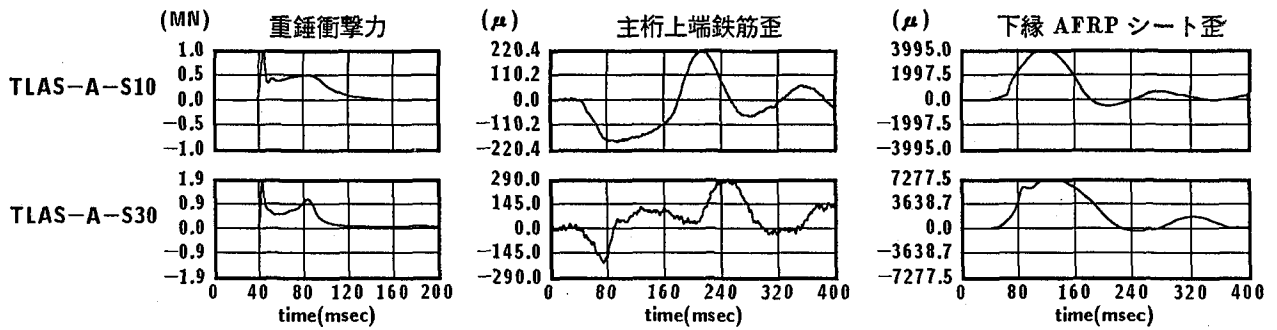


図-7 重錘衝撃力、載荷点直下の主桁上端鉄筋歪およびAFRPシートの歪波形

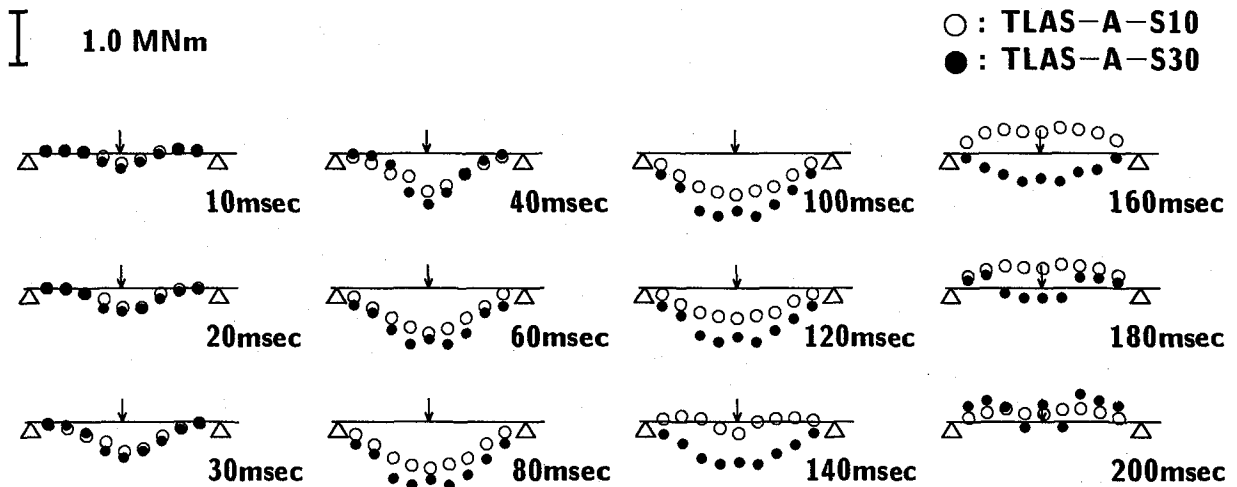


図-8 曲げモーメント分布の経時変化

一方、載荷点直下の主桁歪波形を見ると、落下高さが $H = 10\text{ m}$ である S10 の場合には立ち上がりから約 140 msec 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 $H = 30\text{ m}$ である S30 の場合におけるリバウンドは約 160 msec 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 $H = 30\text{ m}$ (S30) 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かなり安全側の値となっているものと推察される。

3) 主桁の曲げモーメント分布

図-8 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 AFRP 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 msec 前後経過した時点で発生しており、落下高さ $H = 10\text{ m}$ 、 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) AFRP シートの歪分布性状

