

I-30

三層緩衝構造を設置した PC多主桁の衝撃挙動

北海道開発局	正 員	中野 修
室蘭工業大学	正 員	岸 徳光
室蘭工業大学	正 員	菅田 紀之
室蘭工業大学	学生員	佐竹 利治

1. はじめに

山岳地帯や海岸線に沿って山がせまっている地域では、落石等による災害を防止し円滑な交通を確保するために、落石覆工等の建設が行われている。特に落石覆工構造物には、落石等によって生じる衝撃力を直接構造物に作用させないように緩衝工が設置されるのが普通であり、一般に敷砂材が用いられている。また、新しい試みとして、著者等によって砂-RC版-EPSから構成される三層緩衝構造が提案され、理論的、実験的研究が行なわれている^{1),2)}。落石覆工の設計計算は、従来よりラーメン構造と仮定し、衝撃荷重を静的に載荷させて行なっているようである。敷砂による荷重分散効果は小さく、特に大型 PC 覆工の場合にはほぼ桁一本に全衝撃力が載荷される状態に対し設計が行われているようである。従って、落石重量や落下高が増大する場合には実務的に設計不可能になることも考えられる。このため、桁間の荷重分担性能の改善あるいは緩衝構造の改良によって桁に作用する衝撃力の低減、分散化を計ることが肝要であると考えられる。一方、著者らによって開発された三層緩衝構造システムは、大型実験により衝撃力の低減と共に荷重の効率的な分散が計られることが明らかになっている。この特徴は PC 型覆工のように多主桁構造となっている場合に特に有効に作用するものと考えられる。

本論文では、このような観点により PC 型覆工に対する三層緩衝構造の適用性を実証的に明らかにするために、実規模の単純支持された PC 多主桁上に三層緩衝構造を設置して重錘落下による衝撃載荷実験を行い、PC 多主桁の衝撃挙動について検討を行った。本研究では、表層材、裏層材にそれぞれ厚さ 50cm の敷砂および EPS 材、芯材に厚さ 20cm の RC 版を用いた三層緩衝構造を設置し、3tf の重錘を 30m より落下させたときの桁の荷重分担性状や軸方向の曲げモーメントの断面方向や軸方向分布等について検討を行っている。

2. 実験方法

本研究では、純スパン 5m、床版幅が約 120cm の PC 桁より構成される PC 多主桁上に三層緩衝構造を設置し、3tf の重錘（直径 100cm で底部より高さ 17.5cm の部分が球状）を高さ 30m から落下させて実験を行っている。図-1 にこの概略図を示す。載荷実験は 3 桁上に処女載荷を行い、表層の敷砂のみを整地し直して、順次 2 桁、4 桁上に載荷させている。測定項目は、重錘加速度および桁の各補強筋に添付された合計 84 点の歪波形である。各応答波形は、データレコーダを用いて一括集録し、実験終了後に A/D 変換を行って EWS を用いて

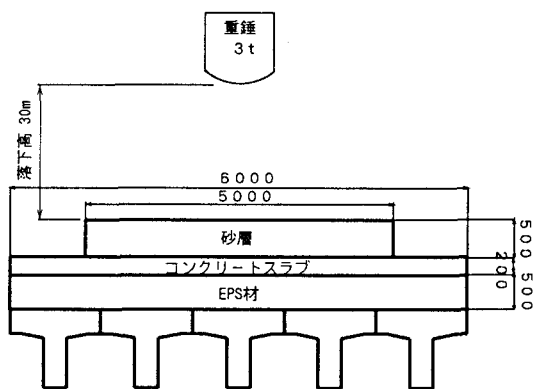


図-1 実験の概略図

Dynamic Behavior of PC Rock-Shed with 3-Layered Shock Absorbing System under Impact Loady
by Osamu NAKANO, Norimitsu KISHI, Noriyuki, SUGATA, and Toshiharu SATAKE

処理している。

2.1. PC 多主桁

本実験では次に示す条件の下に設計した PC 桁を用いている。すなわち、1) 落石重量が 3tf、落下高 10m で自由落下させる。2) ラーメ定数を $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ とし、振動便覧式³⁾によって算定された 128.3 tf の衝撃荷重が桁中央部に作用するものとする。3) 落石対策便覧にしたがって荷重が敷砂厚の 2 倍の領域に分散することとする。4) コンクリートの設計基準強度を 750kgf/cm^2 、許容引張応力度を 35kgf/cm^2 、弾性係数 $3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、ポストテンション方式でプレストレス

