

コンクリート道床軌道に使用された軌道パッド の効果について

ON THE EFFECTS OF THE TRACK PADS LAID IN THE RAILWAY TRACK ON SOLID BED

小野 一良*・伊藤 義男**
By Kazuyoshi Ono and Yoshio Ito

1. 緒 言

従来建設された多くの長大な鉄道トンネルにはコンクリート道床が施工された場合が多く¹⁾、今後はトンネル内に限らずますます広くコンクリート道床軌道が採用される傾向にある。コンクリート道床として従来は現場打ちに限られていたが、山陽新幹線建設を契機としてプレキャストコンクリートによるスラブ軌道が開発された²⁾。一般にコンクリート道床軌道においては軌道の保守作業が軽減されるが、従来建設されたコンクリート道床軌道においてはレールに波状磨耗を発生したことがある。これはコンクリート道床軌道の剛性が大きいためであると称されている。特に木の短まくらぎを埋め込んだコンクリート道床においてはしばしばまくらぎとコンクリート道床との間の縁が切れてまくらぎに浮きを生ずることがあり、またタイプレートに接触するまくらぎ表面が磨滅する場合がある。このような状態になれば軌道の完全な修復は困難であり、また波状磨耗の発生の原因にもなると考えられる。

砂利道床においては一般に軌道パッドをレールとタイプレートの間またはレールとPCまくらぎとの間に挿入するが、従来建設された多くのコンクリート道床軌道においては軌道パッドをレールとタイプレートの間およびタイプレートとまくらぎの間の両方に挿入して軌道の受ける衝撃の緩和をはかっている。この論文においては今後レールとタイプレートとの間に挿入された軌道パッドをレールパッドと呼び、タイプレートとまくらぎとの間に挿入された軌道パッドをタイパッドと呼んで区別する。

北陸線深坂トンネル上り線においては開通以来数年で全延長にわたりレールに波状磨耗を発生したが³⁾、北陸

トンネルにおいては昭和 37 年 6 月開通以来現在に至るまでほとんど波状磨耗を発生していない。このような差を生じた原因としては、深坂トンネルにおいては厚さ 5 mm のタイパッドが使用され、北陸トンネルにおいては厚さ 12 mm のタイパッドが使用されていることが考えられる。しかし深坂トンネルにおいても一部に使用されたわく型タイプレート区間には十分に厚い軌道パッドが使用され、また木短まくらぎ自体もコンクリートブロックまくらぎに較べて軟いことを考えれば軌道の弾性だけでは説明がつかない。隣接する木短まくらぎの間に弾性の差があるとき、または浮まくらぎの発生によって車輪走行面に不整を生じたときには車輪とレールとの間の接触圧力に変動を生じ、これが波状磨耗発生の原因になったとも考えられる。

軌道パッドのばね定数に関してはこれまでに多数の測定結果が発表されており^{4),5)}、また種々の堅さの軌道パッドを使用したコンクリートスラブ軌道においてフラット部を有する車輪の走行による衝撃の測定結果が発表されている⁶⁾。今回の論文においてはトンネル内のコンクリート道床軌道に種々のばね定数を持つ軌道パッドを敷設してこれらの効果を比較した結果および試験軌道上に車輪を落下させて衝撃を加え、この衝撃力の大きさおよびそのときに軌道に発生する振動から軌道パッドの効果と比較した結果を述べた。これよりコンクリート道床用軌道パッドとして必要なばね定数を求めようとするのが目的である。

2. 列車通過時にコンクリート道床に生ずる振動の測定

軌道パッドのばね定数の大きさが衝撃の吸収におよぼす効果を知るために深坂トンネルおよび北陸トンネルにおいて延長 25 m に限り次の 2 種類のタイパッドを一定の期間において交互に挿入して列車通過時にレールおよ

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 金沢大学技官 工学部土木工学科

び道床に生ずる振動を測定した。ただし深坂トンネルにおいてはレール交換後1年半以内に測定を行なったので両トンネルともに波状磨耗はあらわれていなかった。これらのトンネルにおける軌道構造を表-1に示す。

表-1において第1種パッドとはばね定数が大きく、単に填材として用いられるパッドであり、第2種パッドとはばね定数が小さく、衝撃の緩和を目的としたものである。この表の最下段に示した軌道の剛度とはまくらぎ間中央のレール面に加えた荷重とレールのたわみとの比であり、レールパッドおよびタイパッドのばね定数を用いて計算した数値である(計算式は文献7)の中の式(118)参照)。厳密に言えば後に述べるごとくレールパッドおよびタイパッドをレール、タイプレートおよびまくらぎの間に挟んでボルトで締め付けたときにはこれらのばね定数はいくらか増加するが、ここではその影響を無視した。またまくらぎおよびコンクリート道床のたわみを0と仮定した。

