

I-23

斜め落石荷重を受ける PC 多主桁の衝撃载荷実験

北海道開発局	○正 員	西 弘 明
室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
北海道開発局	正 員	佐 藤 昌 志
北海道開発局	正 員	今 野 久 志

1. はじめに

落石防護工としての落石覆道は、土圧、地震力等の外力と合わせて落石等の衝突による衝撃力を考慮して設計されている。通常、落石による衝撃力は垂直落下時が最大となることから、垂直自由落下を想定して設計されることが多いが、地理条件によっては斜め落下となる場合もある。落石対策便覧では、このような斜め落石が想定される場合には落石衝撃力の作用成分を考慮して設計することとしている¹⁾。しかしながら、この考え方に基づく設計法に関する安全性の実験的な検討はほとんど行われていない。

以上の観点から、昨年度、著者らは PC 落石覆工の頂版部を模した PC 多主桁を用い、斜め入射および片流れ頂版に対する落石衝撃力の影響を大型模型実験により検討した²⁾。この場合、斜め入射载荷の方法として、PC 多主桁の片側支点部の高さを調節し、PC 多主桁本体を傾斜させる方法を採用した。この方法は主として片流れ構造の落石覆工への落石衝撃力の影響を検討するのに適しており、一定の成果を得た。しかしながら、斜面からの落石など、衝撃力が角度を持って作用する場合とは多少異なることも考えられるため、本研究では、落石そのものに落下角度を与えることにより斜め载荷を実現する方法を採用した。試験体は昨年度と同様、PC 落石覆工の頂版部を模した PC 多主桁とし、落石荷重の入射角を変化させた衝撃実験を行い、衝撃力、支点反力、PC 桁の曲げモーメント分布に着目し、入射角の影響を検討した。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

図-1 に実験状況の概略図を示している。実験で用いた PC 桁は 3 本であり（昨年度行った実験で用いたものと同様である）、载荷桁 1 本の挙動を把握できるよう横締めは行っていない。図に示すように、斜め入射衝撃力は重錘に支持を取り付け、これを傾斜したガイドレールに沿って自由に滑動させ、PC 桁上に設置された緩衝構造に衝突させることで与えている。ガイドレールは、重錘の軌道直線が桁の中心に一致するように調節し、斜め入射衝撃力を精度良く与えられるように工夫している。用いた重錘は、直径が 1 m、重量が 19.6 kN、49.0 kN のものである。また、緩衝構造として、厚さ 90 cm の敷砂材、厚さ 50 cm の発泡スチロール材 (EPS) 及び三層緩衝構造（表層厚 50 cm の敷砂、芯材 20 cm 厚の RC 床版、裏層厚 50 cm の EPS 材）の 3 種類を採用した。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、および鉛直方向、水平方向の応答反力である。

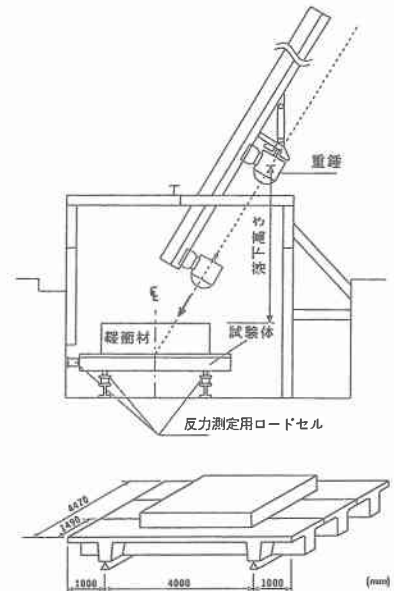


図-1 実験概略図

Impact test of multi PC beams under oblique falling load
by Hiroaki NISHI, Norimitsu KISHI, Masasi SATO, Hisasi KONNO