力を導入する。なお、落石時短期荷重に対してもコンクリートの応力はその許容引張応力度以内におさまるように設計されている。プレストレス力は $\phi 26\text{B}$ の PC 鋼棒を 9 本用いて導入している。1 本当たりの桁端緊張力は 42.41 tf である。導入されたプレストレス力によって、桁下縁および上縁で、それぞれ 437μ の圧縮歪、 50μ の引張歪となっている。また各主桁は床板部に 1m 間隔に設置された PC 鋼棒 ($\phi 26\text{B}$) によって横締めされている。導入されたプレストレス力によって床版の上下端でそれぞれ $52, 9\mu$ の圧縮歪となる。図-2 に本実験に用いた PC 多主桁を示している。

2.2. 三層緩衝構造の使用材料

三層緩衝構造に用いた RC 版の形状寸法は $6\text{m} \times 4\text{m} \times 20\text{cm}$ であり、コンクリートの設計基準強度 210kgf/cm^2 、補強筋比 1% の複鉄筋断面としている。スラブはかぶり 3cm とし D13 を 8cm 間隔で配置し製作している。実験時のコンクリートの材令は 8 日でその時の圧縮強度は 238kgf/cm^2 であった。

表層材に使用した敷砂材は、単位体積重量 1.609 gf/cm^3 、比重 2.59、均等係数 $U_e=5.72$ 、曲率係数 $U_c=0.86$ の栗丘産砂である。敷砂材は 20cm 毎に平均的に踏み固めを行い、所定の厚さとしている。また、実験時の含水比および相対密度はそれぞれ 5.3%、53.7% であった。裏層材として用いられている EPS 材は、型内発泡法で製造された単位体積重量 20kgf/m^3 のもので、寸法 $200\text{cm} \times 100\text{cm} \times 50\text{cm}$ のブロックを組み合わせて用いている。

3. 実験結果および考察

本実験で用いている PC 桁は前記のように 3tf の落石が 10m の高さから自由落下する場合に対して設計されている。しかしながら、緩衝材に関する大型実験結果より、三層緩衝構造を用いる場合には敷砂を用いる場合に比較して約 4 倍程度の緩衝能力があることが明らかになっているため、本実験では 3tf の重錘を 30m の高さより落下させることとした。また芯材 RC 版を有効に利用するため、重錘を 3 桁に落下の後、

