

I-40 敷砂緩衝材を用いた実規模 PC 落石覆工の動的挙動

室蘭工業大学	正員	岸 徳 光
開発土木研究所	正員	佐 藤 昌 志
開発土木研究所	正員	西 弘 明
室蘭工業大学	学生員	高 沢 昌 憲

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にある道路では、落石による人命損失および交通障害を防止するために落石覆工等の建設が行われている。我国は世界有数の地震発生国であり、特に北海道においては平成5年に釧路沖地震、南西沖地震、同6年には東方沖地震という三つの大地震に見舞われ、海岸部、山岳部では崖崩れによって交通網が分断されるという事態に至った。このような点からも落石等による災害を防止し、より安全で円滑な交通を確保することのできる覆道の設計が急務である。

現在 PC 製落石覆工の設計は RC 製覆工同様、落石対策便覧に基づいて行われている。落石対策便覧では、落石による衝撃荷重をラメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式を用いて算定することとしている。しかしながら、剛基礎上に敷厚 $h = 90 \text{ cm}$ の敷砂を設置した場合の緩衝性能に関する実験によれば、重錘衝撃力は $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ 程度とする場合と近似していることや、伝達衝撃力は重錘衝撃力の 1.5 倍程度になることがわかっている。また、PC 桁の設計は荷重分担を 1 として衝撃荷重を静的に作用させることにより断面力を算定し行っている。現実には各桁が頂版で横締めされており、隣接桁の荷重分担が期待できることより、載荷桁の荷重を低減できるものと考えられる。

より合理的な PC 製覆工を設計するためには実規模の覆工に対する実験を行い、挙動特性を的確に把握し、これらの諸問題を解決することが重要であるものと考えられる。このような観点より、北海道開発局開発土木研究所、室蘭工業大学、北海道 PC 防災技術協会（PC 製覆工を提供）の 3 者は北海道開発局機械製作所敷地内に実規模の PC 製落石覆工を製作し各種実証実験を行っている。本論文は上記実証実験において、特に現落石対策便覧に則して敷厚 $h = 90 \text{ cm}$ の敷砂緩衝材を用いた場合の実験結果について整理し検討したものである。

2. 実験の概要

本研究に用いられた実規模 PC 覆工は、主構造を逆 L 型ラーメン構造（1 剛結 2 ヒンジ構造）とし、主桁が単純 T 型断面であり、柱が厚さ 1.1m の矩形断面で幅員が約 12 m、高さ約 4.7 m で、全体構造は頂版幅が約 1.5 m の主桁 5 体より構成されている構造である。実験は PC 製覆工頂版上に敷砂緩衝材を設置し、3 tf の重錘をトラッククレーンにより所定の高さから落下させて行っている。重錘は直径が 1 m、高さが 97 cm で底部の高さ 17.5 cm 部が球形（半径 80 cm）状になっている。図-1 に実験の概要図を示す。測定項目は、重錘加速度（重錘底部に加速度計を設置している）、敷砂から覆工に伝達される伝達衝撃応力（覆工頂版表面に伝達応力測定用ロードセルを埋設）、覆工内歪（PC 桁、柱部の補強筋に歪ゲージを添付）である。各応答波形は、データレコーダー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。

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 1 tf、落下高 30 m で自由落下させる。2) ラメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とし、振動便覧式¹⁾によって算定された 119.2 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 600 kgf/cm^2 、許容引張応力度を 28 kgf/cm^2 、弾性係数 $3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とする。以上により設計した PC 桁は頂版幅 149 cm、頂版厚 20 cm、ウェブ幅 50 cm、桁高 110 cm の単純 T 型断面として、主桁

スパン中央断面には 23 本の PC 鋼より線を用いてプレテンション方式でプレストレスを導入した。主桁の PC 鋼材および補強筋にはそれぞれ SWPR7B 15.2B、SD295A D22 を用いている。導入されたプレストレス力によって、桁上縁および下縁には、それぞれ 10.5 kgf/cm^2 の引張応力、 107.1 kgf/cm^2 の圧縮応力が発生している。また桁の横締めは、フランジ部に 1 m 間隔に設置された 11 本の PC 鋼棒 ($\phi 26$) を用い、28.5 tf/本の緊張力を与えて行っている。そのプレストレスによって頂版上縁で 18.2 kgf/cm^2 、下縁で 3.3 kgf/cm^2 の圧縮応力が発生している。主桁と柱部の接合には、柱断面の中心より外側に配置した 4 本の PC 鋼棒 ($\phi 32$) を用い、45.85tf/本の緊張力を与えている。

