

路面段差部に作用する自動車衝撃荷重の特性

CHARACTERISTICS OF DYNAMIC WHEEL LOADS ACTING ON BUMP

横山功一^{*} 井上純三^{**} 永原 隆^{***}

by Koichi YOKOYAMA, Junzo INOUE and Takashi NAGAHARA

With the trend towards heavier and larger freight vehicles in recent years, the intensity of dynamic loads on road structure due to moving vehicles is increasing more and more. It results in damage to road pavement and the bridge floor slab. In order to solve these problems, experimental studies on dynamic loads are carried out in terms of road flatness, travelling speeds and structural characteristics of vehicles. The weighbridge installed in the Laboratory's test track is used to measure the dynamic loads. The height of the weighbridge platform above the road surface is adjustable to study the effects of road surface irregularities on the dynamic loads. In addition, the vehicle-mounted measuring equipment is utilized to measure the intensity and the influence area of the dynamic loads after passing over the stepwise bumps. The measurements showed that the intensity is large and the influence area is wide.

1. まえがき

近年の交通量の増大、走行車両の大型化、高速化に伴い橋梁などの道路構造物は厳しい自動車荷重条件下に置かれている。この自動車荷重と載荷頻度の増大は、これらの作用を直接的に受ける床版や伸縮装置の損傷の要因となる他、車両の走行性を損い、交通振動や騒音の原因ともなっている。特に伸縮装置近傍の路面は舗装の摩耗や橋台背面の沈下により極端な段差が生じやすく、走行車両による衝撃は一般路面に対するよりも大きくなっている。

走行車両による動的影響は路面平坦性の他、車両振動特性、橋梁の動的応答特性などの複雑な要因に係わるが、橋梁設計では設計活荷重に対して定められた衝撃係数によりこの影響を考慮している。自動車荷重(T荷重)に対して設計される部材では、自動車荷重の変動が発生応力値に直接関係するため、衝撃の影響は最大発生応力に対する照査だけでなく、繰返し載荷による疲労に対する照査においても重要な検討事項となる。このような状況のもとで橋梁路面、とりわけ伸縮装置部に作用する自動車荷重の実態調査が望まれている。

* 工修 建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
 ** 工修 建設省土木研究所構造橋梁部構造研究室研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
 *** 建設省四国地方建設局富郷ダム工事事務所 (〒799-04 香川県伊予三島市中曾根町1652-1)

自動車衝撃荷重による部材応答に関する実測としては、土木研究所¹⁾²⁾、阪神高速道路公団³⁾が行った鋼床版衝撃実験、土木研究所⁴⁾、日本道路公団⁵⁾が行ったRC床版衝撃実験がある。これらは床版にゲージを設置し、段差走行試験時の床版の応答を測定して自動車衝撃荷重の影響を調べたものである。一方、自動車衝撃荷重を計測するために車両側に加速度計・ひずみゲージを取りつけ演算する方法が開発されており、一連の研究が J. Page⁶⁾ (T R R L) ならびに土木研究所⁷⁾により行われている。

本文ではまず自動車衝撃荷重の橋梁、環境への影響について整理する。次に自動車衝撃荷重を直接的に計測するために埋設型の計測装置(車両衝撃力測定装置)を新しく製作し、これを用いて路面段差部に作用する自動車衝撃荷重の特性を段差量、車種、車速などとの関係で明らかにした。また、車両側からの衝撃荷重測定も行ない、測定法の妥当性を確認した。最後に、車両側から計測された衝撃荷重より、段差通過後の荷重の分布特性についても明らかにした。

2. 自動車衝撃荷重の影響

通常、車両が走行した時には、路面あるいは橋のたわみ変形や路面の凹凸に起因して車両振動が誘起され、車両からは静荷重に加えて動的変動分が路面に作用する。

車両側の要因としては車両振動特性、走行速度、車両重量などが考えられる。車両振動特性とは車両の質量、ばね、減衰特性を指し、車種やサスペンションの形式によっても異なる。また積載状態によって車両のばね、減衰特性も変化するとされる。