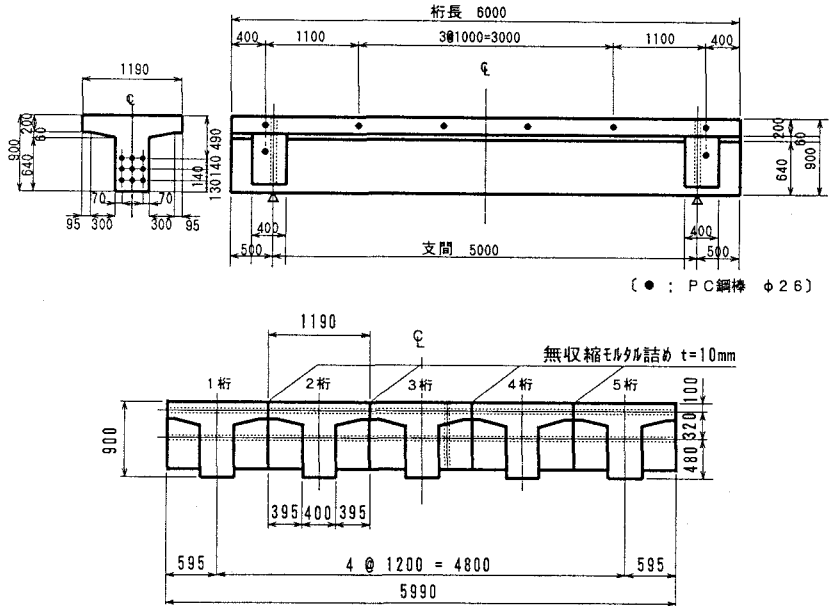


図-2 PC多主桁

連続して 2 桁および 4 桁上に落下させた。4 桁上に落下させた場合は芯材 RC 版の損傷が蓄積されているため、剛性が低下し重錘衝撃力も低下している。しかしながら PC 桁の応答性状は 2 桁上に落下させた場合とほぼ対称の分布を示しているため、ここでは重錘を 3 桁および 2 桁上に落下させた場合の結果について示している。なお、実験ケースを簡略して示すために、3 桁、2 桁および 4 桁上に重錘を落下させる場合をそれぞれ P-D-3, P-D-2, P-D-4 とし表すものとする。

3.1. 重錘衝撃力および主桁下端筋歪波形

図-3 に P-D-3, P-D-2 における重錘衝撃力と下端筋の歪分布を示している。主桁番号は各波形の右肩に示している。重錘衝撃力の分布は、剛基礎上における実験結果と類似の結果となっている。最大衝撃力の大きさは、P-D-3 > P-D-2 > P-D-4 (332.2 tf > 254.0 tf > 248.2 tf) となっている。これは繰返し落下によって芯材 RC 版の剛性が低下したためと考えられる。その傾向はここでは示していないが剛基礎上における実験結果と良く対応している。各桁の下端筋歪を見ると P-D-3 の場合は、3 桁を中心にして対称な波動分布を示していることが分かる。3 桁の最大歪は 150 μ 以下であり、プレストレス導入による下端の初期歪 437 μ の約 1/3 となっている。また、1 桁あるいは 5 桁の最大歪は 3 桁のその約 1/2 であり、緩衝材によって荷重が広く分散されていることを示していると考えられる。一方、P-D-2 の場合は 2