2.2 使用材料

実験に用いた敷砂材は落下点を中心として 4.0 m × 4.0 m × 0.9 m の砂箱を設置し、その中で 20 cm 毎に敷き均し足踏みにより締め固めて所定の敷厚とした。なお実験で用いた敷砂材は栗丘産であり、締め固め後の含水比および相対密度はそれぞれ 4.7 %、55.1 % であった。その特性を示すと表－1 の通りである。

2.3 実験ケース

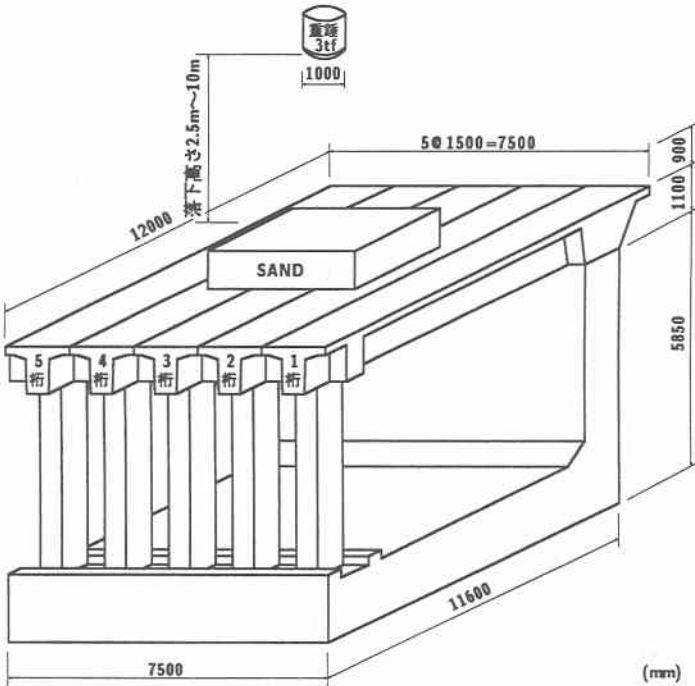
実験ケースは PC 覆工の弾性的な荷重分担率あるいは同一桁内の曲げモーメント、軸力分布等を検討するため、以下の3タイプについて検討を行った。表－2 に実験ケースの一覧を示す。

- 1) 載荷位置を 3 桁中央部 (3L/6) に限定し、落下高さを 2.5、5.0、7.5、10.0 m と変化させた場合
- 2) 落下高さを 10 m とし、載荷位置を 3 桁・3L/6、2 桁・3L/6 と変化させた場合
- 3) 落下高さを 10 m とし、載荷位置を 3桁の 1L/6、3L/6、5L/6 と変化させた場合

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃力の時系列分布

図－2 は 3 桁中央部に落下高さを 2.5、5.0、7.5、10.0 m と変えて重錘を落下させた場合 (タイプ 1) の重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布であり、重錘衝撃力、伝達衝撃力の経時変化をそれぞれ実線、破線で示している。ここで、重錘衝撃力は重錘加速度 (G) に重錘重量を乗じたものであり、



図－1 実験概要図

表－1 敷砂の特性

栗丘産	比重 ρ	吸水率 %	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
	2.55	1.64	4.85	0.87

表－2 実験ケース一覧

タイプ	載荷桁 番号	載荷位 置番号	落下高 (m)
1	3	3L/6	2.5
	3	3L/6	5.0
	3	3L/6	7.5
	3	3L/6	10.0
2	3	3L/6	10.0
	2	3L/6	10.0
3	3	1L/6	10.0
	3	3L/6	10.0
	3	5L/6	10.0

伝達衝撃力は伝達応力が重錘落下点を中心とした同心円状に分布すると仮定し、台形則を用いてその応力を集積して得られたものである。重錘衝撃力の波形は落下高さが小さい場合には、波形の立ち上がりから約 40 msec 経過後に最大値に達し、その後緩やかに減少しているが、落下高さが高くなるにつれて最大値が大きくなり、かつ衝撃継続時間も短くなっているようである。一方、伝達衝撃力波形はその最大値が重錘衝撃力のそれより大きく、かつ負の衝撃力も発生し減衰振動状態となっていることがわかる。この減衰振動は、重錘落下によって PC 覆工に励起された振動によって発生したものと考えられる。各衝撃力の最大値を一覧にすると表-3 のようになる。