このような動的衝撃荷重は次のような影響を及ぼす。

(1) 伸縮装置に対する影響

伸縮装置の損傷の第一の原因は過積載車の通行に代表されるような予想以上の交通量の増加や車両の大型化による作用荷重と積載頻度の増大であり、さらにチェーンやスパイクタイヤなどによる舗装の摩耗や橋台背面の沈下により路面に段差が生じ、その結果走行車両による衝撃が増大していることが挙げられる。その他、形式、種類の選定の不適切さ、設計、施工上の問題、維持管理上の問題などいくつかの条件の複合作用が関係している。

伸縮装置本体の損傷内容としては、ゴム系伸縮装置ではゴムの陥没、剥離、取り付け金具の破損が主であり、一方鋼製伸縮装置では機能上欠陥となる損傷は少ない。本体以外では伸縮装置と舗装との間に段差が生じたり、後打ち材にクラックが入るものもある⁴⁾。

(2) 床版に対する影響

鉄筋コンクリート床版の破損に係わる因子は伸縮装置の破損要因と類似しており、伸縮装置ほど極端でないが衝撃の影響も大きい。床版の設計では輪荷重の0.4倍程度の荷重を衝撃による増分として見込んでいるが、路面舗装が良好な状態に保たれていない場合には床版への作用力は相当大きくなる。伸縮装置や床版目地の近傍は路面の不整を生じやすく、したがって大きな衝撃を受けやすいためにその部分の床版に破損をきたしている例も多い。

(3) 振動、騒音、走行性

自動車動荷重は交通振動や騒音発生の原因となる。都市内高速道路高架橋では、桁の振動や伸縮装置通過時の衝撃が、支承、橋脚、基礎を介して地盤に伝播し、地盤やその上の家屋を振動させる。また、段差通過時に衝撃音が生じたり、車両の走行性を損なう原因となっている。

3. 段差走行試験

路面段差部に作用する自動車衝撃力の特性を明らかにするために人工段差を用いた荷重車走行試験を行った。自動車荷重の計測は土木研究所試験走路内に設置した車両衝撃力測定装置を用いた。本装置は図-1に示すような一種の埋設型荷重測定装置で鉛直・水平方向の衝撃力を測定することができる。また衝撃力に影響を及ぼす段差量を変えることができる。走行車両の左右輪に対する路面性状を同一にするため、片側車輪通過位置にダミーの段差板を設けている。

試験では衝撃力に影響を及ぼす段差量、車種、車両重量、速度を変化させて段差に作用する鉛直および水平力を測定した。図-2に荷重車の軸重、軸配置を示した。また、荷重車には加速度計をとりつけ車体振動も計測し、後で車両側からの荷重も算定した。

試験条件は次のとおりである。

- 車種：2軸トラック、3軸ダンプトラック、5軸セミトレーラ
- 車速（V）：10～75 km/h
- 積載荷重（W）：0～20 tf
- 段差量（H）：0～30 mm

4. 人工段差部に作用する自動車荷重

荷重車走行試験の結果、図-3に示すような輪荷重波形出力が得られた。装置の固有振動数と考えられる高い振動数のノイズはローパスフィルターで除去し、最大値を読み取った。

