

I - 3

斜め落石荷重作用時における覆道頂版部の衝撃挙動

室蘭工業大学	正 員	松 岡 健 一
開発土木研究所	正 員	佐 藤 昌 志
開発土木研究所	正 員	今 野 久 志
室蘭工業大学	学生員	池 田 泰 博

1. はじめに

現在我が国では、山岳部や海岸線における道路上での落石災害を防止するため、落石覆道が多く建設されている。落石覆道にはさまざまな様式のものがあるが構造形式などから判断すると、鉄筋コンクリート (RC) 製、プレストレストコンクリート (PC) 製、鋼製の3種類に分類される¹⁾。これらの覆道は、周囲の環境や想定される落石の規模などにより、その建設現場に最も適したものが採用されるのが一般的である。落石覆道の設計は落石の規模、落下高さ、入射角度を想定した上で落石対策便覧²⁾によって行われている。落石による衝撃が落石覆道におよぼす影響は、多くの場合垂直落下時が最大となることが予想されるため設計にあたっては、垂直落下時の衝撃力を採用している。しかし落石対策便覧には、地形条件により斜め落石を受ける可能性が高い覆道や頂版部が片流れである覆道等の為に、斜め落石荷重に対する取扱いも規定されている。これによれば、斜め落石荷重に対しては成分を考慮して解析することになっている。しかしながら、これを実験により確認した研究は、これまであまり行われていない。

本論文では、落石覆道の一つである PC 覆道を対象として斜め落石荷重作用時の挙動を検討することを目的として、覆道頂版部をモデルとした試験体に対して衝撃実験を行った。一般に PC 製覆道はプレキャスト部材を用いて組み立てることが可能であり、施工面での自由度が高いことが有利な点である。構造上の特徴は、頂版接合部および基礎部の支点条件の選択肢が多く、地盤条件、供用場所の環境条件に対して構造形式選定の幅が広いことである。施工面では、覆道に使われる要素を工場生産し、現地で組み立てることにより施工期間が短くなり、供用中の道路でさえ工事が可能となる。また覆道に何らかの損傷が生じた場合の修復も、部分取り替えが可能であるため容易に修復が可能となる。このような理由から本論文では、PC 多主桁構造からなる覆道頂版に対して斜め落石荷重が作用する場合の挙動を実験的に検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

図-1に実験の概略図を示している。実験では PC 桁を3本用い、これに横締めを行い PC 覆道頂版部を構成した。桁は全長が6m、頂版幅約1.5m、桁高0.65mの単純T型断面である。実験では落石荷重の入射角そのものを精度良く与えることは困難であることから、試験体の片側の支点の高さを調節し PC 桁に傾斜角度を付け、これに重錘を垂直落下させることにより主桁への斜め落石荷重とした。なお桁に与えた傾斜角度は0、7.5、15度の3種類である。桁への衝撃荷重は5tfの重錘を所定の高さより自由落下させることにより与えてい