なお表-3 には比較のため、ラーメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とし、実験と同じパラメーターを用いた場合の振動便覧式による結果を整理している。最大重錘衝撃力に注目すると、実験結果は落下高さ $H = 7.5 \text{ m}$ までは振動便覧式より小さな値となっているが、 $H = 10 \text{ m}$ ではそれよりも大きな値となっている。また最大伝達衝撃力に関しては、実験結果は落下高さ $H = 2.5 \text{ m}$ のみが振動便覧式より小さく、他は全て大きな値となっている。特に $H = 10 \text{ m}$ の場合には、重錘の落下エネルギーは設計条件と同じ 30 tfm であるが、実験結果より得られた最大伝達衝撃力は設計値 ($W = 1 \text{ tf}$ 、 $H = 30 \text{ m}$ 、 119.2 tf) の 1.5 倍、また表-3 より得られた振動便覧式の値の 1.4 倍の大きさになっていることがわかる。これより、 $H = 2.5 \text{ m}$ の場合を除き、重錘落下によって PC 覆工に振動が励起されるような場合においても、伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも大きくなること、またラーメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式は実験結果と比較して過小評価となることもあることが明らかになった。

3.2 荷重分担の経時変化

多主桁の荷重分担率は、通常主桁の鉛直方向変位より算出しているようである。本実験では、1) 桁の軸歪成分を用いて主桁曲げモーメントを算出することができること、2) 主桁曲げモーメントと桁への作用荷重は弾性範囲内の実験故、1対1対応の関係になっていること等より、主桁曲げモーメントを用いて荷重分担率を算定することとする。図-3 に落下高さを $H = 10 \text{ m}$ とし、3 桁、2 桁の 3L/6 点にそれぞれ載荷した場合 (タイプ 2) について、スパン中央部に発生する総曲げモーメント (各桁の曲げモーメントの総和) と総曲げモーメントに対する各桁の分担率の経時変化を示している。各桁の分担率波形の上部には総曲げモーメントの最大値発生時 (3 桁、2 桁落下でそれぞれ 626.96 、 539.44 tfm) における各桁の分担率を示している。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、T 桁断面の幅方向には一様、桁高さ方向には線形な歪分布を仮定し、配力筋、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-3 より載荷桁の荷重分担率は 3 桁落下の場合 37.3% 、2 桁落下の場合には 41.4% となっており、偏心載荷の場合には分担率が 4% 程度低下しているが、分担率は横締め緊張量と密接な関係があることに留意する必要がある。また 3 桁落下の場合には、2・4 桁、1・5 桁でそれぞれ 21% および 10% 程度と載荷条件と等しく、ほぼ左右対称の荷重分担率を示している。しかし 2 桁落下の場合には、1 桁で 28.3% と大きな値を示し、

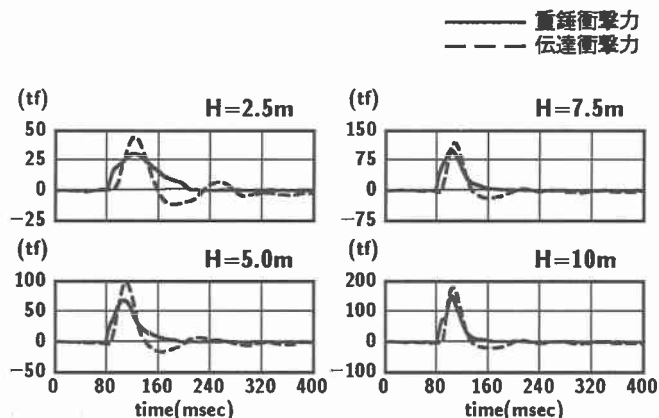


図-2 衝撃力の時系列分布

表-3 衝撃力の落下高別最大値

重錘落下高 (m)	2.5	5.0	7.5	10.0
最大重錘衝撃力 (tf)	30.5	69.2	98.7	151.8
最大伝達衝撃力 (tf)	44.2	98.6	116.9	180.7
振動便覧式による衝撃力 (tf) ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$)	55.83	84.63	107.94	128.27

3、4、5桁と落下位置から離れるにしたがい、19.4%、9.0%、1.9%と急激に分担率が低下し、載荷桁より自由端に近い桁の分担率が増加していることがわかる。これより、自由端から離れている桁に関しては横締め緊張量にもよるが、本実験では40%程度の荷重分担を考慮してもよい結果となっている。しかしながら自由端近傍桁に関しては40%以上の分担率を考慮しなければならないものと考えられる。

