

論文

衝撃荷重載荷の動的影響に関する基礎的検討

横山広*, 谷山智彦**, 久保善司***, 栗橋祐介****, 角間恒*****

*博（工）, 金沢大学大学院特任教授, 自然科学研究科（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

** 金沢大学大学院, 自然科学研究科（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

***博（工）, 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

****博（工）, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）

*****博（工）, 寒地土木研究所主任研究員, 寒地構造チーム（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸）

劣化床版の耐荷性能を効率よく評価する技術として衝撃荷重載荷試験が開発されている。近年では実橋での評価実績も増加しており、三次元弾性論による載荷データ検証の妥当性も確認されている。本研究では衝撃荷重載荷試験のさらなる精度向上を目指して動的作用に関する影響を把握するものとし、梁供試体を製作して 2 種類の重錘落下機構の異なる装置の比較に加え、静的載荷試験とも比較して試験手法としての詳細を把握することとした。結果として衝撃荷重の作用形態が異なることでその応答も異なることが示された。

キーワード：道路橋床版，衝撃荷重載荷，動的作用

1. はじめに

床版は橋梁を構成する部材の中でも直接輪荷重を支持していることから、損傷事例も数多く報告されており、維持管理に投入する費用も莫大なものとなってきている。床版の劣化は輪荷重の繰返し作用の影響による構造的な疲労の他にも塩害やアルカリシリカ反応、凍害等の材料劣化も生じており、それらが疲労との複合した劣化も顕在化している。複合劣化では劣化原因が複雑に影響するため、供用に問題無いかや対策立案のための状態把握、即ち耐荷性能の評価が困難となっている¹⁾。床版の耐荷性能評価の一つの方法として、これまで目視によるひび割れ発生状況の把握やひび割れ密度の計測が実施されてきたが、それらは主として輪荷重走行試験の結果による疲労劣化のみに着目しており、材料劣化の影響を受ける疲労と複合した劣化に適用する際には注意が必要である。劣化度の評価精度を向上させるために、荷重車による耐荷性能を把握する載荷試験も実施されるが、仮設足場の設置や計測機器の配置で期間を要し、費用も高額となる。よって、橋梁全体に適用することは困難で、損傷程度に選定して一部の床版で試験を実施し、それを代表値として対策立案が実施されることが多い。しかしながら、床版は面的な広がりを持つ構造であり、施工誤差等による品質のばらつきも想定されることから、代表値による評価は精度に劣り、可能な範囲で多くの位置での情報を取得することが維持管理上重要であることは疑いが無い。

そこで著者らは重錘の落下による衝撃力を床版に作用させて、その際の応答変位を計測する衝撃荷重載荷試験装置を開発し、実橋試験等によりその有効性を確認した²⁾。写真-1 に載荷試験状況を示すが、装置は載荷装置本体とそれを移動させるフォークリフトから構成されており、装置がコンパクトであることから道路としての車線分割と主桁配置との関係による載荷試験位置の制約を受けにくく、主桁間中心、即ち床版支間中央での試験を可能としている。さらに、試験結果の評価手法に関しても検討を加え、三次元弾性論から導かれる厚板理論を適用することにより状態把握が可能であることを示した。その際、衝撃荷重載荷は動的な荷重作用であり、厚板理論は静的な解析であることから状態は異なるものの、試験装置の重錘落下位置に装着している制振ゴムのバウンドの抑制



写真-1 衝撃荷重載荷試験計測状況

と荷重作用時間の調整効果で静的な解析による評価が可能であると推察された³⁾。本研究では制振ゴムを設置した衝撃荷重載荷試験の特性を把握するために、鉄筋コンクリート梁（以下、RC 梁と称す。）を製作し、2 種類の試験装置による衝撃荷重載荷試験と静的載荷試験を実施してそれぞれの結果の比較検討を実施することとした。試験装置は自然落下型の装置（以下、装置 A と称す。）に加え、新たに重錘質量を減じて圧縮コイルバネによる開放力を付加した衝撃エネルギーが同等となる装置（以下、装置 B と称す。）を開発し、それを採用した。