図-1に両トンネルのコンクリート道床の断面を示し、図-2,3にコンクリート道床用I型およびコンクリート直結III型タイプレートを示した。これらの図に示す

表-1 試験線路の軌道構造

	深坂トンネル		北陸トンネル	
レールタイプレートまくらぎまくらぎ間隔	50 kg N コンクリート道床用I型 木短まくらぎ 570 mm		50 kg P.S コンクリート直結III型 コンクリートブロック 570 mm	
レールパッド	第1, 2 回共通 第2種 厚さ 5 mm ばね定数 133~242 t/cm		第1, 2 回共通 第2種 厚さ 6 mm ばね定数 138~152 t/cm	
タイパッド	第1回 第2種 厚さ 5 mm ばね定数 300 t/cm	第2回 第1種 厚さ 6 mm ばね定数 1040 t/cm	第1回 第2種 厚さ 12 mm ばね定数 58.8 t/cm	第2回 第1種 厚さ 6 mm ばね定数 1250 t/cm
軌道の剛度			99~101 t/cm	

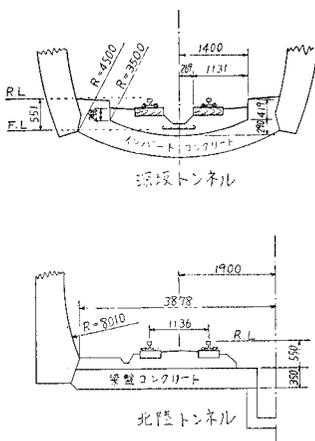


図-1 コンクリート道床軌道断面図

ごとくI型タイプレートは4本のねじくぎを用いて木短まくらぎに締結されるが、III型においては2本のアンカーボルトでコンクリートブロックまくらぎに締結されている。

深坂トンネルにおける測定計器の配置を図-4に示したが、この図で×印をつけたまくらぎは浮きまくらぎである。深坂トンネルにおいては波状磨耗の発生とほぼ時期を同じくして多数の浮きまくらぎが発生したのでコンクリート道床中にボルトを建込みこのボルトによってまくらぎを締め付けている。しかし完全に浮きを止めるこ

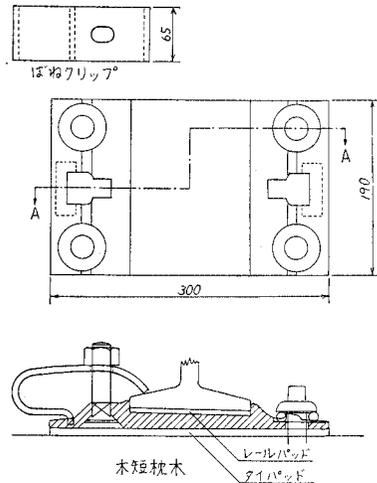


図-2 コンクリート道床用I型タイプレート

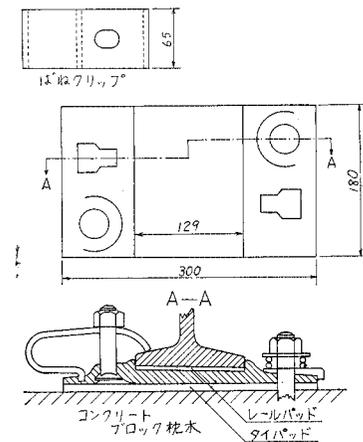


図-3 コンクリート直結III型タイプレート

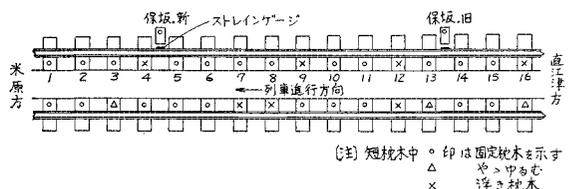


図-4 深坂トンネル内(上り線)測定箇所平面図

とはできず、これらのまくらぎは列車通過に伴って激しい上下動をなしている。

列車通過時に道床に生ずる振動速度測定記録より道床に生ずる振動速度の最大値を電車、ディーゼル動車および客車の各台車ごとに1個ずつ採り、図-5、6に示した。なおこれらの図には電気機関車の各車輪の通過時に生ずる振動速度の最大値もあわせて記入した。ただし平坦部を生じた車輪等あきらかに車輪踏面の欠陥によって生じたと推定される振動は除いた。