3.3 スパン中央部曲げモーメントの断面方向分布の経時変化

図-4には前項で求められた各桁のスパン中央部曲げモーメントの断面方向分布の経時変化を示している。図より(a)、(b)図ともに荷重載荷後20 msec経過時点で最大値を示している。その後荷重の除荷とともに減少し、50 msec経過後は自由振動状態となり、負載荷状態の曲げモーメントを示す傾向となっている。3桁載荷時の曲げモーメントの分布は、3桁を中心としてほぼ対称な分布をしており、外桁に向かうにしたがい直線的に減少している。また、最大曲げモーメントは3桁に発生し、その値は247.1 tfmである。2桁に載荷した場合の分布は、

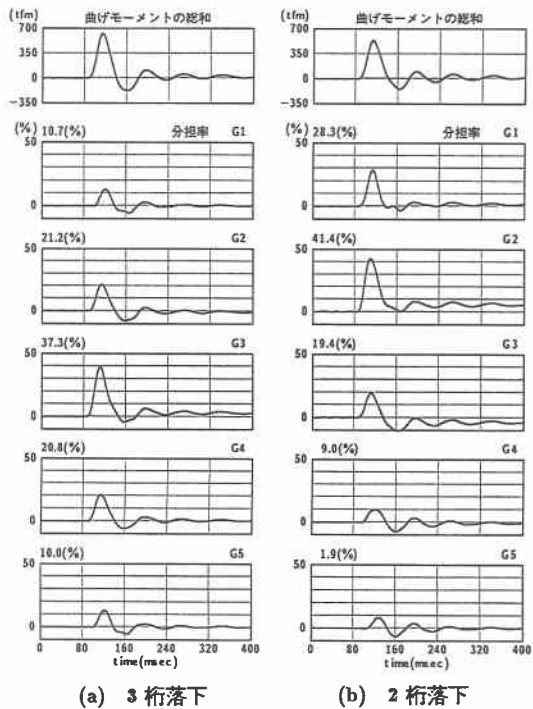
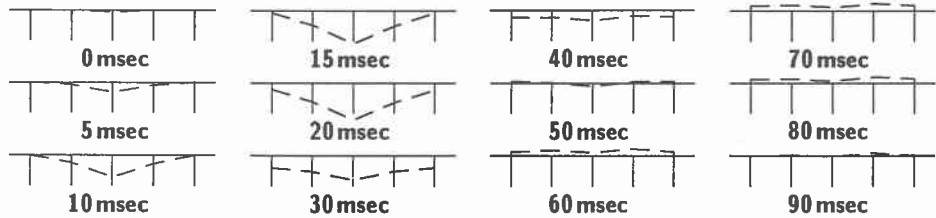