2. 試験概要

2.1 試験装置の概要

重錘を自然落下させて衝撃荷重を作用させる装置 A の概要を写真-2 に示す。重錘の質量は 250kg で落下高さはホイスによって自由に調整可能で 150mm とした場合に 60kN 程度の衝撃荷重が床版に作用する。重錘が落下して受圧板に衝突する位置には制振ゴム（写真-3）を設置しており、受圧板下方にはロードセルと載荷板があり、載荷板には 3 本の鋼製円柱脚を配置して、載荷位置中央に空間を設けて加速度計を固定できるように工夫した。一般的な橋梁床版の計測では加速度計は中央直下の他に支持桁上と載荷点と支持桁の間にも配置してたわみ分布を取得できるようにしている。

写真-4 は圧縮コイルバネの開放力を活用して重錘の初速を向上させた装置 B で、重錘の質量は 50kg で落下高さの最大は 800mm となっている。載荷機構は前述の自然落下タイプと同様で、制振ゴムも採用しており荷重作用位置の形状も同様である。本装置は重錘質量が低減されたことで移動用のフォークリフトが不要となり機動性が大幅に向上している。

載荷試験では RC 梁に作用するエネルギーで比較できるように、重錘質量と落下高さの関係を表-1 に示すように設定した。衝撃載荷による変位の取得は加速度計の波形を時間積分して換算しており、一例として装置 A の位置エネルギー400J の場合の加速度波形と積分後の速度波形、さらに積分した変位波形を図-1 に示す。