いずれの図においても列車速度の増加に伴って振動速度の増加することが認められるが、特に図-6において

電気機関車の通過時に明らかである。深坂トンネル、北陸トンネルともに第1種パッドを使用した場合の振動速度は第2種パッドを使用した場合に較べてはるかに大きいことが認められる。図-5において見られるごとく深坂トンネルにおいてはその差が特にはなはだしいが、これは浮きまくらぎに接して振動計を据え付けたためと考えられる。図-6によって北陸トンネルにおける普通客車の通過時の振動速度を比較すれば第1種パッドの使用時における振動速度は第2種パッドを使用した場合の約2倍に達している。

北陸トンネルにおいてED74型機関車が通過した場

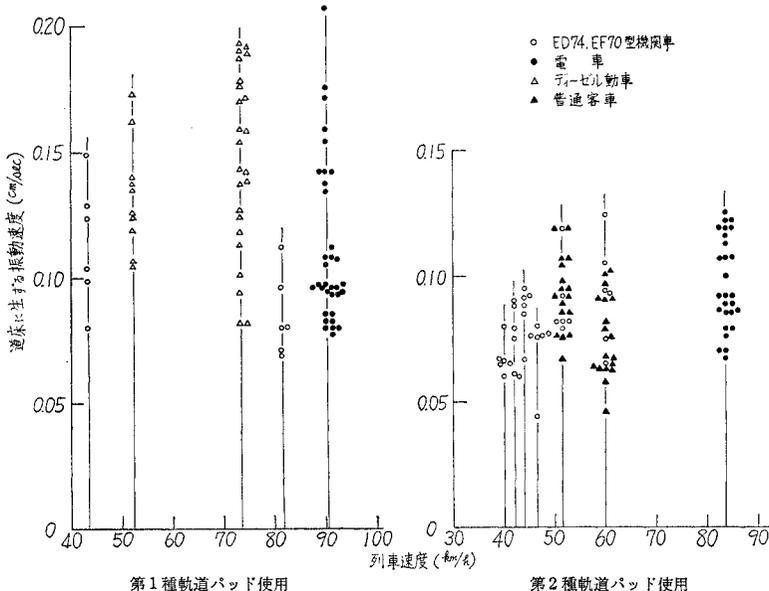


図-5 列車通過時にコンクリート道床に生ずる最大振動速度 (深坂トンネル, まくらぎ番号 4, 5 の間)

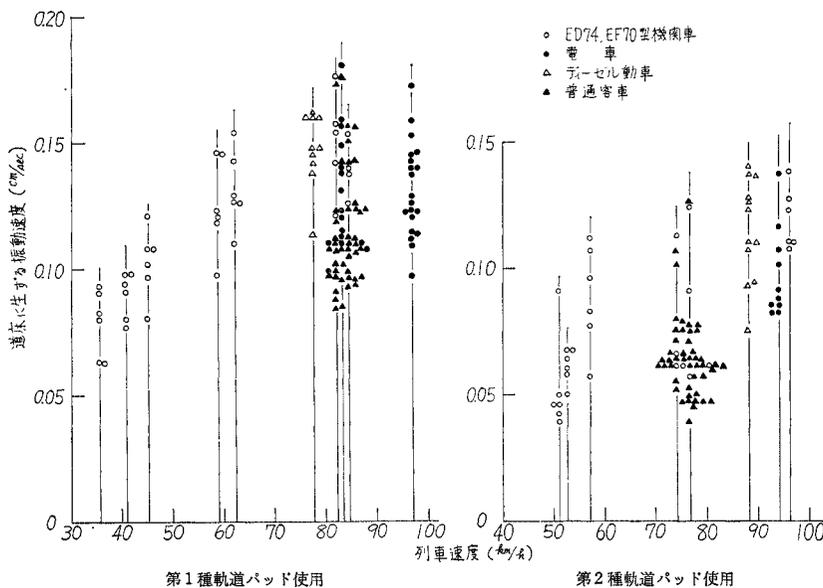


図-6 列車通過時にコンクリート道床に生ずる最大振動速度 (北陸トンネル)