以下に動輪荷重、動的係数と段差量、車両走行速度、積載荷重との関係を調べた。

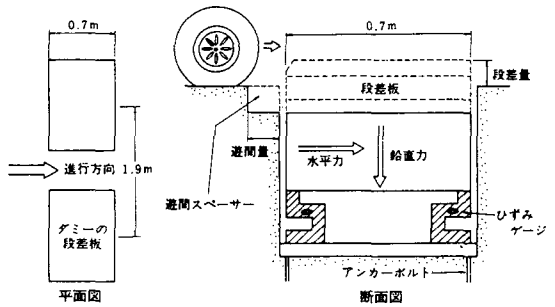
ここで動的係数 i は次のように定義した。

$$i = F_d / F_s - 1 \quad \dots (1)$$

ここに F_d ：動輪荷重、 F_s ：静輪荷重である。

また動輪荷重から静輪荷重を差し引いた成分を動的付加荷重と呼ぶことにする。

荷重車として満載時重量が20 tf（自重10 tf、積載荷重10 tf）の3軸ダンプトラック（以下3軸車と呼ぶ）の、静的な輪荷重の値が最も大きい中軸左輪荷重の試験結果が代表例として図-4に



車両衝撃力測定装置の主な仕様

ロードセルの方式	ひずみゲージ式
荷重測定範囲	鉛直、水平共に0～30 tf
精度	静荷重 ±1%FS以内 (FS: 10 tf) 動荷重 ±5%FS以内 (FS: 10 tf)
段差量調整範囲	－30～＋40 mm (5 mm ピッチ)
遊間量調整範囲	5～105 mm (20 mm ピッチ)
使用温度範囲	－5～＋40 °C
固有振動数 (段差板を除く)	鉛直方向 120 Hz 水平方向 85 Hz

図-1 車両衝撃力測定装置

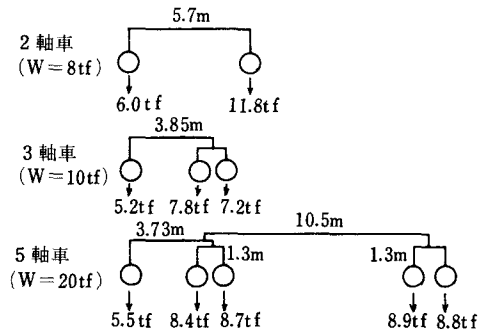


図-2 荷重車

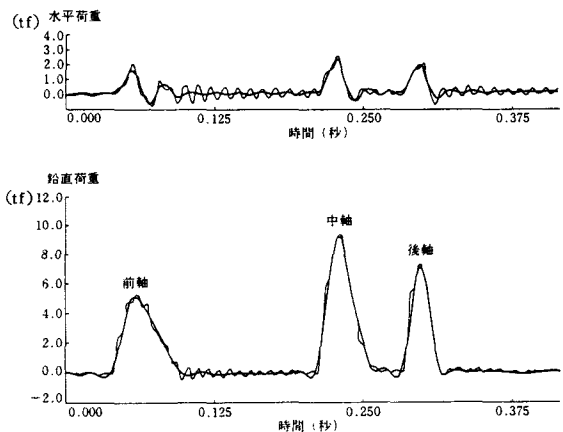


図-3 装置側の時系列データ図

とりまとめられている。

(a) 段差量の影響

段差がない場合には動的付加荷重はほとんど0であり、段差量が大きくなると輪荷重も増大する。動的係数は段差量に対して比例的に増大している。すなわち、段差により非常に大きな輪荷重が路面に作用することが分かる。

(b) 速度の影響

速度が増加すると輪荷重も増大するが、速度が高くなるほどその増加率は低減している。

(c) 積載荷重の影響

積載荷重が大きいかほど輪荷重値自身は大きくなるが、動的係数でみると積載荷重が大きいかほど小さくなっているという逆の傾向を示す。例えば動的係数は積載荷重0 t fのときは10 t fのときの約3倍になっている。この結果として、段差量20 mm程度の場合、無積載の場合でも満載時の7～8割程度の輪荷重が作用することになる。すなわち、疲労やRC床版の損傷のように自動車荷重の繰返し作用によりもたらされる損傷の検討には、車両重量分布のみでは不十分であり、この動的効果特性を考慮する必要がある。