写真-2 装置 A の外観



写真-3 受圧板と制振ゴム（装置 A）

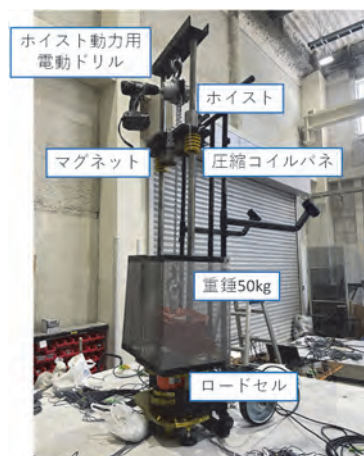


写真-4 装置 B の外観

表-1 各試験装置の落下高さと作用エネルギー

位置エネルギー(J)	200	300	400
装置 A 落下高さ(mm)	80	120	160
装置 B 落下高さ(mm)	400	600	800

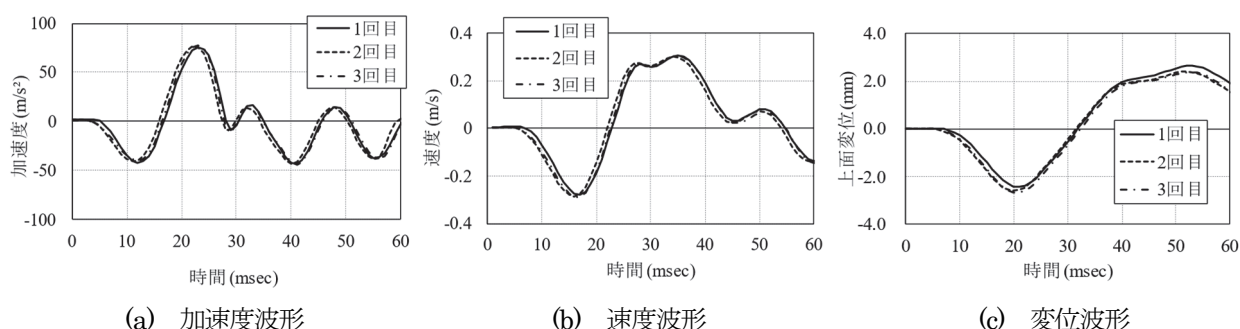


図-1 時間積分による変位波形の取得（装置 A 位置エネルギー400J）

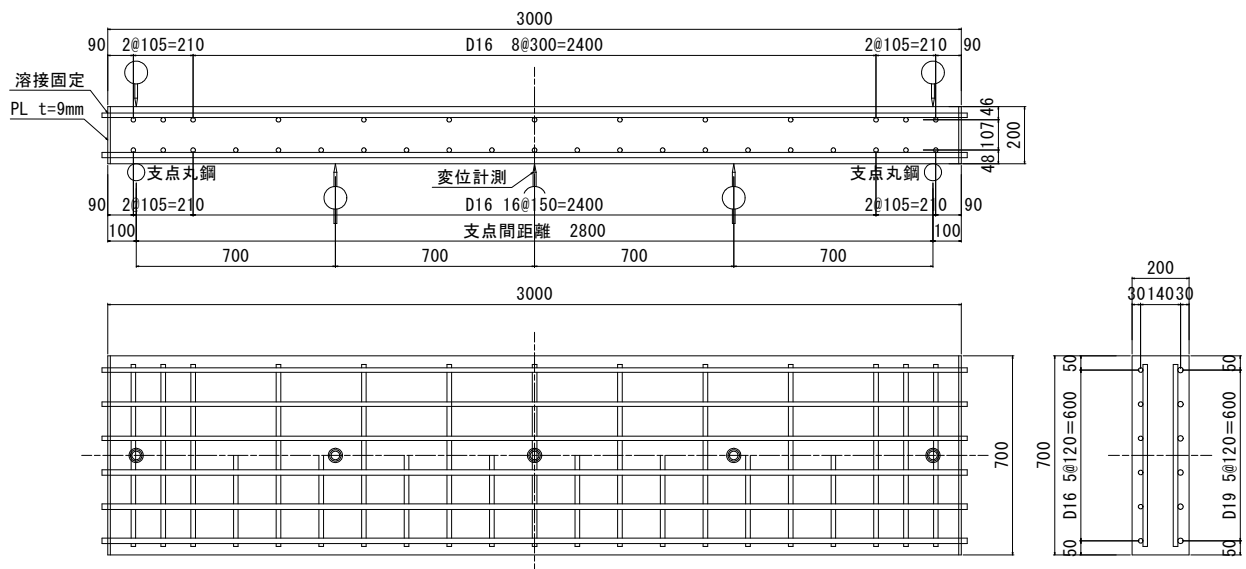


図-2 梁供試体形状図 (単位：mm)

2.2 試験用梁供試体の概要

RC 梁供試体は図-2 に示すもので、幅は梁上に設置する試験装置の形状を考慮して 700mm とし、厚さは床版相当の 200mm、支点間距離は 2800mm とした。補強鉄筋は上側が D16@120mm で下側が D19@120mm である。使用したコンクリートの呼び強度は 24N/mm² で供試体と同条件で養生した材齢 28 日の圧縮強度は 33.7N/mm²、材齢 214 日の静的载荷試験時の圧縮強度が 39.6N/mm² でヤング係数が 29.4kN/mm² であった。セメントの種類は普通ポルトランドセメントで粗骨材の最大寸法は 25mm である。

RC 梁供試体の計算上のひび割れ発生荷重は 22.6kN で下側鉄筋の降伏荷重は 127.3kN であった。また、本試験条件による RC 梁供試体の固有周期は 41msec であり、その半周期は 20.5msec であった。

2.3 試験状況

圧縮コイルバネにより初速を向上させた装置 B による载荷試験状況を写真-5 に示す。支点条件は回転可能な丸鋼とし、浮き上がりを防止するために万力で支点部を固定した。荷重は位置エネルギーが 200J から 300J, 400J となるように増加させた。試験の順序は装置 B の後に装置 A を実施し、その後に静的载荷試験を実施している。静的载荷試験は写真-6 に示す金沢大学が所有する大型実験装置を使用しており、計測項目は全ての装置で共通で図-2 に示している通り、载荷点と载荷点と支点の間点、両支点部の浮き上がり確認の計 5 箇所の変位を計測している。変位計測では静的载荷試験では接触式の変位計を用い、衝撃荷重载荷試験では分解能が 1μm のレーザー型変位計を使用した。

衝撃荷重载荷試験後の RC 梁供試体の目視観察で幅が 0.1mm 未満の微細な曲げひび割れが確認されたため、静的試験ではひび割れ状態に加えてひびわれ前の状態も考



写真-5 衝撃载荷試験状況 (装置 B)