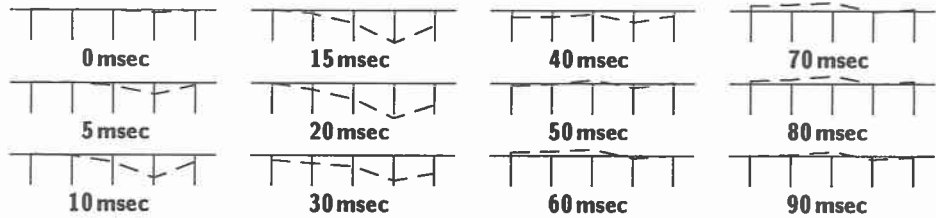
図-3 総曲げモーメントと荷重分担率

I 200 tfm



(a) 3桁落下の場合

I 200 tfm



(b) 2桁落下の場合

図-4 スパン中央部曲げモーメントの断面方向分布の経時変化

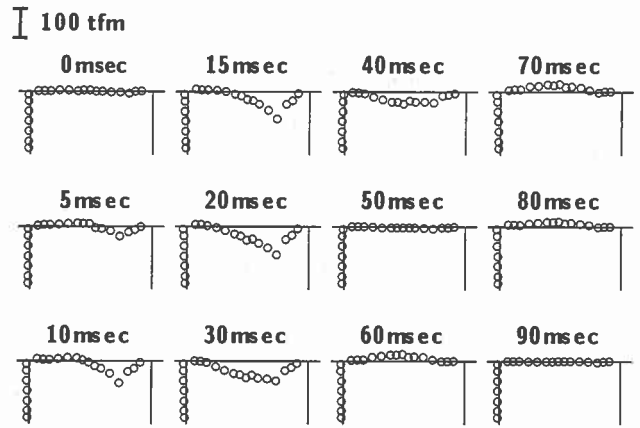
2 桁で最大 230.2 tfm となり、3 桁に落下させた場合に比べて約 17 tfm 程度小さい。断面方向には前項でも述べているように、端桁である 1 桁の応答が 3 桁よりも大きく示されていることが明確に示されている。両ケースともに負載荷状態の曲げモーメントは正載荷状態の場合に比べて小さく、最大でそれぞれ約 40、60 tfm で、衝撃荷重除荷時の上方への跳ね返りが大きいことを示している。

3.4 桁曲げモーメント分布の落下位置別経時変化

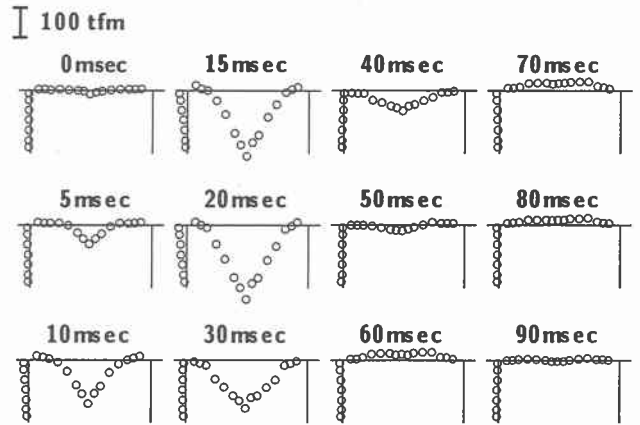
図一5には落下高さ 10 m、載荷桁を 3 桁に限定し、載荷位置を 1L/6、3L/6、5L/6 と変えた場合 (タイプ3) の 3 桁の桁曲げモーメント分布の経時変化を示している。なお経過時間は桁の応答が開始された時点を基準としている。各載荷位置状態に対する曲げモーメントの概形図について考察すると、いずれの場合もほぼ荷重載荷点で最大応答値を示し、ほぼ直線的に減少している。静的には梁 - 柱の接合部において負の大きな値 (3L/6 載荷で載荷点の曲げモーメントの 1/2 程度、1L/6 載荷で 1/4 程度、5L/6 載荷で同程度の大きさ) となるが、本実験結果では梁 - 柱の接合部および柱部の応答値はほとんど零となり、最大応答発生時でも応答が載荷点近傍に集中している結果となっている。いま、入力エネルギーが設計条件と実験条件で等しいとして全主桁の中央部の曲げモーメントおよび 3 桁の主桁中央部の曲げモーメント等について比較すると表一4のように示される。これより、設計値は荷重分担率が 1 であるのかかわらず、載荷点部の曲げモーメントが 215.2 tfm であり、荷重分担率が 0.373 である実験結果の 247.1 tfm より小さい。これは全主桁中央部曲げモーメント 662.5 tfm と最大衝撃力 180.2 tf から逆算すると、桁のひび割れを許さない荷重レベルでの動的応答値は設計時の 2.04 倍になっているともいえる。

3.5 軸力の軸方向分布の経時変化

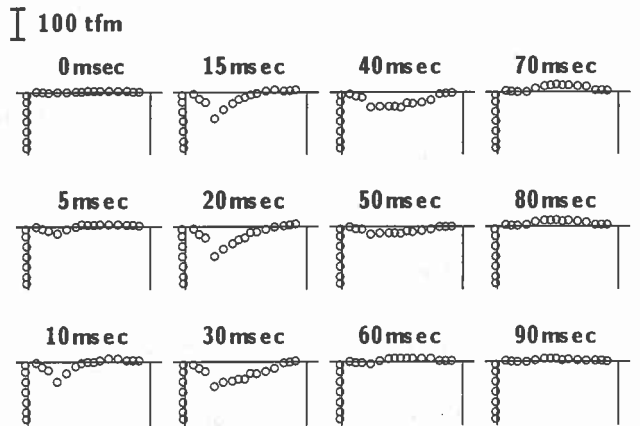
図一6は前項と同じ重錘重量 3 tf、落下高さ 10 m で 3 桁の 3L/6 に載荷した場合の載荷桁の軸力の軸方向分布の経時変化を示している。