また段差量を一定($H=20\text{ mm}$)として図-4から動輪荷重値を比較できるようにグラフを重ね合わせたものが図-5である。縦軸は輪荷重の動的増分(動的付加荷重)とし、静荷重を含めていない。動的付加荷重は積載荷重 W が0～10 t fに変化してもほとんど変わらないことが分る。すなわち動的付加荷重には積載荷重は影響しない。換言すると一般路面部のように波長の長い路面凹凸の場合と異なり、伸縮装置のような波長の短い段差部では動的付加荷重は主に荷重車のばね下の動きによって決まると言える。

(d) 水平荷重

3軸車の中軸左水平輪荷重と動的係数を求めたものを、図-6に示す。段差量、走行速度、積載荷重による影響は鉛直荷重と同様な傾向を示している。水平荷重値が最も大きい積載荷重10 t fの場合について見れば、段差量が20 mm、走行速度が50 km/hで水平荷重は1.5 t f程度と静輪荷重の4割程度の値となっている。

(e) 車種の影響

同様な段差走行試験を総重量が約18 t fの2軸トラック(以下2軸車と呼ぶ)および総重量が約40 t fの5軸セミトレーラ(前1軸、中2軸、後2軸、以下5軸車と呼ぶ)に対して行った結果を図-7に示す。着目車輪は2軸車は後軸左、5軸車は第2軸左とした。3軸車、2軸車、5軸車で比較すると、動的係数は2軸重が一番小さいが輪荷重値は2軸車が一番大きくなる。これは総重量では2軸車が最も小さいものの、タンデム軸を持つ3軸車、5軸車に比べて1軸当りの荷重が大きくなることによるためである。

ただし、積載荷重の影響に見られたように、段差部に作用する衝撃荷重の大きさにはばね下部の影響が大きいことから車種の違いよりも軸重の違いにより動的係数が変化していると考えられ、ほぼ同じ軸重で比較すると車種の影響は小さいと考えられる。

(f) 車軸の影響

図-8は3軸車の前、中、後軸の輪荷重を示したものである。前軸輪荷重は車速の増加とともに単調に増加する。一方、タンデム軸となっている中軸、後軸の輪荷重は静荷重をほぼ均等に分担しており、動荷重の傾向に差が生じている。すなわち、中軸輪荷重が凸凹しながらも増加傾向にあるのに対し、後軸は高車速領域で低下する様子が見られる。これは、段差(幅70 cm)乗り越え時のタンデム軸(軸距1.3 m)の動きに起因しているものと推定される。

同様な傾向は車種が異なるケースでも見られた。すなわち、2軸車前、後軸は3軸車の前軸と同じ単調な傾向となる。一方、5軸車はトラクタ部とトレーラ部に分けると、トラクタ部が3軸車と、トレーラ部は3軸車の中、後軸と対比できるような様子がうかがえる(図-9)。