写真-6 静的载荷試験

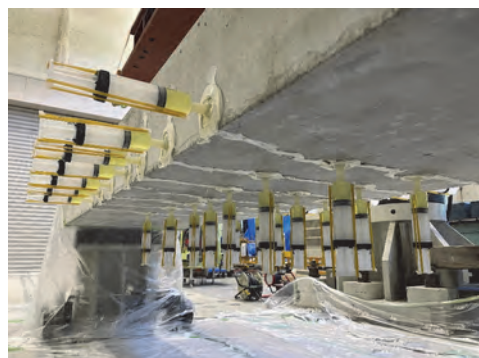


写真-7 ひび割れ注入状況

慮できるように、写真-7 に示す低粘度のエポキシ樹脂によるひび割れ注入を実施した後に再度、静的載荷試験を実施した。

3. 載荷試験結果

3.1 装置Aによる載荷試験（重錘自然落下）

(1) 荷重作用

装置Aによる位置エネルギー毎のロードセルで検出された荷重曲線を図-3 に示す。図-3(a)の 200J によれば最大荷重は 21.8~24.3kN 程度となっており、14msec 付近でピークを迎え 40msec で零になっている。図-3(b)の 300J では最大荷重が 31.6~32.6kN 程度であり、3 回の平均値と比較すると 300J/200J が 1.37 であった。荷重のピークの位置と零となる時間は 200J とほぼ同様である。図-3(c)の 400J では最大荷重が 39.6~41.5kN で平均値の 400J/200J は 1.74 でその波形の傾向も 300J とほぼ同様であった。

以上のことから、衝撃荷重の増加の程度は位置エネルギー比と同じではなく、90%程度の増加率となっており、その理由は RC 梁供試体の剛性、支持条件や制震ゴムの影響が複合したものと察される。ただし、荷重の作用時間は位置エネルギーの大きさに拘わらずほぼ同等の 5~40msec の範囲で実質 35msec 程度となっており、RC 梁供

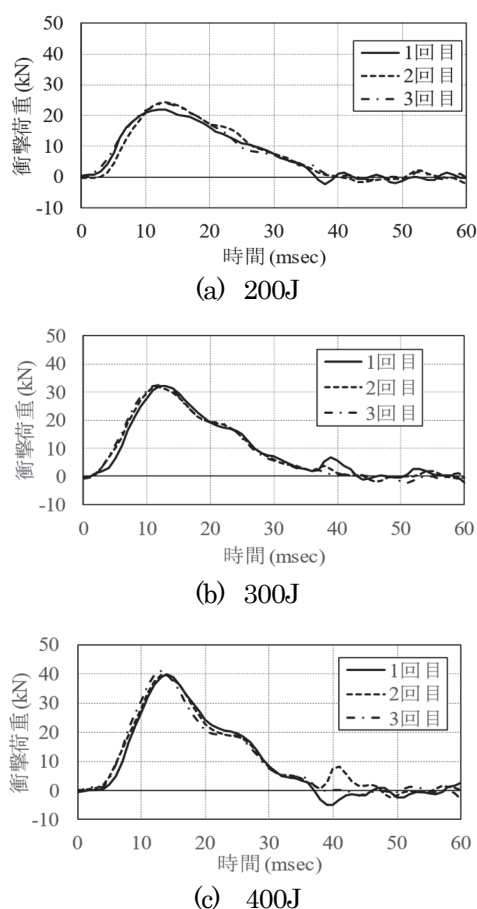


図-3 装置Aによる位置エネルギー毎の荷重曲線

試体の半周期よりも大きいことから、動的な影響を考慮する必要はないと考えられる。

(2) 変位の発生状況

図-4 は位置エネルギー毎の変位曲線を示したもので、図-4(a)の 200J では加速度波形を 2 階積分した上面変位の最大値の平均が 2.1mm でレーザー変位計による下面変位のそれが 1.7mm でありその比（上面/下面）が 1.2 であった。図-4(b)の 300J では上下面変位の平均がそれぞれ 2.5mm と 2.4mm でその比は 1.0 である。同様に図-4(c)の上下面変位の平均は 2.7mm と 2.8mm でその比は 1.0 であった。供試体の挙動の共通点として、何れの波形でも荷重がピークを迎えた後の 20msec 付近で変位がピークとなり、荷重が零で変位波形が変化していることと、位置エネルギーが大きくなると RC 梁供試体の上方向のそり変形も大きくなっていることが確認された。

以上のことから、下面側のレーザー変位計の計測値が正しいとすれば、位置エネルギーは大きくなる方が支持条件などの影響が低減することでその精度が確保されることが窺える。