2.2. PC 桁及び断面

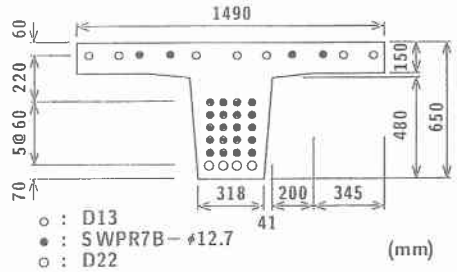
図－2 に本実験に用いた PC 桁の断面図を示している．使用したコンクリートの平均圧縮強度は材令 28 日で 70 MPa，弾性係数 39.2 GPa であった．また PC 桁の断面は頂版幅 149 cm，頂版厚 15 cm，ウェブ幅 31.8 cm，桁高 65 cm，断面積 4078.2 cm² の単純 T 型断面である．プレストレスの導入には，PC 鋼より線 SWPR7B ϕ 12.7 を 24 本用い，PC 鋼より線 1 本当たりの緊張力は 108.4 kN/ 本となっている．また，導入されたプレストレス力によって，主桁中央部の上縁および下縁には，それぞれ 1.3 MPa，13.5 MPa の圧縮応力が発生している．なお，補強筋には D22 を用いている．

図－3 に载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，载荷桁にのみ設置し，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を用い，衝撃力を受けとめる受圧面は円形，面積が 8.04 cm²，容量 9.8 kN のものを使用している．

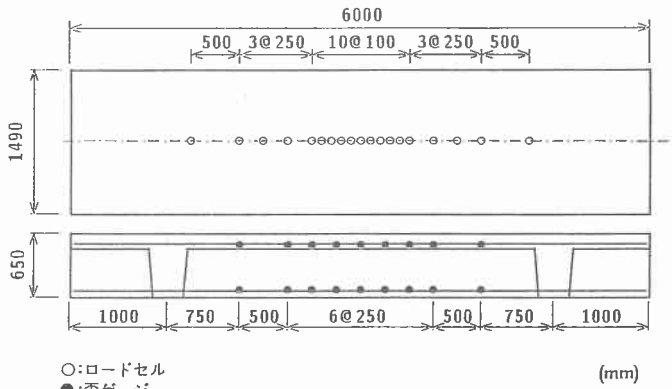
2.3. 実験ケース

表－1 に本実験で行った実験ケースの一覧を示している．実験は，落下高さ，緩衝構造，入射角度をそれぞれ変化させて行った．また，実験ケースの内容は”緩衝構造の種類－重錘重量 (tf)－落下高さ (m)

－入射角度 (度)”を表し，緩衝構造の種類における S90 は敷厚 90 cm の敷砂緩衝構造，EPS50 は 50 cm の EPS 緩衝構造，TLAS は前述の三層緩衝構造 (Three-Layered Absobing System 以下 TLAS) を意味している．



図－2 PC 桁断面図



図－3 歪ゲージおよびロードセル位置

表－1 実験ケースの一覧

実験ケース	緩衝構造の厚さ (cm)			重錘重量 (kN)	落下高さ (m)	入射角度 (度)
	敷砂	RC 床版	EPS 材			
S90-2-2.5-45	90	—	—	19.6	2.5	45°
S90-2-5.0-45	90	—	—		5.0	
EPS50-2-2.5-45	—	—	50		2.5	
TLAS-5-10.0-45	50	20	50	49.0	10.0	60°
S90-2-2.5-60	90	—	—	19.6	2.5	
S90-2-5.0-60	90	—	—		5.0	
EPS50-2-2.5-60	—	—	50		2.5	
TLAS-5-10.0-60	50	20	50	49.0	10.0	
S90-2-2.5-75	90	—	—	19.6	2.5	75°
S90-2-5.0-75	90	—	—		5.0	
EPS50-2-2.5-75	—	—	50		2.5	