合に道床に生ずる振動速度を測定した記録を図-7, 8に示したが、この場合にも第1種タイパッドを使用した場合(図-8)における道床の振動が第2種タイパッドを使用した場合(図-7)の2倍以上となることが明らかにあらわれている。図-7, 8には加速度計を用いてレールの振動加速度を測定した結果もあわせて示されているが、レールに生ずる振動加速度においては第2種パッドを使用した場合がいくらか大きく出ている。この加速度変換器の固有振動数は 200 c/sec であり、レールに生ずる振動は 200 c/sec 以上の振動数を持っているのでここに得られた記録は加速度の大きさを比較するというよりむしろ振動振幅を比較するのに役立つと考えられる。レールのたわみ量と軌道剛度との積がレールに加わる圧力となるので、道床の振動振幅がレールの振動振幅に較べてはるかに小さいと仮定すればレールの振動振幅と軌道の剛度との積が車輪よりレールに加えられた衝撃力の大きさを代表すると見ることができる。表-1 に示すごとく北陸トンネルにおいて第1種タイパッドを使用した

場合の軌道の剛度は第2種タイパッドを使用した場合に較べて2倍以上になるので、第2種軌道パッドを使用した場合が第1種パッドを使用した場合に較べて振動振幅がいくらか大きく出たとしても、レールに加わる衝撃力は第2種軌道パッドを使用した場合はるかに小さくなる。

3. 試験軌道の構造および軌道パッドの弾性

工学部構内に延長 6 m のコンクリート道床軌道を2面敷設した。1面はコンクリートブロックまくらぎ埋込みとし、他は木短まくらぎ埋込みとした。試験軌道の構造を図-9, 10 および表-2 に示した。これらの試験軌道には表-3 に示すごとく各種の軌道パッドを次々と交換して使用したが、その場合の軌道を表-3 の左に示す名称で呼ぶことにした。

表-3 に示した各種の軌道パッドのばね定数は鉄道技術研究所において国鉄規格による圧縮試験を行なって得

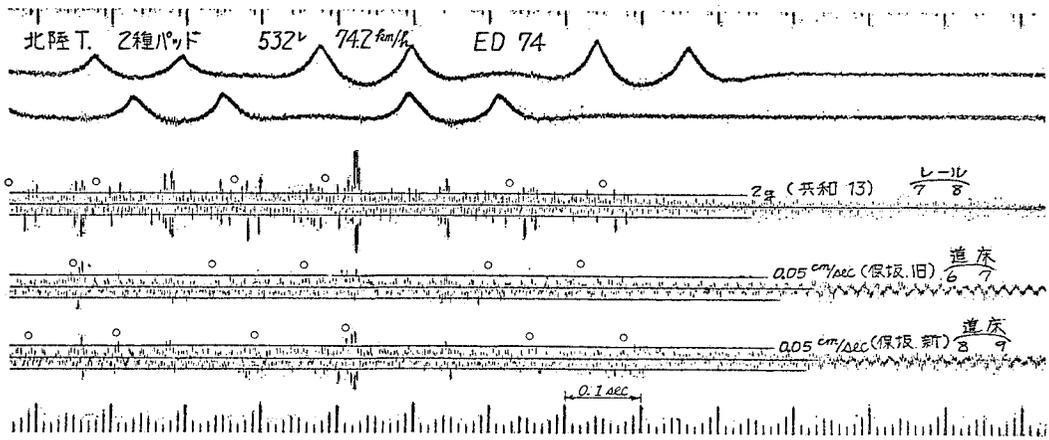


図-7 ED 74 型機関車通過時の振動記録 (第2種タイパッド使用)

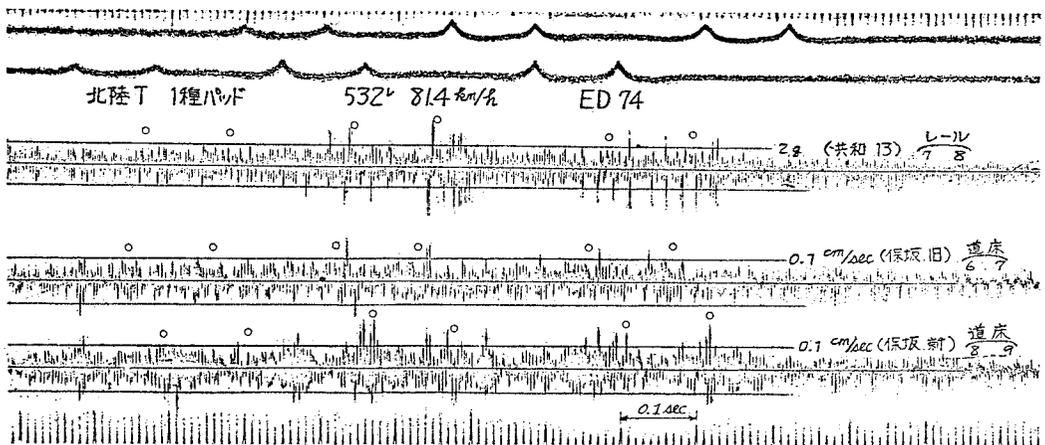


図-8 ED 74 型機関車通過時の振動記録 (第1種タイパッド使用)