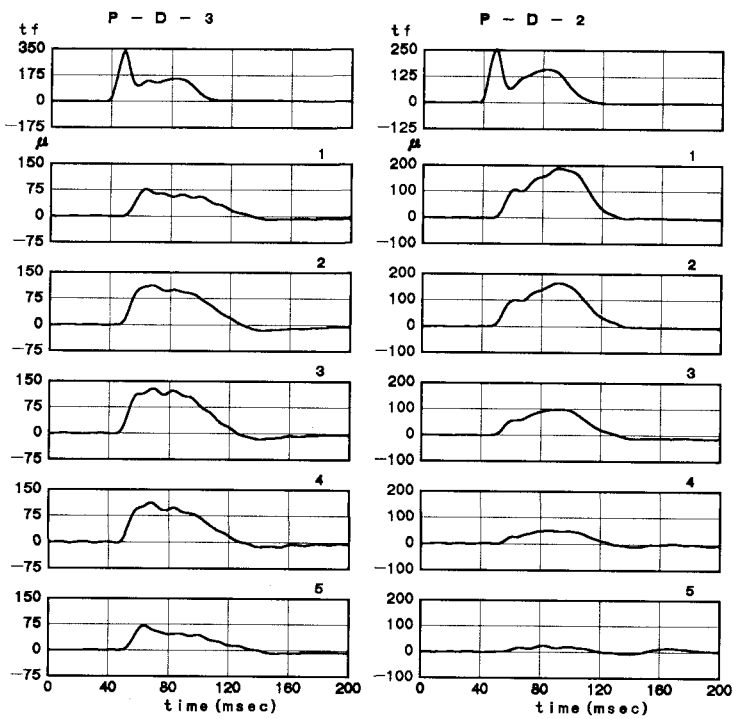


図-3 重錘衝撃力および歪波形

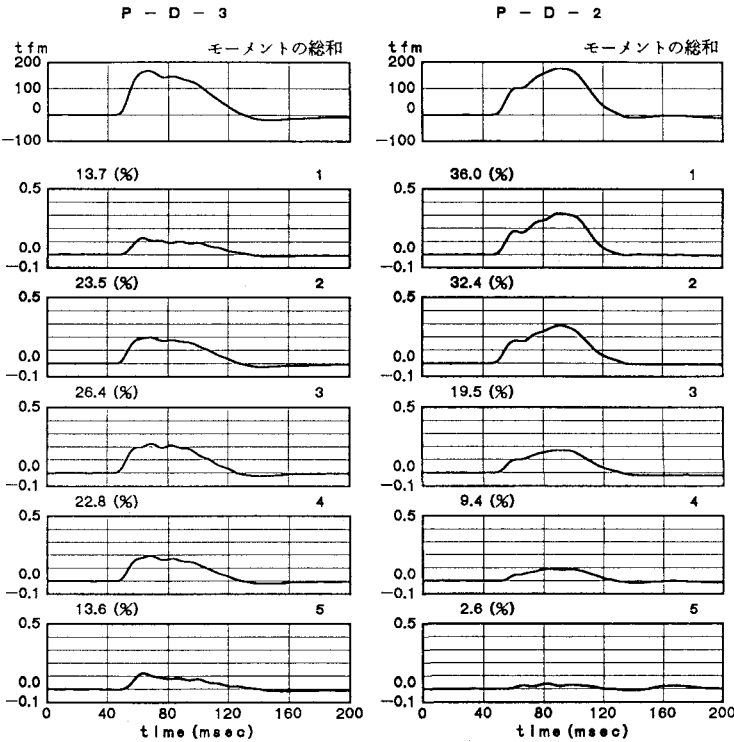


図-4 曲げモーメントの総和と荷重分担率

桁に載荷されているが、1 桁で最大歪 200μ を示している。P-D-2 の場合は、荷重が 2 桁上に載荷されているものの、1 桁で発生する歪が大きく、1 桁から離れるに従い徐々に小さくなっている。これは緩衝構造の幅が多主桁の幅と同じであり、かつ荷重が偏心荷重状態となっているため芯材が載荷点側に線形的に傾いた状態になったためと考えられる。1 桁の最大歪は 200μ であるが、この値も導入プレストレスによって発生する歪量の 1/2 以下の値であり、いまだ 2 倍以上の余裕度を確保しているものと考えられる。

3.2. 荷重分担の経時変化

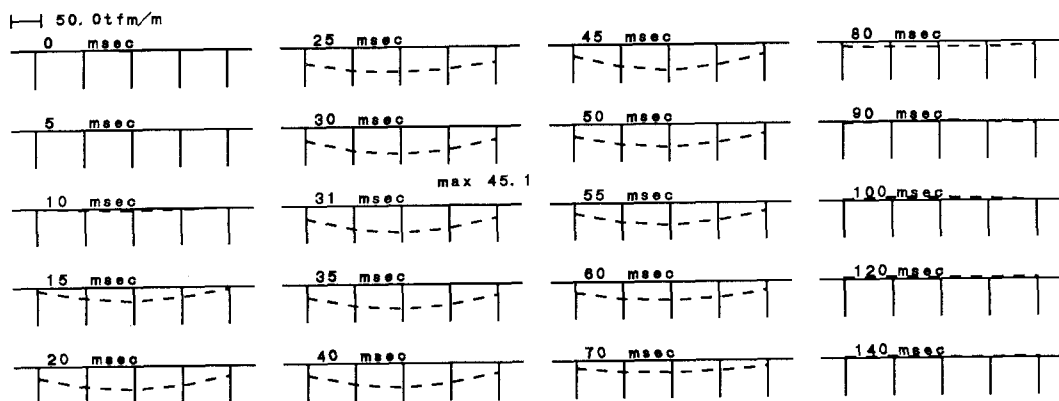
本研究では各桁の荷重分担をスパン中央部に発生する曲げモーメントの総和に対する各桁の分担率を用いて評価することとした。分担率は各時間毎に評価しなければならないと考えられるが、最も重要な値は最大応答発生時である。そのため、ここでは簡易的に最大モーメント発生時の値で各桁の発生モーメントを除す形で整理している。なお、各桁に発生する曲げモーメントは、測定された上下端筋歪を用い、断面方向に線形な歪分布を仮定し、配筋筋、PC 鋼棒の軸剛性を考慮して全断面有効として算定している。図-4 に P-D-3、P-D-2 の各桁の荷重分担率を示す。各図の上に最大応答時の荷重分担率を示している。上段にスパン中央部に発生する全モーメントの波動分布を示している。まず P-D-3 における結果を見ると、端桁すなわち 1, 5 桁で 14% 程度の分担率を、その他 2, 3, 4 桁は 23 ~ 26% 程度の類似の分担性状を示している。特に 2, 3, 4 桁の性状は、載荷点が特定できないほど値、分布性状とも酷似しており、横締め効果よりも三層緩衝構造の分散特性が発揮されたためと考えられる。これより荷重が自由端から離れている桁上に載荷される場合には 30% 程度の荷重分担を考慮するだけで十分であることがわかる。一方、P-D-2 の場合には、前項の下端筋歪歪波形同様、1 桁で最も大きく 36% となり 1 桁から離れるにしたがい徐々に小さくなっている。これより、自由端近傍に載荷される場合でも 40% 程度の荷重分担となることが明らかになった。