3.2 装置Bによる載荷試験（重錘バネ解放力付加）

(1) 荷重作用

装置Bによる位置エネルギー毎のロードセルで検出された荷重曲線を図-5 に示す。図-5(a)の 200J によれば

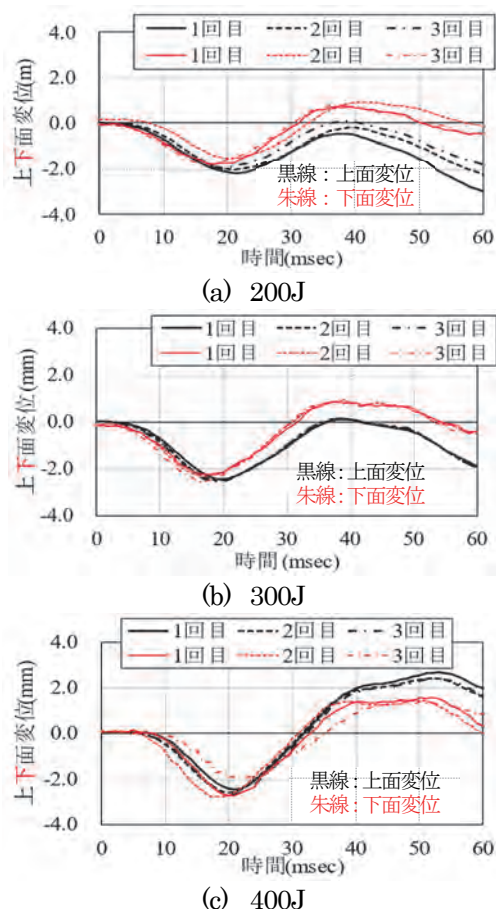
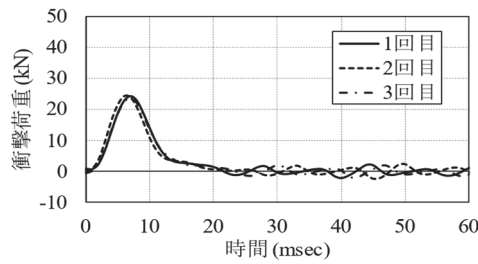
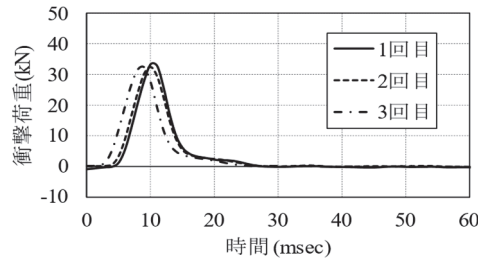


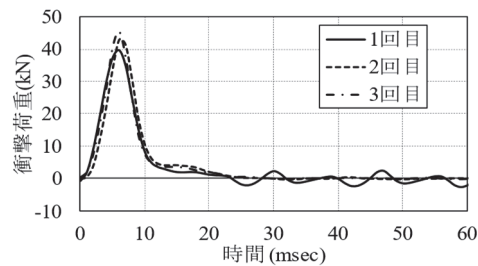
図-4 装置Aによる位置エネルギー毎の変位曲線



(a) 200J



(b) 300J



(c) 400J

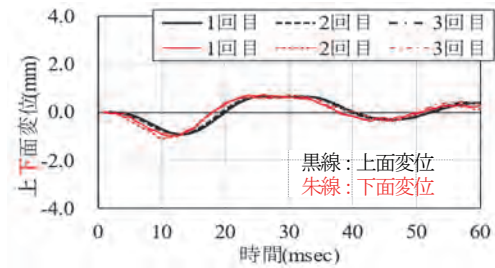
図-5 装置 B による位置エネルギー毎の荷重曲線

最大荷重は 23.7～24.1kN 程度となっており、6～8msec でピークを迎え 13msec 付近で勾配が変化し 20msec を超えて零になっている。図-5(b)の 300J では最大荷重が 32.4～33.5kN 程度であり、3 回の平均値と比較すると 300J/200J が 1.37 であった。荷重の立ち上がり位置からピークの位置と零となる時間は 200J とほぼ同様である。図-5(c)の 400J では最大荷重が 39.5～45.6kN で平均値の 400J/200J は 1.79 でその波形の傾向も 300J とほぼ同様であった。