た結果であり、直結Ⅲ型軌道に使用する軌道パッドに対して 1~5t における荷重と変形量との関係を図-11 に示した。上記のばね定数はこの間の変形量より計算したものである。これらのばね定数はいずれも単独材料としての数値であるが、レールパッド、タイパッドはそれぞれレールとタイプレートの間またはタイプレートとまくらぎの間に挟まれて使用されるので、これらの接触面の

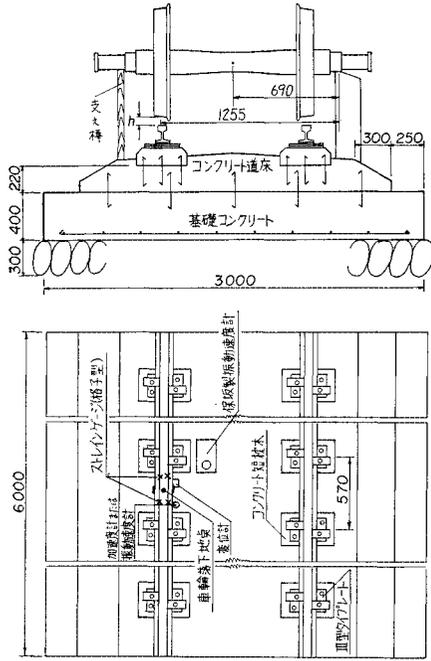


図-9 試験軌道断面および平面図 (コンクリートブロックまくらぎ使用)

表-2 試験軌道構造

軌道構造	直結Ⅲ型	I型
レール	50 kg N	50 kg N
まくらぎ	コンクリートブロック	ふな材短まくらぎ
幅	260 mm	250 mm
	長さ	410
厚	155	150
	まくらぎ間隔	570

表-3 試験軌道に使用した軌道パッド

軌道構造	試験軌道の名称	レールパッド		タイパッド	
		品質, 厚さ	ばね定数	品質, 厚さ	ばね定数
コンクリート直結Ⅲ型		125×180 mm		180×300 mm	
	B-1-6	1種 6 mm	1143 t/cm	1種 6 mm	1356 t/cm
	B-1-15	1種 6 mm	1143	1種 15 mm	842
	B-2-6	2種 6 mm	133	2種 6 mm	252
	B-2-12	2種 6 mm	133	2種 12 mm	48
コンクリート道床用 I 型		125×190 mm		190×300 mm	
	H-1-6	1種 6 mm	1143 t/cm	1種 6 mm	1143 t/cm
	H-2-5	2種 5 mm	116	2種 5 mm	245
	H-2-12	2種 5 mm	116	2種 12 mm	59

不整またはタイプレートの曲げによって圧力が均等に分布されず、さらにボルトまたはねじの締結による影響を考えればたして上記のばね定数がそのまま適用されるかどうか疑問がある。この点を解明するために次の実験を行なった。

まずボルトの締結によって生ずる圧力の大きさを知るためにレールとタイプレートの上にレールパッドを挟み、2枚のばねクリップを介して 800 kg・cm のトルクでボルトを締め付けた。このときばねクリップの弯曲部の外側にワイヤストレーンゲージを貼り付けて曲げ応力を測定した。次に図-12 (a) に示すごとく試験機によってばねクリップに荷重をかけ、ばねクリップにさきと同一の曲げ応力を生ずるときの荷重を測定したところ 3.9 t

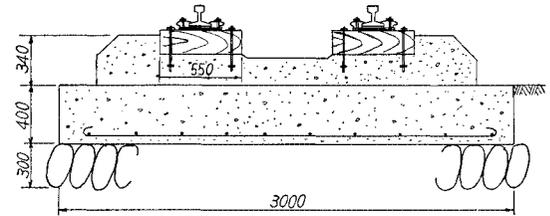


図-10 試験軌道断面図 (木短まくらぎ使用)