図-9 には TLAS-A-S10/30 における AFRP シートの歪分布の経時変化を比較して示している。図より、TLAS-A-S10 の場合は中央部全スパン長の約 1/2 の領域で歪が出現している、一方、S30 の場合は重錘の落下高さが $H = 30\text{ m}$ と大きくなったことより、中央部全スパン長の約 3/5 領域で大きな値となっている。これは、歪が断面内で高さ方向に線形分布しているものと仮定すると、これらの領域で桁下縁にひび割れが発生し桁の変形曲率が大きくなったことを意味しているものと考えられる。しかしながら、いずれの歪分布に関しても大きな乱れが示されていないことより、シートの剝離は発生せず、効

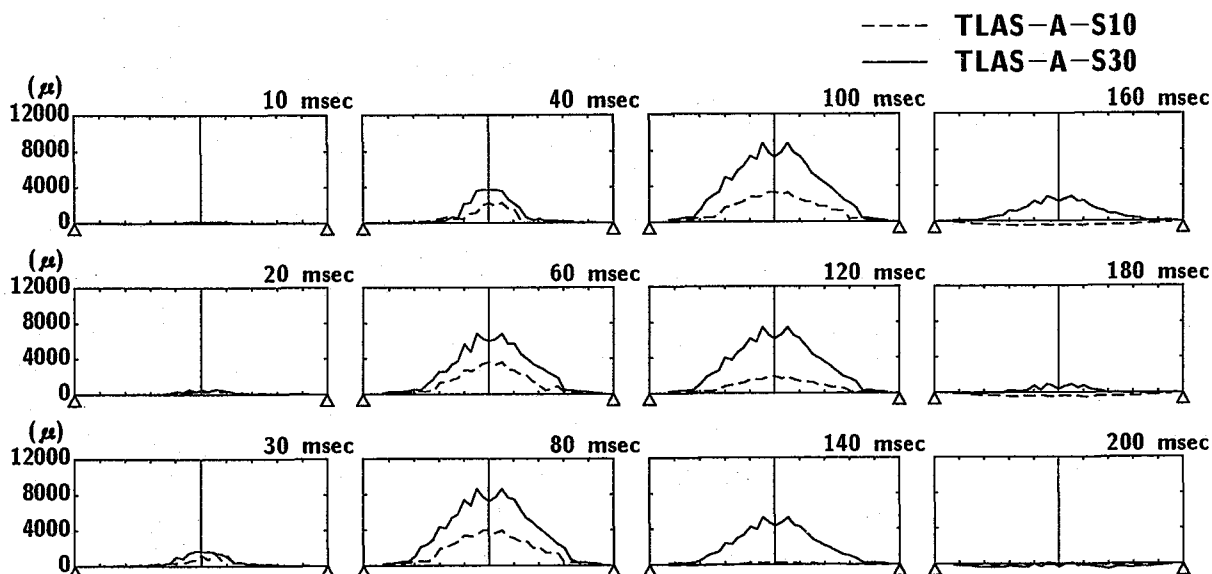


図-9 AFRP シートの歪分布の経時変化

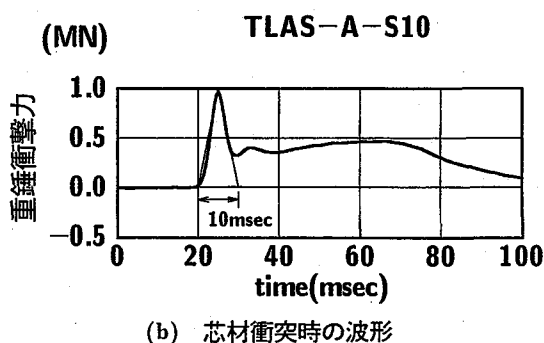
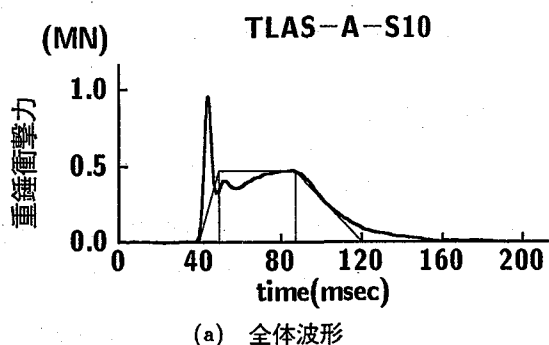