表－２ 実験結果

実験ケース	入射角度	重錘衝撃力 (kN)	伝達衝撃力 (kN)	鉛直反力 1 (kN)	鉛直反力 2 (kN)	水平反力 (kN)	最大曲げ モーメント (kNm)	発生時刻 (msec)
S90-2-2.5	45°	159.8 (1.0)	264.8 (1.0)	65.7 (1.0)	136.3 (1.0)	33.2	124.5 (1.0)	53.8
	60°	240.3 (1.5)	431.5 (1.6)	82.4 (1.3)	233.4 (1.7)	1.3	169.7 (1.4)	32.6
	75°	339.3 (2.1)	784.5 (3.0)	155.9 (2.4)	309.9 (2.3)	12.2	296.2 (2.4)	32.0
S90-2-5.0	45°	250.1 (1.0)	500.1 (1.0)	106.9 (1.0)	192.2 (1.0)	50.5	187.3 (1.0)	39.4
	60°	426.6 (1.7)	529.6 (1.1)	161.8 (1.5)	448.2 (2.3)	14.9	358.9 (1.9)	24.6
	75°	535.4 (2.1)	1157.2 (2.3)	204.0 (1.9)	533.5 (2.8)	14.3	639.4 (3.4)	22.6
EPS50-2-2.5	45°	181.4 (1.0)	323.6 (1.0)	77.5 (1.0)	123.6 (1.0)	32.1	152.0 (1.0)	93.4
	60°	220.7 (1.2)	333.4 (1.0)	85.3 (1.1)	148.1 (1.2)	28.7	173.6 (1.1)	81.0
	75°	254.0 (1.4)	529.6 (1.6)	110.8 (1.4)	171.6 (1.4)	32.4	211.8 (1.4)	75.8
TLAS-5-10.0	45°	952.2 (1.0)	411.9 (1.0)	180.4 (1.0)	326.6 (1.0)	182.5	274.6 (1.0)	70.4
	60°	1033.6 (1.1)	480.5 (1.2)	184.4 (1.0)	405.0 (1.2)	135.1	329.5 (1.2)	48.8

3. 実験結果及び考察

3.1. 重錘衝撃力、伝達衝撃力及び支点反力について

表－２に本実験で得られた各衝撃力、支点反力および発生曲げモーメントの最大値を示す。ここで重錘衝撃力は重錘に埋設した加速度計により測定された最大加速度に重錘重量を乗じて算出したものである。伝達衝撃力は載荷桁に埋設したロードセルから得られた応力の分布より、比較的衝撃力の分散効果の小さい S90、EPS50 については、最大応力の発生する点から左右の応力を平均したものを軸対称分布として算出し、分散効果の大きい TLAS については、本実験では桁の横締めを行っていないことより、ロードセルにより測定された応力を載荷桁の載荷全面積で集計した。また、鉛直支点反力 1 は図－１における左側の支点を、鉛直支点反力 2 は右側の支点の反力の最大値を表している。最大曲げモーメント発生時刻については、重錘が緩衝材に衝突し、加速度計の波形が励起された時刻を 0 msec として求めている。なお、表中の () 内の数値は各ケース 45° 入射の実験値に対するそれぞれの値を無次元化したものである。

表より、衝撃力については、それぞれのケースにおいて入射角度の増大とともに各衝撃力が増加する傾向にあることがわかる。しかしながら、EPS50、TLAS を用いた場合にはその増加割合が比較的小さく、入射角度による影響が少なくなっていることが分かる。この場合の重錘衝撃力が重錘の落下エネルギー鉛直成分を示しているものと仮定すれば、45° 入射に対する 60°、75° 入射の倍率はそれぞれ約 1.23、1.37 である。EPS 材および TLAS は、比較的これに近い値を示しているが、敷砂材に対しては、入射角が大きくなる程この値より大きな値を示しており、入射角の減少により重錘衝撃力は成分比以上の減少を示していることが分かる。これは敷砂材への重錘衝突の機構が複雑なことを示しているものと考えられ、重錘の運動の検討など、より詳細な検討が必要である。また、重錘衝撃力と伝達衝撃力を比較すると、敷砂材および EPS 材では伝達衝撃力が重錘衝撃力のほぼ 2 倍程度、TLAS ではほぼ 1/2 程度であり、この倍率に及ぼす入射角度の影響は少ないものと判断される。

支点反力については、鉛直反力 1 に対して鉛直反力 2 の方が 1.5～2.8 倍程度大きく発生し、その割合は緩衝構造に影響されているようである。これは、先に示したように、重錘の斜め落下のためのガイドレールは、重錘の軌道直線が桁中央に一致するように設置してあるため、緩衝構造表面の重錘落下位置は必ずしも中央ではないことに関連していると考えられる。また、両鉛直反力の合計反力値は、いずれのケースも重錘衝撃力と伝達衝撃力の間にあることを示している。水平反力については EPS50 を用いた場合は入射角度による影響は見られずほぼ同様の値を示しているが、その他の緩衝構造では入射角度が大きくなる程減少していくことが分かる。しかしながら敷砂材および EPS 材の場合、水平反力の値はいずれのケースも極小さな値である。一方、他の緩衝構造に比べ TLAS を用いた場合は鉛直反力に対する水平反力の割合が大きく、測定点側では、ほぼそれぞれの成分割合に等しくなっている。