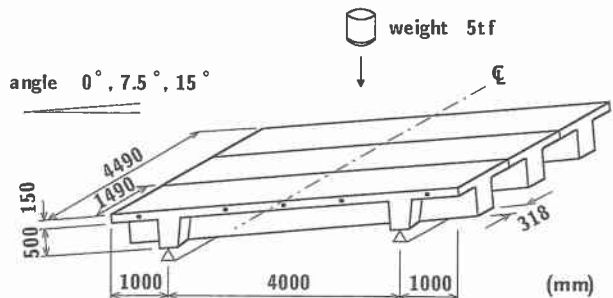


図-1 実験概略図

Impact behavior of rock-sheds' roof under oblique falling load

by Ken-ichi MATSUOKA, Masashi SATO, Hisashi KONNO, and Yasuhiro IKEDA

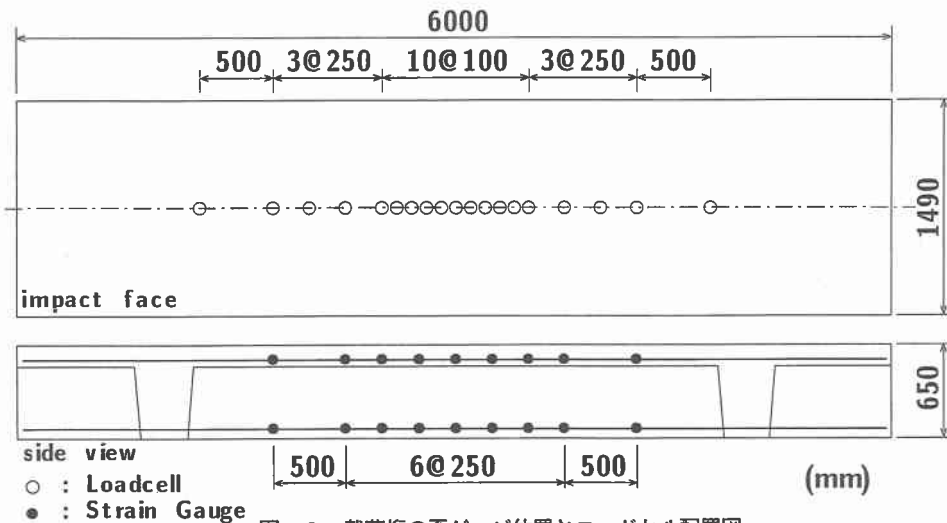


図-2 載荷桁の歪ゲージ位置とロードセル配置図

る。重錘は直径が 1 m、高さが 0.97 m で底部の高さが約 0.18 m の球形（半径 0.80 m）状である。また緩衝材の影響も検討するため従来からの緩衝材である敷厚 90 cm の敷砂緩衝材と著者等によって提案されている三層緩衝構造を用いた。この緩衝構造は、下層から 50 ～ 100 cm 程度の EPS 材（発泡スチロール材）、芯材が 20 ～ 30 cm の RC 版、上層が 50 cm 程度の敷砂から構成されるものであり、剛基礎上や実覆道を用いた実規模の緩衝性能に関する実験結果^{3)～5)}を基にその設計法も提案され⁶⁾、実構造への適用もされて

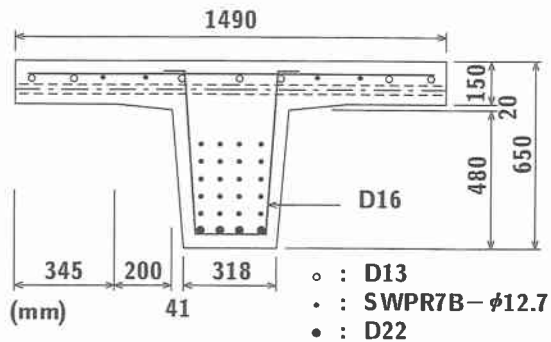


図-3 PC 桁断面

いる。また今回の実験での測定項目は、PC 桁内上下縁配力筋歪、重錘加速度、伝達衝撃力および片側支点の応答反力である。各応答波形は、データレコーダを用いて一括収録し、実験終了後に A/D 変換を行い、ワークステーションを用いて処理している。測定された桁内各応答歪は、断面寸法、PC 鋼材量、補強筋量およびプレストレス導入力を考慮し、断面分割法を用いて曲げモーメントに換算している。

2.2 PC 桁および断面特性

図-2 には、載荷桁の歪ゲージ添付位置と衝撃荷重用ロードセルの設置状況を示している。

衝撃荷重用ロードセルは、載荷桁にのみ設置し、衝撃力が集中すると考えられる桁中央部にロードセルを密に配置しており中央点から左右対称に総計 19 点設置している。ロードセルは全て同一の型式のものを用いており、衝撃力を受けとめる受圧面は円形、面積は 8.04 cm²、容量 1000 kgf のものを使用している。

図-3 に本実験に用いた PC 桁の断面図を示している。コンクリートの設計基準強度は 600 kgf/cm² とし弾性係数は 3.5×10⁵ kgf/cm² としたが、実際のコンクリート強度は材令 28 日で 714 kgf/cm² であった。また PC 桁の断面は頂版幅 149 cm、頂版厚 15 cm、ウェブ幅 31.8 cm、桁高 65 cm、断面積 4078.2 cm² の単純 T 型断面である。プレストレスの導入には、PC 鋼線 SWPR7Bφ12.7 を 24 本使い、PC 鋼線 1 本当たりの緊張力は 11056 kgf/本となっている。導入されたプレストレス力によって、主桁中央部の上縁お