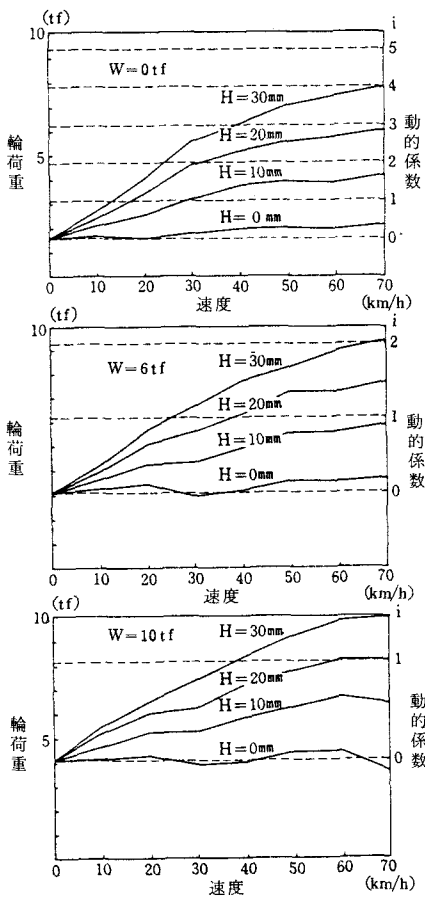


図-4 3軸車段差走行試験結果

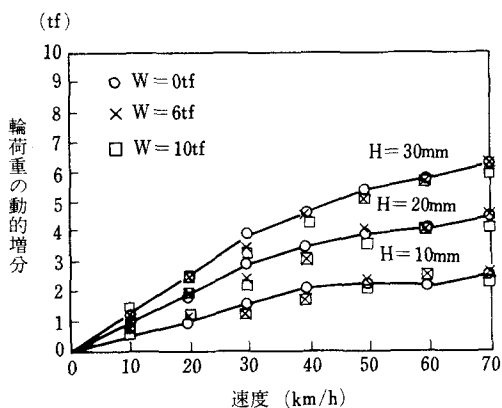


図-5 積載荷重の影響 (3軸車)

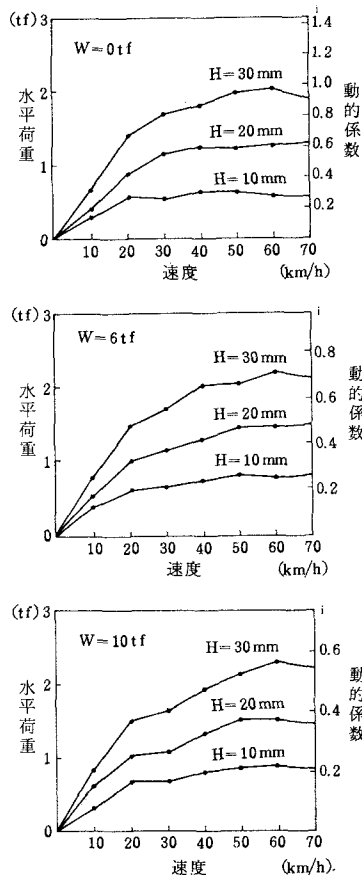


図-6 3軸車段差走行試験結果 (水平荷重)

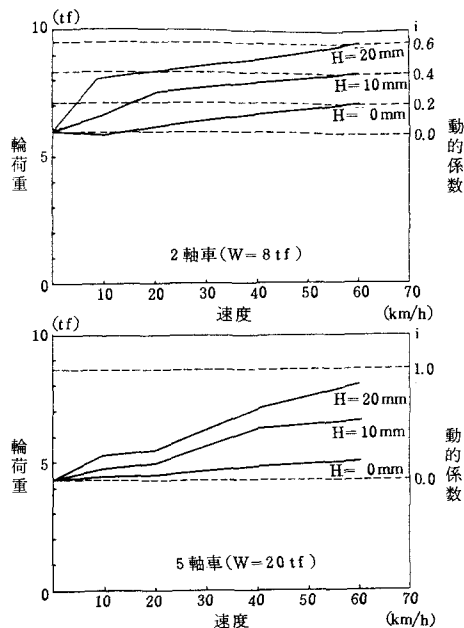


図-7 2軸車, 5軸車段差走行試験結果

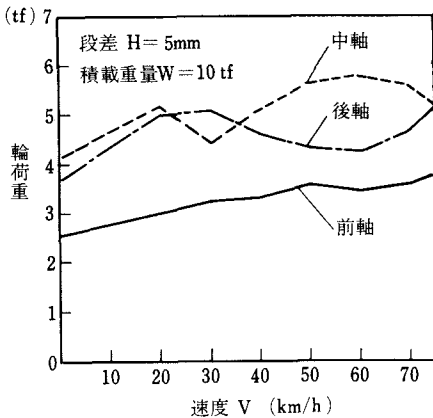


図-8 3軸車の軸による動輪荷重比較

5. 車両側からの動荷重測定法

路面側に設置した荷重測定装置を用いて実路面に作用する動荷重を測定することは次のような制約がある。

(1) 装置上ごく短い距離でしか荷重を測定することができない。

(2) 装置上またはその近傍の路面凹凸に対して試験が可能であるが、それ以外の任意の、また、自然の路面凹凸に対する試験ができない。

このため、動荷重を車両側から測定する方法が研究されている⁶⁾⁷⁾。図-10は計測法の概要図である。車体を図に示される振動系として取り扱い、車体のばね上ばね下の振動を取り付けた加速度計で計測する。その加速度を用いて計算により動荷重を算出する。なお、当初はばね下の加速度と車軸のひずみにより動荷重を測定する方法⁷⁾がとられた。