(a) 1L/6 落下



(b) 3L/6 落下



(c) 5L/6 落下

図一5 桁曲げモーメント分布の落下位置別経時変化

分布図は桁の内側、外側をそれぞれ引張力、圧縮力として整理している。図より軸力分布図は曲げモーメント分布図(図-5(b))と同様な分布形状を示し、主桁では載荷点近傍部で最大値となる引張力、柱部では頂端部を除いて圧縮力の分布となっていることがわかる。主桁での分布に関しては、静力学的には一様な圧縮力(設計値は 22.7 tf)となるのに対して、実験結果は曲げモーメント分布と類似の分布形状を示し、最大値が載荷点近傍で約 215 tf(約 20 msec 経過後)の引張力となり、特性が静解析結果と大きく異なっている。一方、柱部は頂端部を除き、静解析と同様圧縮力分布となっている。最大値は 40 tf 程度であるが、この値は最大伝達衝撃力値 180.2 tf と今回の実験条件で得られた 3 桁の荷重分担率 0.373 より算定した 3 桁への最大作用荷重 67.2 tf に対する分担反力 33.6 tf より若干大きな値となっている。なお、支点で減少しているのは、歪ゲージが添付されている補強筋が桁部では上下端(柱部では内外端)に配置されているのに対して、支点となる鋼棒が断面中央部に設置されていることによるものと考えられる。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果を要約し、以下に示す。

- 1) タイプ 1 の実験結果より、 $H = 2.5\text{ m}$ の場合を除き、重錘落下によって PC 覆工に振動が励起されるような場合においても、伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも大きくなることや、ラーメ定数を $\lambda = 100\text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式は実験結果に比較して過小評価となることもあることが明らかになった。
- 2) タイプ 2 の実験結果より、横締め量等に左右されることも考えられるが、3 桁落下における載荷桁の荷重分担は 40 % 程度とすることができるが、2 桁落下の場合、載荷桁を含めた自由端近傍桁の荷重分担は 40 % 以上になることが明らかになった。
- 3) タイプ 3 の実験結果より、落下高 10 m 程度の落石に対する載荷桁のスパン中央点の曲げモーメントは動的応答倍率 2.0、荷重分担率 0.4 として概算できると考えられる。また、桁と柱の接合部近傍の曲げモーメントは静解析結果と異なり、小さな応答値となる。主桁の軸力成分は静解析結果と異なり、曲げモーメント分布と類似の引張力が発生している。

なお、タイプ 3 の実験において柱と梁の接合部においてモーメントがほとんど発生しなかったが、これは荷重レベルが小さかったこと、さらには設計値以上の緊張力を導入した場合にも、連続体でないことも考えられ、これらについて一層の研究を行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983。

表-4 設計値と実験結果との比較 (3 桁・3L/6)

項目	設計値	実験結果
落下重量 (tf)	1	3
落下高さ (m)	30	10
最大衝撃力 (tf)	119.2	180.2
全主桁中央部 $M_{\max}$ (tfm)	215.2	662.5
載荷桁中央部 $M_{\max}$ (tfm)	215.2	247.1
載荷桁の分担率	1.0	0.373
動的応答倍率	-	2.04*

注) 実験結果は衝撃荷重レベル等により異なるとも考えられる。

$$* : \frac{119.2}{215.2} \cdot \frac{662.5}{180.2} = 2.04$$

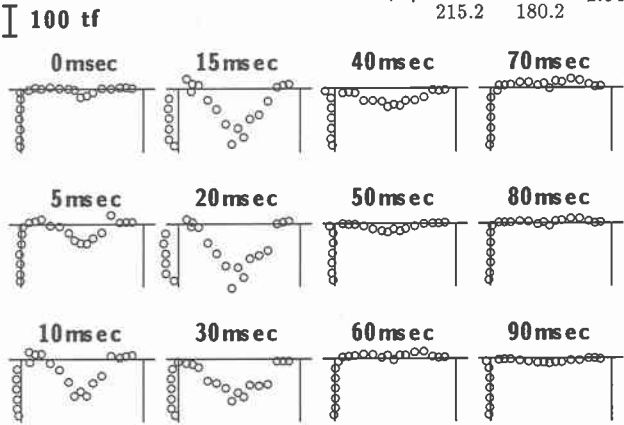


図-6 3 桁・3L/6 載荷時における軸力の軸方向分布の経時変化