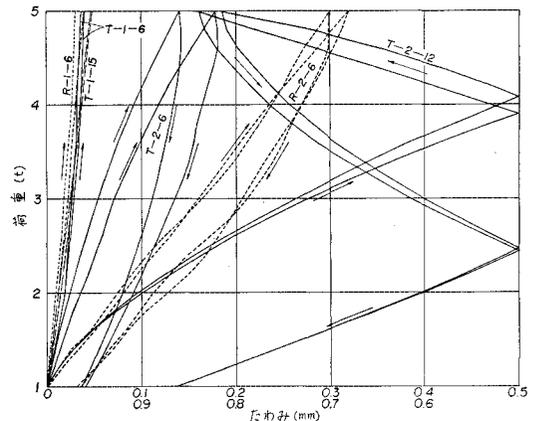


図-11 各種軌道パッドの圧縮試験 (直結Ⅲ型用)

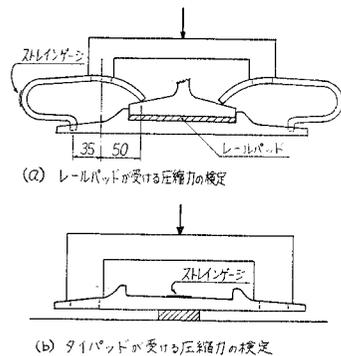


図-12 ボルトの締結によって軌道パッドが受ける圧力の検定

が得られた。このばねクリップはレールとタイプレートにまたがっているのでレールがレールパッドを圧縮する力は 1.6t となる。

タイパッドに対しては図-12 (b) に示すごとくタイプレートの上面に貼り付けたワイヤストレーンゲージの読みを採ることによって同様な測定を行なったが、2本のアンカーボルトを 1000 kg・cm のトルクで締め付けることによって 4.9t の圧力が作用することを知った。

以上に述べたごとくレールパッド、タイパッドともに軌道の構成材料として使用された場合にはボルトの締結によって圧縮された状態にあるので、この影響を知るため鋼板の上にタイパッド、タイプレート、レールパッド、レールの順に重ね合わせてそのまま圧縮した場合（非締結圧縮試験と呼ぶ）と標準のトルクでボルトを締結した後には圧縮した場合（締結圧縮試験と呼ぶ）とを比較測定してその結果を 図-13 に示した。従来は車輪の下でレールが軌道パッドを押す圧力はボルトの締め付けによって軌道パッドが受ける圧力 (P_0) よりはるかに大きいと見做して軌道パッドを単独で圧縮試験をして得られたばね定数をそのまま軌道の弾性として採用していた。すなわち軌道パッドがレールから受ける圧力がある値 (P_0) に達するまでは軌道パッドは全然変形せず、この値を超えると急にたわみが進行すると考えていた。しかし 図-13 の示すところによればこのような段階はなく、ほぼ一定の割合でたわみが進行することが認められる。タイパッド、レールパッドともにボルトの締め付けによって主としてパッドの両縁付近が圧縮され、中央部にはそれほど圧力がかからないためと考えられる。これらの測定結果より 1~5t の間で各種軌道のばね定数を求めれば表-4 のごとくなる。B-1-6 軌道においては締結圧縮試験と非締結圧縮試験との間に大きな差があるが、その他は 15~30% の差となっている。

非締結圧縮試験におけるばね定数は表-3 に示したばね定数からも計算によって求められるが、第1種軌道パッドを使用した場合における測定値は計算値に較べてはるかに小さい。これはさきに述べたごとくレールおよびタイプレートが軌道パッドと接触する面の不整およびタ

表-4 各種軌道のばね定数および剛度

軌道名称	非締結圧縮試験	締結圧縮試験	軌道の剛度
B-1-6	90.4 t/cm	136.1 t/cm	237.6 t/cm
B-1-15	104.3	121.1	218.4
B-2-6	56.1	72.6	150.5
B-2-12	29.8	35.6	88.9

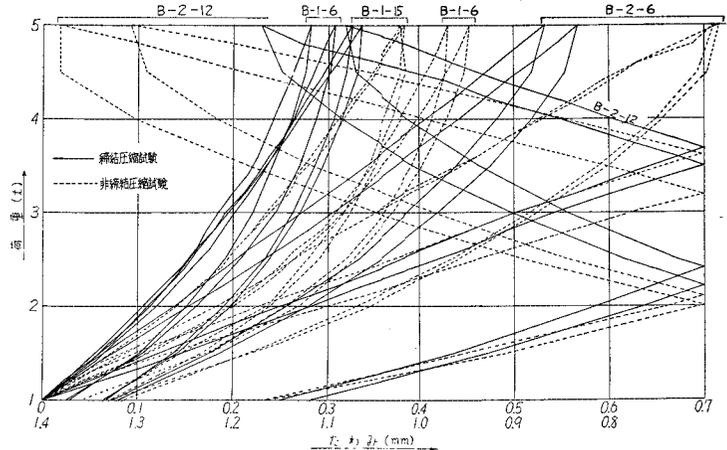


図-13 軌道パッドの圧縮試験

イプレートの曲げによる影響と考えられる。しかし実際の使用状態を考えればこのような影響も当然考慮に入れなくてはならない。第2種パッドを使用した場合には測定値が計算値にほぼ近い値となっている。