3.3. スパン中央部曲げモーメントの断面方向の分布の経時変化

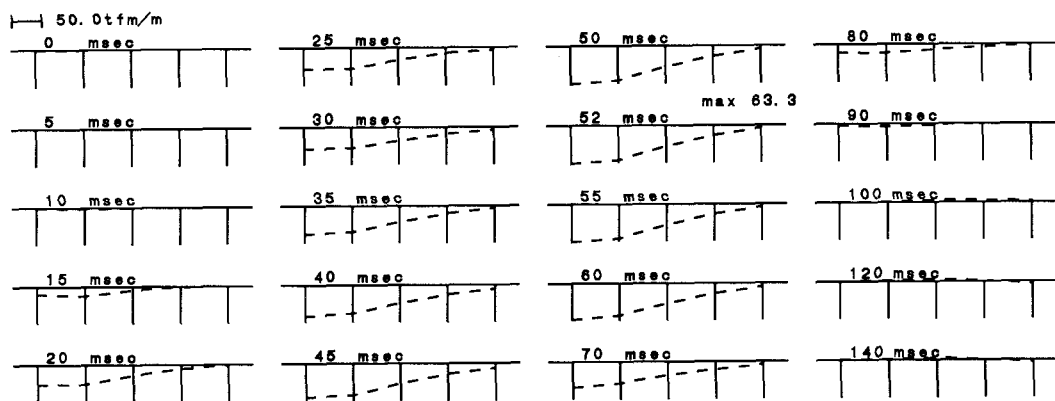
図-5 に前項で求められたスパン中央部曲げモーメント分布の経時変化を示している。(a) は、P-D-3、(b) は P-D-2 の場合であるが、前項でも述べたように (a) 図は中央部が若干大きい緩やかな分布性状を示しており、各桁の荷重分担がより均等化されている状態が示されている。(b) 図の P-D-2 の場合には、1 桁と 2 桁の曲げモーメントはほぼ等しいが、3, 4, 5 桁ではほぼ直線的にモーメントが減少しているようである。(a), (b) とともに負載荷状態の曲げモーメントは正載荷状態の場合に比べ無視できるほど小さく、衝撃荷重除荷時の上方への跳ね返りが非常に小さいことが分かる。桁の最大曲げモーメントに注目すると (a), (b) ではそれぞれ 45.1, 63.3 tfm/m である。一方、設計計算より求められる曲げモーメントは 121.5 tfm/m であり、(a) の P-D-3 の場合はその 1/2.7、(b) の P-D-2 の場合には 1/1.9 となっている。自由端から離れている主桁モーメントに関しては、3tf の落石が 10m 落下する場合の設計に対し、30m 落下する場合を想定しても約 2.5 倍以上の安全余裕度があることがわかる。

3.4. 3 桁曲げモーメントの軸方向分布の経時変化

図-6 は P-D-3 における 3 桁の曲げモーメントの軸方向分布の経時変化を示している。曲げモーメントの軸方向分布は、スパン中央点から支点まで 25cm 間隔に上下端筋に添付されている歪ゲージからの出力を基にして求められている。各分布図より、曲げモーメントが軸方向にほぼ放物線状に分布していることがわかる。これは、荷重が集中的に作用しているのではなく軸方向に等分布的に作用していることを示唆するものである。除荷後モーメントの応答がほぼ零となり、減衰の程度が大きいことから主応答時には低次の自由振動状態ではなく強制振動状態になっているものと推察される。これより、上記の等分布的な作用荷重は三層緩衝構造の荷重分担効果により、衝撃力が均等化された成分であると考えられる。最大モーメントは中央部より 50cm 離れた点で発生している。その値は 47.5tfm/m で、前項で示された 45.1tfm/m より、若干大きな値を示している。