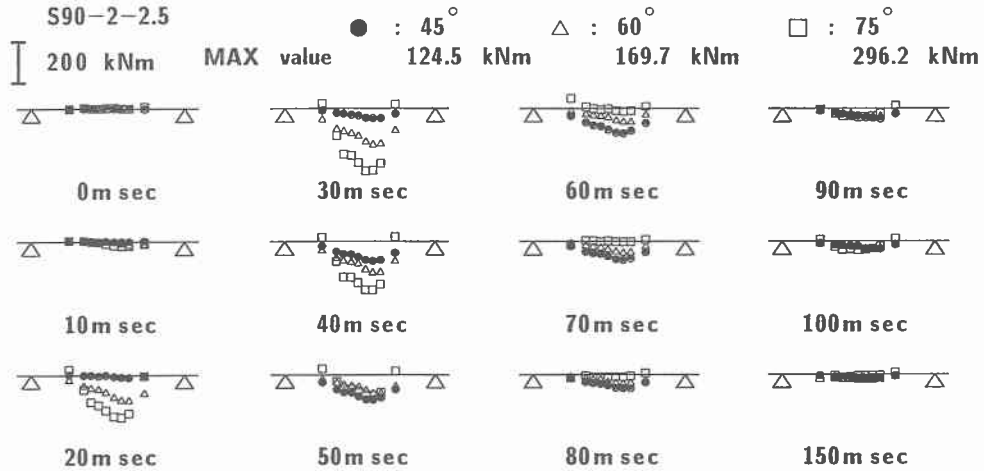


図-4 (a) 曲げモーメント分布の経時変化 (S90-2-2.5)

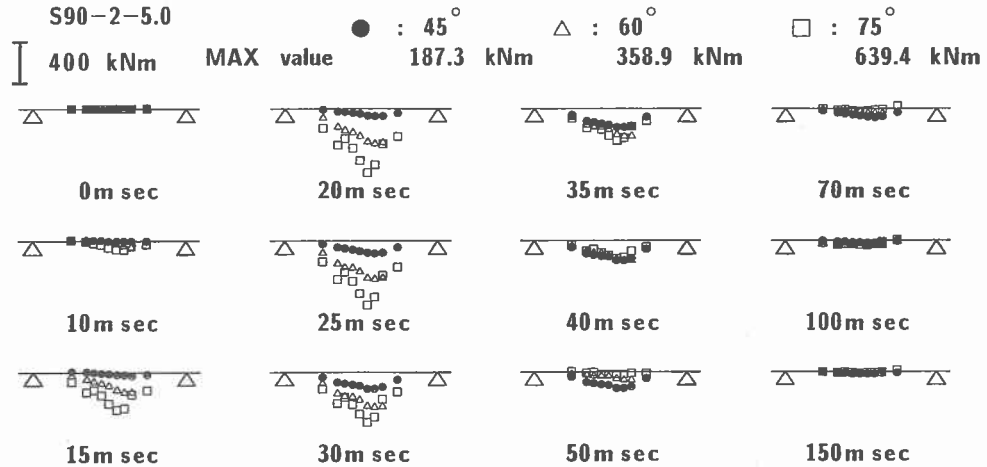


図-4 (b) 曲げモーメント分布の経時変化 (S90-2-5.0)