一般にレール面が受けた荷重はその前後の数丁のまくらぎによって支持される。よって軌道の弾性を論ずるときには荷重の分散の影響を考慮に入れる必要がある。5t kg N レールを使用し、まくらぎ間隔を 57 cm としてここに得られた締結圧縮試験におけるばね定数をレールの支点沈下係数と考えて軌道の剛度を計算した結果を表-4 の右端の行に記入した。ここに見られるごとく支点沈下係数の大きいときには軌道の剛度は支点沈下係数の2倍より小さいが、支点沈下係数が小さくなると2倍以上になる。

木短まくらぎをコンクリート道床に埋込んだ場合にはタイパッドを挟んでタイプレートを4本のねじくぎでまくらぎに締め付けている。さきと同様な方法で測定した結果によればねじくぎの締め付けトルクを 1500 kg・cm とすればタイパッドには 6.8t の圧力が加わることになる。

H-1-12 軌道に関して各種軌道材料およびまくらぎ単独の場合 (A)、鋼板の上にタイパッド、タイプレート、レールパッドおよびレールを重ねた場合 (B)、まくらぎの上にこれらの軌道材料を重ねた場合 (C)、およびボルト、ねじくぎを標準のトルクで締め付けた場合 (D) の圧縮試験を 図-14 に示した。非締結圧縮試験 (C) におけるたわみはまくらぎのみのたわみ (A) とパッドのみを重ねたときのたわみ (B) との和に一致するはずであるが、測定結果によれば (C) は (A) と (B) の和よりいくらか小さい。まくらぎの上下面が完全に平行でないことその他によって生じた誤差と考えられる。また締結圧縮試験 (D) におけるたわみは非締結圧縮試験 (C)

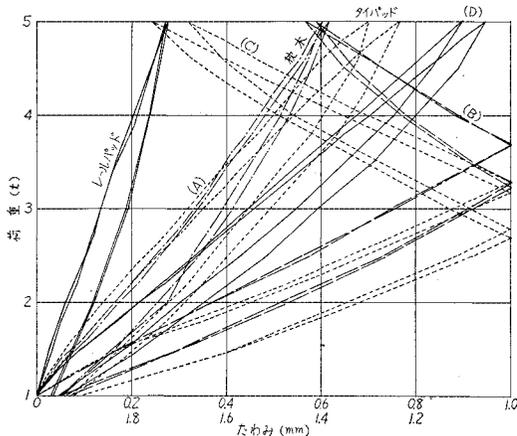


図-14 H-2-12 軌道に関する圧縮試験

表-5 各種軌道のばね定数

軌道名称	軌道パッドのみ (B)	締結圧縮試験 (C)	非締結圧縮試験 (D)
H-1-6	200 t/cm	59.3 t/cm	72.4 t/cm
H-2-5	73.7	46.0	67.8
H-2-12	28.2	23.3	43.5

のたわみの約 1/2 となっている。これはねじくぎを強く締めることによって軌道パッドだけでなく、まくらぎまで圧縮されたためと考えられる。その他の軌道パッドを使用した場合についても同様な測定を行なったが、圧力 1~5 t の間で求めたばね定数を表-5 に示した。

4. 車輪落下実験

従来の測定によればコンクリート道床軌道を鉄道車両が走行するときにレールおよび道床には 200~400 c/sec の高周波を発生している。したがってコンクリート道床軌道に使用される軌道パッドに関してはこのような高周波に対する性質を知ることが必要となる。高周波振動は主として軌道が衝撃を受けたときに発生するので車輪を試験軌道のレール面上に落して軌道各部に生ずる振動を測定することにした。

これから後に衝撃という言葉を使いが、これを力学的に定義すれば構造物に短時間に作用する外力を時間で積分したものであり、外力がベクトルであるので衝撃もベクトルとなる。衝撃はかならずある物体が構造物につき当って生ずると考えれば衝撃の大きさをその物体の質量と衝撃の前後における速度の差との積としてあらわすこともできる。本文においては衝撃という言葉はこの両方の意義で使っている。また衝撃力としては外力の大きさが変化するときその最大値をもって定義する。