よび下縁には、それぞれ 13.1 kgf/cm² , 137.2 kgf/cm² の圧縮応力が発生している。また補強筋には D22 を用いている。

2.3 実験ケース

表－1 に本実験で行った実験ケース一覧を示している。表中の実験ケースの内容は、“緩衝構造の種類－落下高さ(m)－傾斜角度”を意味している。また S90 は、敷厚 90 cm の敷砂緩衝材を意味し、TLAS (Three-Layered Absorbing System) は、三層緩衝構造を意味する。今回は 0 ,

7.5 , 15 度の 3 種類の角度を採用し、それぞれの角度において 3 パターンの載荷方法で実験を行った。載荷の手順は、まず敷砂 90 cm の緩衝材に対して重錘落下高さ 2.5 m , 5.0 m の実験を行い、その後緩衝材を TLAS に換えて落下高さ 20 m の実験を行うものである。重錘は、全てのケースにおいて 5 tf のものを使用し、中央の桁に落下させている。

表－1 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝構造の厚さ (cm)			落下高さ (m)	傾斜 角度
	敷砂	RC 床版	EPS 材		
S90-2.5-0	90	—	—	2.5	0
S90-5.0-0	90	—	—	5.0	
TLAS-20-0	50	20	50	20	
S90-2.5-7.5	90	—	—	2.5	7.5
S90-5.0-7.5	90	—	—	5.0	
TLAS-20-7.5	50	20	50	20	
S90-2.5-15	90	—	—	2.5	15
S90-5.0-15	90	—	—	5.0	
TLAS-20-15	50	20	50	20	

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力、伝達衝撃力および支点反力に及ぼす入射角の影響

表－2 に本実験で得られた各衝撃力および支点反力の値を示している。ここで重錘衝撃力は、重錘底部に埋設した加速度計で測定された最大加速度に重錘質量を乗じて算出したものであり、伝達衝撃力は、桁表面に埋設したロードセルによる応力を載荷桁の載荷全面積で集計したものである。伝達衝撃力の評価はこれまで軸対称応力分布を仮定して行っていたが、本実験では傾斜角の影響もあり、ロードセル応力が軸対称分布とはなっていないことから載荷桁に限定して評価する方がより適切と判断した。

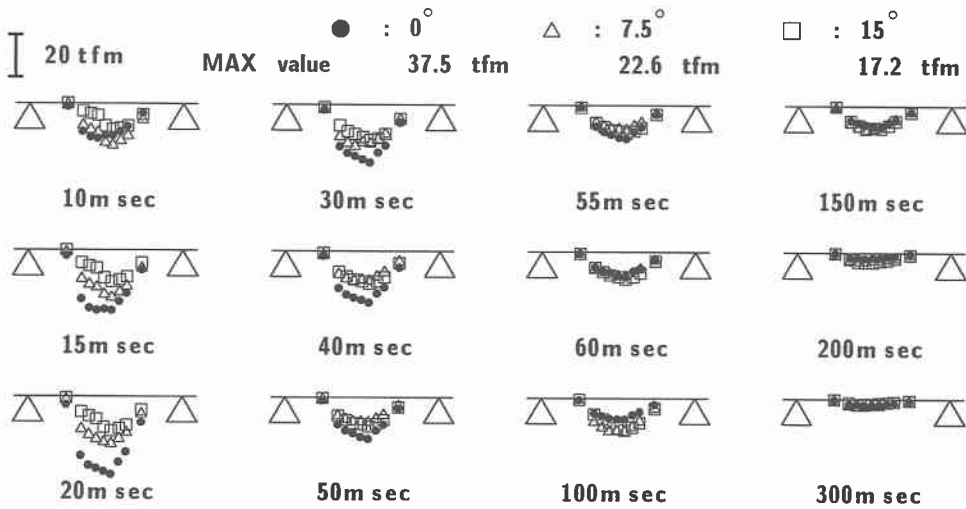
重錘衝撃力について考察すれば、いずれの実験ケースも傾斜角の増大に伴って衝撃力は減少する傾向を示している。本来、重錘衝撃力は緩衝材の種類や桁の傾斜角度などには一切影響を受けず重錘質量と落下高さで決定されるものである。しかし重錘が実際に傾斜のある覆道頂版に落下すると、緩衝材に衝突後、重錘自身に横転や移動等が起こる。このことが衝撃力減少の原因であると考えられる。