3.2. 中央桁の曲げモーメント分布

図-4 (a) ~ (d) に各実験ケースに対して中央載荷桁の歪から算出した曲げモーメント分布の経時変化を示している。図では入射角度が 45° の場合を●印, 60° の場合を△印, 75° の場合を□印で示している。

a) S90-2-2.5 の場合

図-4 (a) に敷砂緩衝材 90 cm に対する重錘重量 19.6 kN, 落下高さ 2.5 m の場合の載荷桁の曲げモーメント分布を時系列として示している。いずれの角度の場合も曲げモーメントの最大値の発生位置は中央より少し右支点側にずれている。このずれは、入射角の小さいもの程大きいようである。また、曲げモーメントの最大値も入射角の小さなもの程小さくなっており、角度の影響が明瞭に現れている。最大曲げモーメントの発生する時刻も入射角により異なり、入射角が小さなもの程最大曲げモーメントの発生時刻が遅くなっている。各角度に対する最大値の比は、45 : 60 : 75 = 1 : 1.4 : 2.4 であり、これは合鉛直反力の比 1 : 1.6 : 2.3 と、ほぼ同様の値を示している。

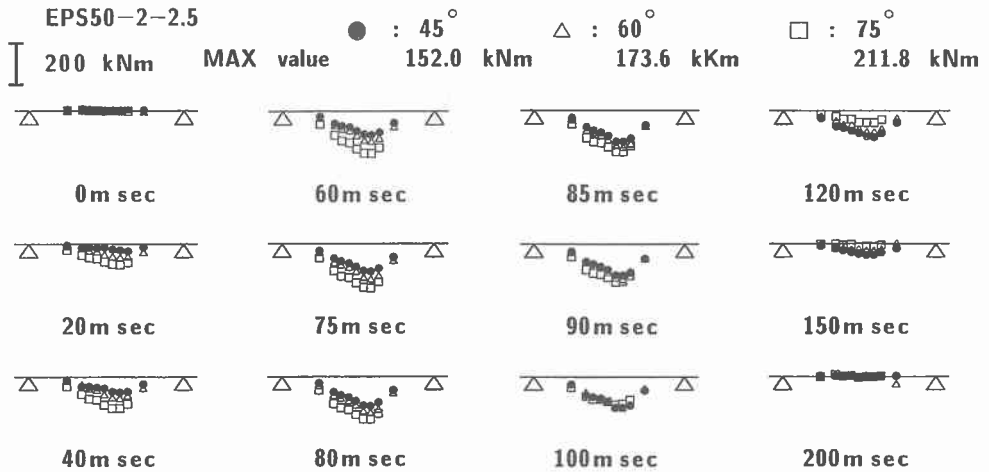


図-4 (c) 曲げモーメント分布の経時変化 (EPS50-2-2.5)

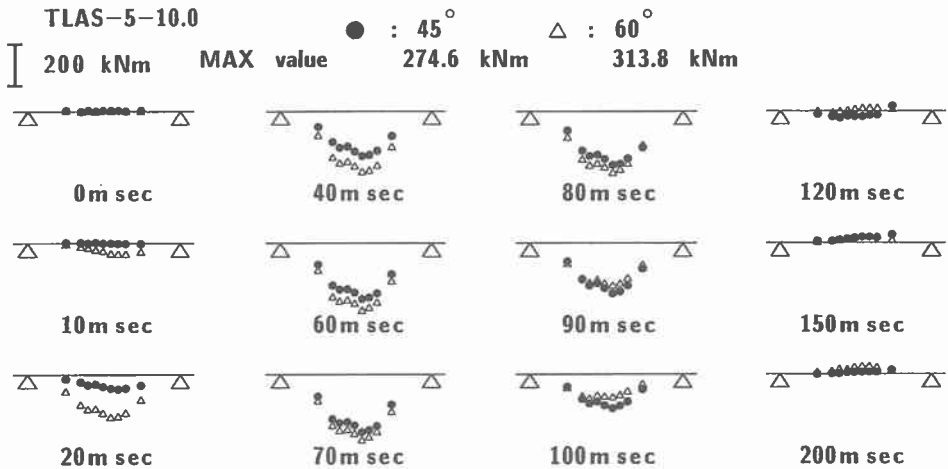


図-4 (d) 曲げモーメント分布の経時変化 (TLAS-5-10)

b) S90-2-5.0 の場合

図-4 (b) に敷砂厚 90 cm, 落下高さ 5 m の場合の結果を示している。最大曲げモーメントの値, 発生位置, 時刻の入射角に対する傾向は 2.5 m 落下の場合とほぼ同様である。すなわち, 入射角の小さなもの程最大値は小さく, 発生位置は右支点側にずれ, 発生時刻は遅くなることが分かる。また, 角度に対する最大値の比は 1 : 1.9 : 3.4 となり, 2.5 m 落下の場合に比べ増加割合が大きくなっており, 合鉛直支点反力割合 1 : 2.0 : 2.5 に比べても, 入射角 75° ではかなり大きくなっている。