(a) P-D-3 の場合



(b) P-D-2 の場合

図-5 スパン中央部曲げモーメント分布の経時変化

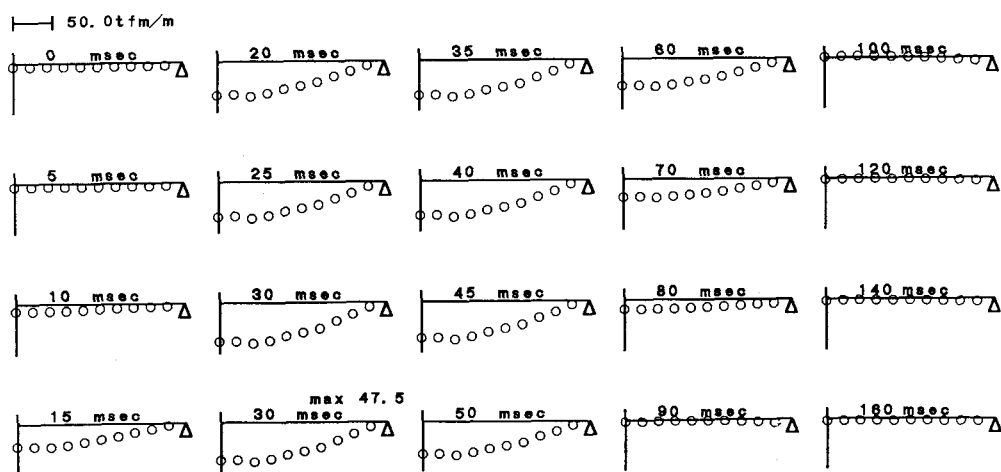


図-6 3桁の曲げモーメントの軸方向分布の経時変化

4. まとめ

著者等によって開発された三層緩衝構造の PC 覆工への適用性を実証的に明らかにするために、90cm 厚の敷砂を緩衝材として用い、重錘重量 3tf、落下高 10m とし、スパン 5m、全幅 6m の条件の下に設計された単純支持 PC 多主桁を用いた重錘落下による衝撃載荷実験を行った。本実験で用いた三層緩衝構造は表裏層材がそれぞれ 50cm 厚の敷砂および EPS 材、芯材が厚さ 20cm、鉄筋比 1% の複鉄筋配置の RC 版である。本実験より得られた結果を整理すると、

- 1) P-D-3 の場合には曲げモーメントで評価した荷重分担率は中央部の 3 つの桁ともほぼ等しく 23 ~ 26% 程度であり、P-D-2 の場合でも桁端で 40% 以下である。
- 2) これより荷重が自由端より離れている桁上に作用する場合には、荷重分担を 30% 程度に見積もることが可能である。
- 3) 曲げモーメントの断面方向分布より桁に発生する最大曲げモーメントは、P-D-3 の場合には設計モーメントの 1/2.5 以下であり、設計条件である 10m 落下に対し 30m 落下の場合でも 2 倍以上の安全余裕度を保持している。
- 4) 曲げモーメントの軸方向分布は、ほぼ放物線状の分布を示しており、三層緩衝構造の荷重分散効果によって荷重が等分布的に作用していることが推察される。

以上より、三層緩衝構造は PC 多主桁上に設置された場合も、その特性を十分に発揮し、緩衝性能と荷重分担の向上によって効率的に曲げ応力を低減することができることが明らかになった。三層緩衝構造を用いることにより、より合理的な PC 覆工の設計が実務的に可能となったものと考えられる。

参考文献

- 1) 岸徳光, 中野修, 今野久志, 松岡健一: 三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験, 構造工学論文集, Vol.38A, pp1577-1586, 1992.3
- 2) Osamu NAKANO, Norimitsu KISHI, Ken-Ichi MATSUOKA and Jin YOSHIMURA : Development of 3-Layered Shock-Absorbing System for Rock Sheds, Proceedings of the International Symposium on Impact Engineering, Vol.2, pp725-729, 1992.9, Sendai
- 3) 日本道路協会: 落石対策便覧、日本道路協会、1983.