静荷重からの変動成分である動的付加荷重は、車両のばね上(車体)、ばね下(車軸)の加速度から次のように求められる。

$$F_L (\text{左車輪の動的付加荷重}) = M_{UL} \cdot Z_{UL} + M_{LL} \cdot Z_{LL} \dots (2)$$

$$F (\text{軸の動的付加荷重}) = F_L + F_R \dots (3)$$

ここに M_{UL} は左ばね上質量、 M_{LL} は左ばね下質量、 Z_{UL} は左ばね下加速度、 Z_{LL} は左ばね下加速度、 F_R は右車輪の動的付加荷重である。

車両側からの動荷重測定方法の検証は J. Page⁶⁾ ならびに、土木研究所⁷⁾ により行われている。土木研究所の場合、車両が静止した状態での起振機加振、タイヤの下

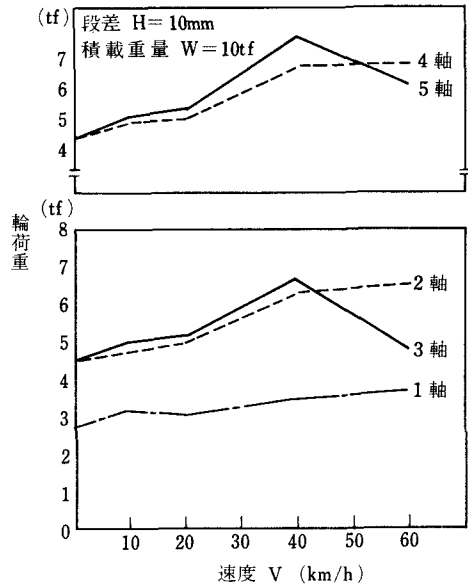


図-9 5軸車の軸による動輪荷重比較

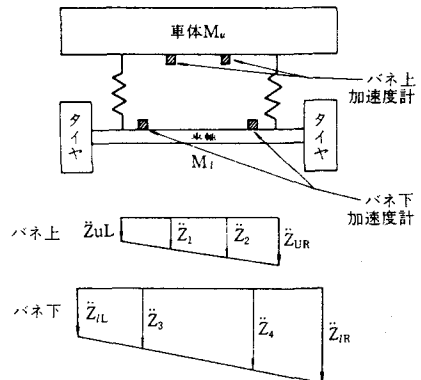


図-10 車両側からの動荷重測定法

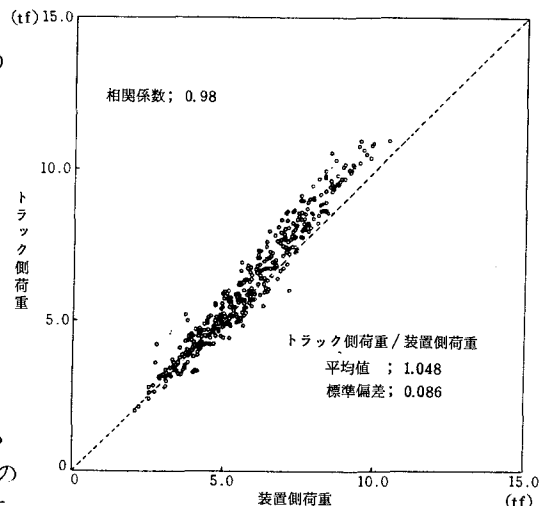


図-11 トラック側と装置側の荷重比較図

のロードセルによる計測を行いよく合うことを確認しているが、走行状態での検証を行っていない。

今回の計測結果より3軸車の中軸輪荷重について装置上で車両側と装置側の最大荷重を比較した(図-11)。装置側の荷重値が7tfを超えるあたりから車両側がやや大きな値を示す傾向が見受けられるが、両者の荷重は相関係数が0.98と非常によい対応を示しており、車両側からの動荷重測定方法の妥当性を走行状態で確認した。