c) EPS50-2-2.5 の場合

図-4 (c) に厚さ 50 cm の EPS 材を緩衝材とする場合の結果を示している。EPS 材の場合, 前述のように重錘衝撃力や伝達衝撃力には敷砂材の場合と大差はなく, 曲げモーメント分布についても最大値としてはほぼ同程度である。しかしながら, 最大値の発生時刻は大幅に異なり衝撃力の作用時間が長いことがわかる。最大曲げモーメントの発生位置も多少右支点寄りであるが入射角度による影響は少ない。角度による最大曲

げモーメントの比は 1:1.1:1.4 であり、これは合鉛直反力の比 1:1.2:1.4 とほぼ同様である。

d) TLAS-5-10 の場合

図-4 (d) に三層緩衝構造を用いた重錘重量 49.0 kN、落下高さ 10 m の曲げモーメント分布を示している。この場合の実験結果は入射角度 45° と 60° のケースのみであるが、他の場合と同様に、曲げモーメントの最大値は入射角度の大きなものの方が大きく示されている。また、その差は約 20 % であり、各衝撃力や合鉛直反力の傾向と同様である。また、最大曲げモーメント発生位置はほぼ中央であり、発生時刻は 45° で 70.4 msec、60° で 48.8 msec となっている。このように時系列分布には両者相違がみられるものの最大値に関しては差が少なく、TLAS の場合入射角の影響は少ないようである。

他の緩衝構造と比較すると、TLAS-5-10 の場合は S90-2-2.5 や EPS50-2-2.5 の場合の 10 倍、S90-2-5 の場合の 5 倍の重錘落下エネルギーを有するにもかかわらず、2 倍またはほぼ同程度の最大曲げモーメントであり、斜め入射荷重に対しても TLAS は十分な緩衝性能を有していることがわかる。

4. まとめ

斜め落石荷重が落石覆工の衝撃挙動に及ぼす影響を検討する目的で、PC 落石覆工の頂版部をモデル化した PC 多主桁を対象に斜め落錘実験を行った。実際の落石覆工への斜め落石荷重の多くは斜面上の転石であるから、本実験はこれをモデルとした落錘衝撃載荷装置により入射角度、緩衝構造を変えて行った。本実験で得られた成果をまとめると以下のようになった。

- 1) いずれの実験ケースでも入射角の減少とともに衝撃力および鉛直反力は減少し、水平反力は増大する。
- 2) 緩衝材が敷砂材の場合は、各衝撃力および鉛直反力の入射角による割合は、鉛直成分としての割合とは異なり、角度の影響が大きい。
- 3) 緩衝材が EPS 材および TLAS の場合は、各衝撃力および鉛直反力の入射角による割合は、鉛直成分としての割合とほぼ等しい。
- 4) 鉛直反力と最大曲げモーメントとの関係は、敷砂材の一部を除いて、ほぼ比例関係にある。
- 5) 水平反力は敷砂材および EPS 材ではいずれのケースも極僅かであり入射角による水平成分はほとんど考慮する必要がない程度である。一方、TLAS では、水平反力測定点での鉛直反力との比較ではほぼその成分に見合った値となっている。

以上のことから、現行の入射角による成分割合を考慮した設計指針は安全側と考えられる。しかしながら敷砂材および EPS 材の場合の水平成分の評価は、現行設計指針ではかなりの過大評価になりその妥当性については今後検討が必要と考えられる。

本論文の取りまとめに当たり、室蘭工業大学大学院、建設システム工学科専攻の学生、佐藤大君はじめ、構造力学研究室の学生諸君に多大の御協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，pp16～17，1983
- 2) 松岡 健一，佐藤 昌志，今野 久志，池田 泰博：斜め落石荷重作用時における覆道頂版部の衝撃挙動，土木学会北海道支部論文報告集，第 54 号 (A)，pp12～17，1998.2