一方、伝達衝撃力には、各ケースで一定の傾向がなく傾斜角の影響は示されていない。伝達衝撃力測定用のロードセルは前述したように桁表面に埋設しており、伝達衝撃力の桁垂直成分を測定しているものと考えられる。しかしながら、重錘の落下エネルギーは各ケースで一定であり、傾斜角も最大 15 度であり、その垂直成分は 0.966であることを考慮すれば当然と考えられる。重錘加速度から算定した衝撃力は、前述のように傾斜角の影響が示されているようであるが、伝達衝撃力の値はこれを否定しており落石の落下エネルギーは十分頂版部へ伝達されていると考えられる。

伝達衝撃力に対する鉛直支点反力の割合は、敷砂緩衝材では、約 20 ～ 30 % で傾斜角の増大とともに減少する傾向にある。桁に生ずる鉛直反力は、衝撃荷重による桁の応答特性と密接に関連しており衝撃力の波形や継続時間等の波動特性が影響していることからこのような結果が示されたと考えられる。これに対して三層緩衝構造におけるその割合は、約 40 ～ 60 % であり、傾斜角による一定の傾向は見られない。本実験では、斜め落石荷重を再現するため PC 桁に傾斜角度を与えてはいるが、重錘による衝撃力の方向としては基本的に垂直である。このような場合には、理論上では、水平方向反力は発生しないと考えられるが、実際には、衝撃載荷による桁の振動等が発生するため、水平設置の場合でも僅かながら水平反力が生じている。

表－2 実験結果一覧

実験ケース	傾斜角度 (度)	重錘衝撃力 (tf)	伝達衝撃力 (tf)	鉛直反力 (tf)	鉛直/伝達	水平反力 (tf)	水平/伝達
S90-2.5m	0	58	93	31	0.33	4	—
	7.5	39	93	18	0.19	11	0.12
	15	30	67	11	0.16	13	0.19
S90-5.0m	0	85	137	41	0.30	5	—
	7.5	83	181	43	0.24	9	0.05
	15	78	154	31	0.20	39	0.25
TLAS-20m	0	241	114	72	0.63	7	—
	7.5	218	145	61	0.42	19	0.13
	15	189	121	55	0.45	44	0.36



図－4 数砂 90 cm - 落下高さ 2.5 m に関する断面力の経時変化

また、桁に角度がある場合の水平反力は、傾斜角の増大とともに大きくなっている。各傾斜角での伝達衝撃力に対する水平反力の割合は、多少のばらつきはあるものの、7.5 度傾斜では、ほぼ 10 %，15 度傾斜では、ほぼ 25 % となっている。これは、それぞれ伝達衝撃力の桁軸方向成分、 $\sin 7.5^\circ = 0.13$ ， $\sin 15^\circ = 0.26$ とほぼ一致する。水平反力用ロードセルと桁端部の接触状態から、本実験で測定した水平反力は桁軸方向の反力を測定しているものと考えられる。従って斜め入射載荷では、桁軸方向の衝撃力成分が発生していることが確認され、このことから落石対策便覧に示されているように成分を考慮して設計することは妥当であると考えられる。

3.2 中央桁の曲げモーメント分布の経時変化

各実験ケースに対して中央載荷桁の鉄筋歪から算定した曲げモーメント分布の経時変化を図－4～6に示す。図では、地面に対する桁の傾斜角度 0 度の場合を●印、7.5 度の場合を▲印、15 度の場合を□印で表している。

a) 数砂 90 cm - 落下高さ 2.5 m の場合

図－4 に数砂 90 cm，落下高さ 2.5 m の場合の載荷桁の曲げモーメント分布の経時変化を示している。図より、このように落下高さが低い場合には、傾斜角度の増加により曲げモーメントが軽減される傾向にある