6. 段差通過後の荷重分布

この方法により、段差走行試験において図-12に示すように段差通過後の動的付加荷重変動図が得られた。図-12では動的付加荷重に占めるばね上動的付加荷重、ばね下動的付加荷重のそれぞれの寄与が明らかである。すなわち、段差上ではばね下動的付加荷重が優勢であり、動的付加荷重の大半を占めている。

これは、車両衝撃力測定装置を用いた走行試験結果と対応している。一方、車両が段差を通過した後ではばね上振動も加わり、動的付加荷重のピークはばね上とばね下の振動の相乗作用により決まってくる。

これらのデータより段差通過後の荷重分布を得るために、ピーク荷重(極大値)とその作用位置を求めた。3軸ダンプトラック(積載荷重10tf)の中軸左輪荷重について求めた段差別の荷重分布図を図-13に示す。斜線部は段差板(装置)上であり、その後方の路面部には段差部よりも大きな荷重が作用していることがわかる。

今回の試験結果(3軸車)では、段差部から2m、8mにピークが見られ、ばね上荷重の第1、第2ピークに対応している。図-14は走行速度別の荷重分布包絡線を示したものである。段差量別の包絡線では荷重値に差があるものの影響範囲はほぼ一致しているのに対して、走行速度別の包絡線は高速になるにつれて影響範囲が広がり、荷重分布性状も変化している。

仮に段差量が20mmの場合、動的係数 $i=1$ を考えると影響範囲は15m近くまで及んでおり、実橋で考えると伸縮装置だけでなくその近傍の床版に対してもかなりの動荷重が作用することになる。特に短スパン橋梁では伸縮装置通過時の衝撃がスパン全体に及ぶ可能性がある。