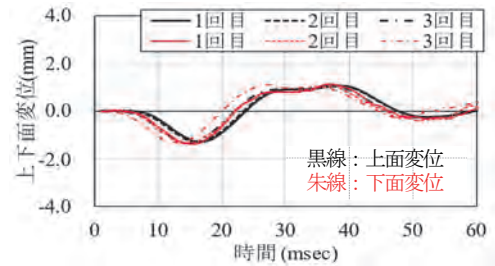
以上のことから、衝撃荷重の増加の程度は位置エネルギー比と同じではなく、90%程度の増加率であり、荷重に関する傾向は装置 A と同等であると言える。ただし、荷重の作用時間はピーク後の変化点までとすると 13msec 程度で、RC 梁供試体の半周期よりも小さいことから、動的な影響を考慮する必要があると考えられる。

(2) 変位の発生状況

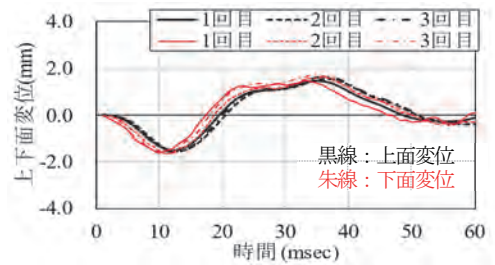
図-6 は位置エネルギー毎の変位曲線を示したもので、図-6(a)の 200J では加速度波形を 2 階積分した上面変位の最大値の平均が 0.9mm でレーザー変位計による下面変位のそれが 1.0mm でありその比 (上面/下面) が 0.9 であった。これは装置 A と異なる現象となっているが作用荷重が小さいため有意な差とは考えにくい。図-6(b)の 300J では上下面変位の平均がそれぞれ 1.3mm と 1.3mm でその比は 1.0 である。同様に図-6(c)の上下面変位の平



(a) 200J



(b) 300J



(c) 400J

図-6 装置 B による位置エネルギー毎の荷重曲線

均は 1.6mm と 1.6mm でその比は 1.0 であった。何れの波形でも荷重の立ち上がりからピークを迎えた後の 13msec 付近で変位がピークとなり、荷重が変化する位置で変位がピークを迎えていることと装置 A よりも値は小さいが位置エネルギーが大きくなると RC 梁供試体の上方向のそり変形も大きくなっている。

3.3 装置の違いによる载荷状態

自然落下の装置 A ではその荷重作用時間と RC 梁供試体の固有周期から、前述の通り動的な影響を考慮する必要はないと考えている。一方、接地時の速度が大きくなっている装置 B では装置 A とは载荷状態が異なっていることが分かった。即ち、コイルバネにより初速を向上させた影響で RC 梁供試体の固有周期を下回る荷重作用時間となることで、RC 梁供試体の荷重に対する変形が進展している途中で荷重が零になるという現象により変位が装置 A よりも小さくなっている。したがって、本研究で採用した梁供試体のような固有周期を有する構造体で装置 B による衝撃荷重载荷試験を実施する場合には動的影響を考慮する必要がある。

変位の発生状況では、装置 A、B の双方ともに位置エネルギーが小さい 200J の場合に 2 階積分で得られる上面変位とレーザー変位計の取得値が異なる結果となった。詳細の理由は検討の必要があるが、RC 梁供試体の特性

や支持条件による影響が推察される。位置エネルギーが大きい場合にはその影響が小さいため、実橋計測ではそれを考慮する必要があると考えている。

4. 衝撃荷重載荷試験と静的載荷試験との比較

静的載荷試験と衝撃荷重載荷試験の比較としてそれぞれの試験結果の荷重－変位関係を示したものが図－7 である。図中の変位は加速度波形から2階積分して得られた値である。動的載荷は静的載荷と異なり制振ゴムの影響等があり、厳密にはその関係を取得データをそのままに評価することは困難ではあるものの、ここでは参考として比較する。