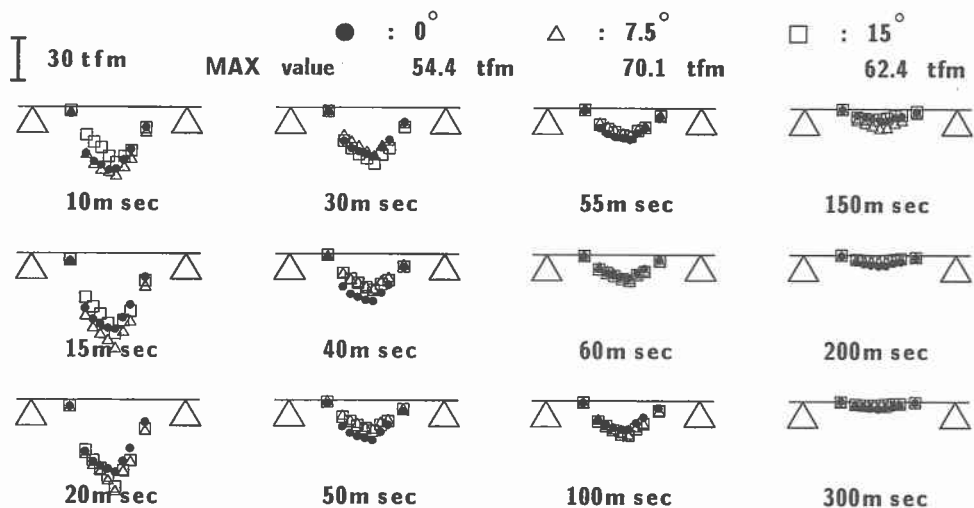


図-5 敷砂 90 cm - 落下高さ 5.0 m に関する断面力の経時変化

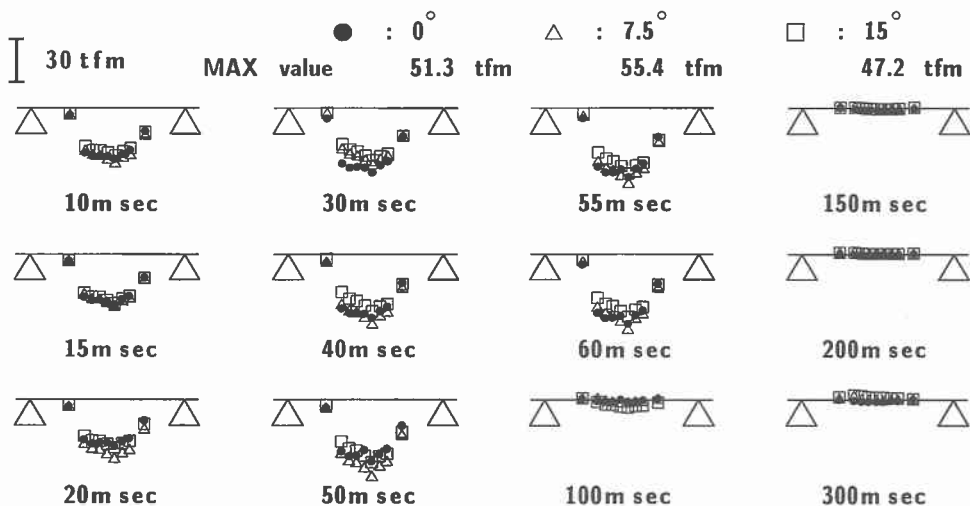


図-6 三層緩衝構造 - 落下高さ 20 m に関する断面力の経時変化

ことが分かる．最大値で比較すると傾斜角度 0 度と 7.5 度では，同じ入力エネルギーにもかかわらず，7.5 度時の曲げモーメントの値 (22.6 tfm) が 0 度時 (37.5 tfm) の約 60 % の値となっている．同様に 0 度と 15 度の比較では，15 度時の値 (17.2 tfm) が 0 度時 (37.5 tfm) の約 46 % となっており角度が大きくなるほど曲げモーメントが小さくなっている．この傾向は重錘衝撃力と同じであり，伝達衝撃力の傾向とは異なるが，この場合のこれらの対応関係については今後検討が必要である．