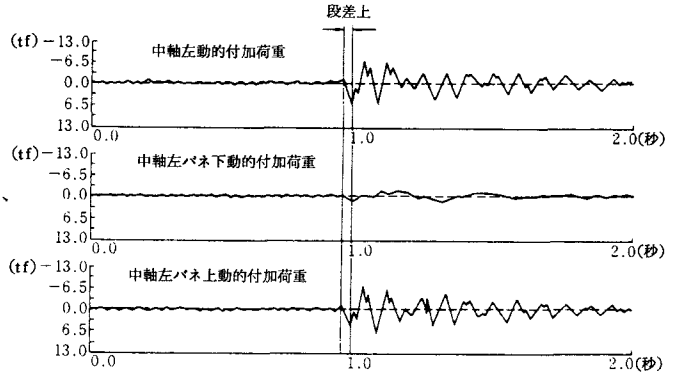


図-12 段差通過後の動的付加荷重

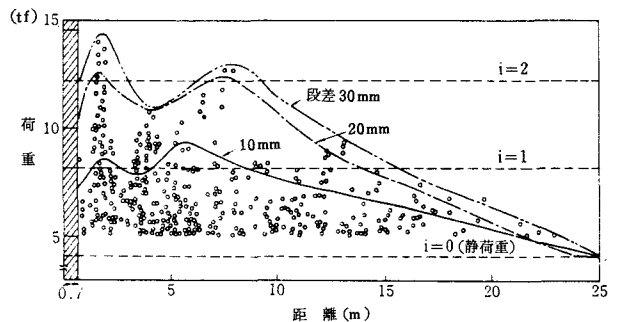


図-13 段差部通過後の荷重分布及び段差量別包絡線

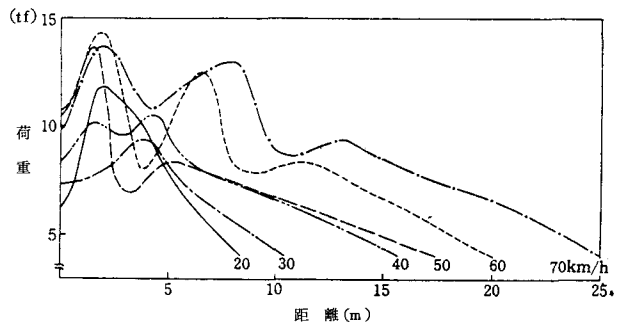


図-14 走行速度別の荷重分布包絡線

7. 結論

土木研究所試験走路に路面段差部に作用する自動車衝撃荷重を実測するために車両衝撃力測定装置を設置し、荷重車走行試験を行った。その結果、次のような結論が得られた。

(1) 新たに、設置した車両衝撃力測定装置により路面段差部に作用する輪荷重が測定されるようになった。特に従来計測例の少ない水平力についても有用なデータが得られた。この段差部に作用する水平輪荷重は、鉛直方向の動輪荷重の $1/2 \sim 1/3$ であり、伸縮装置の損傷問題などでは無視し得ない荷重である。

(2) 路面に段差がない場合には輪荷重に含まれる動的成分は少ない。一方、段差がある場合には輪荷重は増大し、静輪荷重の数倍となる動輪荷重が計測されるケースもあった。このように動的効果に及ぼす段差の影響の大きいことが確認された。また、動輪荷重の大きさに及ぼす車速、車種の影響を明らかにした。

(3) 動輪荷重は積載荷重を増加させた場合もほぼ一定値となった。このことより、動輪荷重の大きさの決定には主として車両のバネ下部の動きが支配的であると言えることができる。

また、動輪荷重が積載荷重によらず一定と言うことは、動的係数 i は積載荷重が小さいほど大きくなる訳で、疲労やRC床版の損傷のように自動車の繰返し作用による現象を検討する場合には、車両の重量分布のみでは不十分であり、この動的効果特性を考慮しなければならない。

(4) 車両側から自動車衝撃荷重を測定する方法を車両衝撃力測定装置を用いて検証した。その結果、段差のような路面凹凸に関しても両者の対応はかなり良好であり、計測方法の妥当性が確認された。

(5) この方法を用いて、段差通過後の路面に作用する自動車衝撃荷重の大きさ、影響範囲を明らかにした。段差部に起因する衝撃荷重は段差部ばかりでなく、段差部近傍の広い範囲に影響を及ぼす可能性があることが指摘された。

謝辞

土木研究所においては昭和40年代後半より橋梁の設計動荷重に関する研究を進めて来ており、本研究はその一部を構成するものである。計測法、装置の開発、データの蓄積は多くの構造研究室関係者の努力によっている。ここに記して感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 金井道夫・佐藤和徳；橋梁活荷重の信頼性解析，土木研究所資料，第1865号，昭和57年7月
- 2) 横山功一，井上純三，永原 隆；橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書〔Ⅰ-1987〕土木研究所資料第2426号，1987. 1
- 3) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター；阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究，設計荷重（HDL）委員会報告書，昭和61年12月
- 4) 横山功一，井上純三，永原 隆；橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書〔Ⅱ-1987〕土木研究所資料第2508号，1987. 11
- 5) 日本道路公団伸縮装置改良委員会；伸縮装置調査研究（その4）報告書，昭和49年3月
- 6) J. Page, J. W. Grainger; A technique for measuring vehicle dynamic wheel loads, Transport and Road Research Laboratory, TRRL SR98UC, 1974.
- 7) 成田信之，池村雅司，水口辰夫；橋の構造特性に関する試験調査報告書，土木研究所資料第1024号，1975. 3.
(1988年10月12日受付)