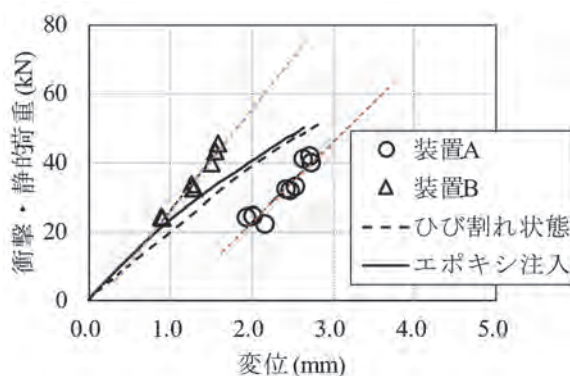
静的載荷試験の結果は、ひび割れ状態とエポキシ樹脂注入後の双方を示しており、注入後の方が若干ではあるものの初期剛性が向上していることが認められる。また、図には衝撃荷重を載荷する装置A、装置Bのそれぞれの結果に線形近似する直線を追記している。

図によれば3段階の位置エネルギーに対応する小さい荷重域であれば静的載荷と装置Bがほぼ同等となっているが、装置Bは装置Aと比較して荷重が大きくなると変位が小さくなる傾向にある。逆に装置Aでは荷重が小さい場合には静的載荷とは異なるが、荷重が大きくなると静的載荷と同等になることが窺える。ここで、装置Bを先行して実験したことが装置Aの結果に影響を及ぼしている可能性があるものの、前述の通り若干の初期剛性の向上程度であり問題は無いと考えている。静的載荷との比較に関しては、支間の変更や載荷荷重の拡大による追加試験を計画しており、実橋での載荷を考慮したより詳細に衝撃荷重載荷との関係を検討する予定である。

5. まとめ

本研究では衝撃荷重載荷試験で採用している制振ゴムを設置した衝撃荷重載荷試験の特性を把握するものとして、RC梁供試体を制作して衝撃荷重載荷試験と静的載荷試験を実施し、それぞれの結果を比較した。ここで比較した衝撃荷重載荷試験装置は自然落下型と重錘質量を減じて圧縮コイルバネによる開放力を付加した衝撃エネルギーが同等となる装置の2種類である。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 重錘が自然落下する装置Aの試験結果より、衝撃荷重の増加の程度は位置エネルギー比と同じではなく、90%程度の増加率であった。荷重の作用時間は位置エネルギーの大きさに係らずほぼ同等でRC梁供試体の固有周期よりも大きいことから、動的な影響を考慮する必要はないと考えられる。また、変位の比較からは、位置エネルギーは大きくなる方がその精度が確保されることが分かった。
- 2) コイルバネにより初速を向上させている装置Bの試



図－7 静的載荷試験と衝撃荷重載荷試験との比較

験結果より、衝撃荷重の増加の程度は位置エネルギー比と同じではなく、90%程度の増加率となっており、荷重に関する傾向は装置Aと同等であった。ただし、荷重の作用時間はRC梁供試体の固有周期よりも小さいことから、動的な影響を考慮する必要があると考えられる。

- 3) 比較的小さな荷重域であれば静的載荷と装置Bがほぼ同等となっているが、装置Bは荷重が大きくなると装置Aと比較して変位が小さくなる傾向にあり、逆に装置Aでは荷重が小さい場合には静的載荷とは異なるが、荷重が大きくなると静的載荷と同等になると推察される。

謝辞

実験・検討に当たっては北陸・道路メンテナンス会議に設置された「道路橋の維持管理における各構成部材の限界状態ならびにAI技術の活用に関する検討ワーキンググループ」の委員の他、金沢大学構造工学研究室の西川氏をはじめとする多くの学生の皆様にご協力いただいた。また、ショーボンド建設株式会社補修工学研究所の木田氏には梁供試体のひび割れ注入でご協力いただいた。ここに謝意を表します。

なお、本研究は公益財団法人JKA補助事業（競輪）の助成を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 35，道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，pp.40-43，2020.
- 2) 山口啓，栗橋祐介，榊谷浩，横山広，黒崎智治：衝撃加振による合成鉄桁橋コンクリート床版のたわみ分布評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.68A，pp.782-792，2022.
- 3) 横山広，牧祐之，栗橋祐介，榊谷浩，藤田博樹：道路橋床版における衝撃荷重載荷試験の評価手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.70A，pp.753-761，2024. (2024年7月12日受付)