b) 敷砂 90 cm - 落下高さ 5.0 m の場合

敷砂 90 cm，落下高さ 5.0 m の場合の載荷桁の曲げモーメント分布の経時変化を図-5 に示している．図からいずれの曲げモーメント図も，桁中央部の値が大きく，端部に向かって直線的に小さくなり集中荷重的な衝撃応答を表していることが分かる．この原因の 1 つに敷砂材の衝撃力分散効果が低いことが挙げられる．

a) に示すように，衝撃力が小さな場合はこのような傾向が少ないが，衝撃力が大きくなるに従いこの現象

が見られるようになる。また S90-5m における 0, 7.5, 15 度の 3 種類のケースの曲げモーメント値や、最大応答の発生時間 (約 17 msec) 等がほとんど同じであることから角度による影響はほとんどないと考えられる。

c) 三層緩衝構造 - 落下高さ 20 m

図-6 には、三層緩衝構造、落下高さ 20 m の場合の載荷桁の曲げモーメント分布の経時変化を示している。大きな特徴は、三層緩衝構造の高分散効果により曲げモーメントが分布荷重を受けたような性状を示していることである。最大値発生時間に着目すると 47 ~ 55 msec と敷砂緩衝材に比べ非常に遅く、応答の継続時間が S90-5m の約 2.5 倍程長くなっている。また各実験ケースの曲げモーメントの最大値を比較すると全てのケースで約 50 tfm となっており、ほとんど同値を示している。これらのことから三層緩衝構造の場合も落石による入力エネルギーが大きい場合には、桁に発生する曲げモーメントは、この程度の傾斜角の変化では角度の影響をあまりを受けないことが分かる。

このように落下高さが低い場合すなわち落下エネルギーの小さな場合には、各種衝撃力、鉛直支点反力、桁曲げモーメントとも全て、傾斜角の増大に伴って減少の傾向にあるが、大きな落下エネルギーに対しては傾斜角の影響は明らかではない。本実験での傾斜角が小さいことを考慮すれば後者の現象は理解出来るが、落石エネルギーの小さい場合の結果も含め、今後さらに検討する必要があると思われる。

4. まとめ

斜め落石荷重を受ける PC 覆道の応答性状におよぼす入射角の影響を実験的に検討することを目的として、3 本の PC 多主桁からなる PC 覆道頂版模型を用いて重錘落下衝撃実験を行った。

本実験で得られた結果を要約すると、次のように示される。

- 1) 同一落下高さでも、水平に対する桁の角度が大きいほど測定された重錘衝撃力は減少する傾向にある。
- 2) 覆道頂版上に作用する伝達衝撃力と桁の傾斜角度との間には一定の関係は見い出されなかった。
- 3) 斜め載荷を受ける場合の覆道頂版に作用する桁軸方向の力は、桁の角度の増大に伴い大きくなることが確認された。
- 4) 桁の応答断面力は、入力エネルギーが小さい場合は角度による影響を多少受けるが、実際の落石のように大きな入力エネルギーでは落石荷重の角度に影響されず、むしろその値は緩衝材の種類と入力エネルギーに大きく依存する。

本論文をとりまとめるに当たり、室蘭工業大学の岸徳光助教授をはじめ、構造力学研究室の大学院生、学部生に多大の協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，pp.151~246，1994.1.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.
- 3) 中野修，今野久志，岸徳光，三上浩，速藤紘：各種緩衝構造を用いた落石覆工の実証実験，第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.230~235，1993.6.
- 4) 三上浩，岸徳光，佐藤昌志，中野修，松岡健一：AFRP 補強 RC 版を芯材とする三層緩衝構造体の緩衝性能に及ぼす表裏面材の影響，構造工学論文集，Vol.40A，No3，pp.1639~1646，1994.3.
- 5) 岸徳光，佐藤昌志，中野修：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1257~1265，1995.3.
- 6) 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.