図-10 重錘衝撃力および伝達衝撃力波形分布

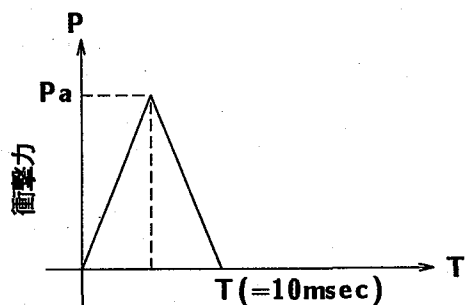


図-11 作用衝撃力波形分布

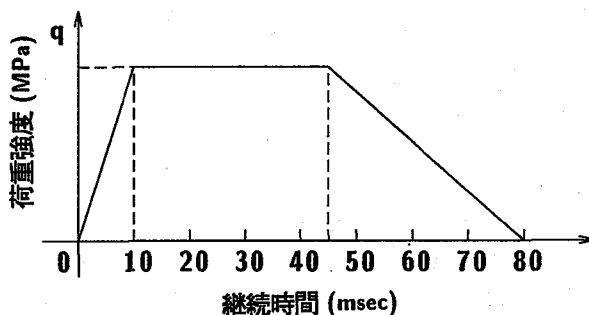


図-12 伝達衝撃力波形分布

率的に主桁を曲げ補強していることがわかる。また、最大発生歪は 85 msec 経過後の 8,000 μ 程度である。シートの破断歪が 20,000 μ 程度であることを考慮すると、破断に対して未だ十分な安全余裕度を有しているものと判断される。

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は、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。TLAS-A-S30 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とより、ここでは落下高さが $H = 10$ m の場合である TLAS-A-S10 の実験結果を用いて評価するものとする。

図-10には TLAS-A-S10 における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 msec で時間的に二等辺三角形分布の分布を示している。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-11に示すように継続時間が $T = 10 \text{ msec}$ 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 7) の考え方によって概算評価すると、TLAS-A-S10/S30 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-10(a)の全体波形に基づいて、図-12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、TLAS-A-S30 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 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-11、図-12 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、フランジ部裏面のウレタン樹脂吹き付け、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、本補強設計法の妥当性を検討したものである。また、各補強工法による耐衝撃性向上効果のメカニズムを明らかにするため、実験結果の詳細な検討も行っている。本研究により得られた知見を取りまとめると、

主桁フランジ端部載荷実験より、

- (1) ウレタン樹脂をフランジ部裏面に吹き付けることによりコンクリート片の剥落を効率的に抑制することが可能である。

- (2) TLAS の設置により衝撃荷重の荷重分散効果と緩衝効果が顕著に現れ、フランジ部の損傷を大幅に軽減することができる。

- (3) TLAS の設置とウレタン樹脂の吹き付け工法を併用することにより、フランジ部の耐え得る入力エネルギーが 15 倍程度向上した。

主桁部載荷実験より、

- (4) 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 桁は想定エネルギーが作用した場合においても十分に健全である。
- (5) 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動的挙動に対応した衝撃応答解析が可能となる。
- (6) TLAS の設置を条件に前述の評価手法を用いて断面力を概算し、AFRP シートを用いて主桁を曲げ補強することによって、この種の構造物の合理的な耐衝撃補強設計が可能である。

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) 土木学会：コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像 -性能照査補強設計指針 (試案)-，1998。
- 3) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会 報告書 (II)，1998。
- 4) 佐藤昌志，西 弘明，三上 浩，岸 徳光：アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の静的耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 2，pp. 1451-1456，1996。
- 5) 松岡健一，岸 徳光，佐藤昌志，三上 浩：水平衝撃荷重載荷による大型 RC 橋脚模型の破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 2，pp. 857-862，1996。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 岸 徳光，三上 浩，佐藤昌志，栗橋祐介：FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1399-1410，1999。

(1999 年 9 月 17 日受付)