写真-1 および図-9 に示すごとく 12 t 長軸の一端をコンクリートの台で支え、他端を棒で支え、この棒を打

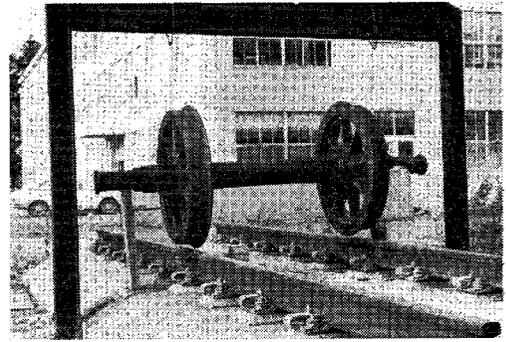


写真-1 車輪落下実験装置

撃によって急に外して車輪をレール面上に落した。車軸の一端をコンクリートの台で支えた理由は車輪がレール面に加える衝撃の方向を鉛直にするためである。この車輪がレール面に加える静荷重は 560 kg となっていた。

車軸を支えた棒を外すときに車軸は支点を中心として回転運動を行なうのでレール面から車輪を h cm だけ上げて落した場合に車輪がレール面につき当る速度 v は次式によって計算される。

$$v = cgt = \sqrt{2cgh} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$c = \frac{al}{a^2 + k^2} \dots\dots\dots (2)$$

t は車輪が落下を始めてからレールにつき当るまでの時間 (秒), a は支点から車軸重心までの距離, l は支点から衝撃点までの水平距離, k は車軸の重心を通り、車軸と直角をなす軸のまわりの車軸の回転半径である。 $a=69$ cm, $l=125.5$ cm とし (図-9 参照), k としては車軸を 2 本吊振子としてその振動周期を測定することより求めた。

図-15 に示すごとく吊糸の長さを d , 間隔を $2b$ とすれば振動周期は次式によって与えられる。

$$T = \frac{2\pi k}{b} \sqrt{\frac{d}{g}} \dots\dots\dots (3)$$

$2b=138$ cm, $d=68$ cm として実験を行なった結果 $T=1.35$ sec が得られた。これより k を求めれば 56 cm となる。これらの値を式 (2) に代入して $c=1.095$ が得

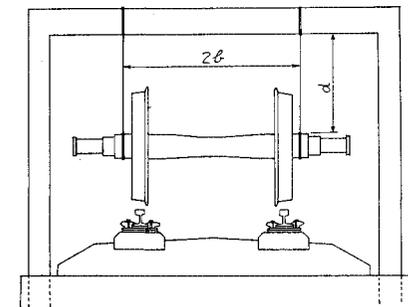
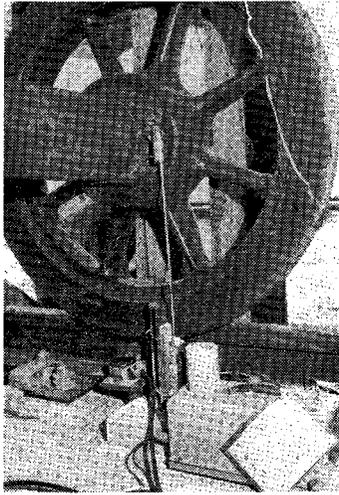


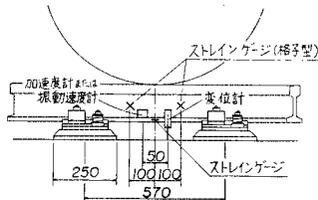
図-15 2本吊振子 (車軸の回転半径測定のため)

られた。 $h=1.5, 2.5, 5.0$ cm として実験を行なったが、式(1)によれば $v=56.7, 73.3, 103.5$ cm/sec が得られる。

測定計器の配置を写真—2、図—9 および 16 に示したが、車輪落下地点の近くのレールおよび道床に加速度計または振動速度計を取付けて振動を測定し、車輪およびレールにたわみ計を取付けて道床との間の相対変位を測定した。また 図—16 に示すごとく車輪の落下点を挟んでレール腹部に格子型のワイヤストレインゲージを貼り付けて衝撃によってレールに生ずるせん断力を測定し、またレール底部にも



写真—2 測定計器の配置



図—16 車輪落下実験における計器配置

ワイヤストレインゲージを貼り付けてレールに生ずる曲げ応力を測定した。車輪落下点のレール面に 5 t までの静荷重を加えてそのときにこれらのストレインゲージに生ずるひずみを測定して換算表を作ったのでレール面に衝撃が加えられたときにこれらのストレインゲージに生

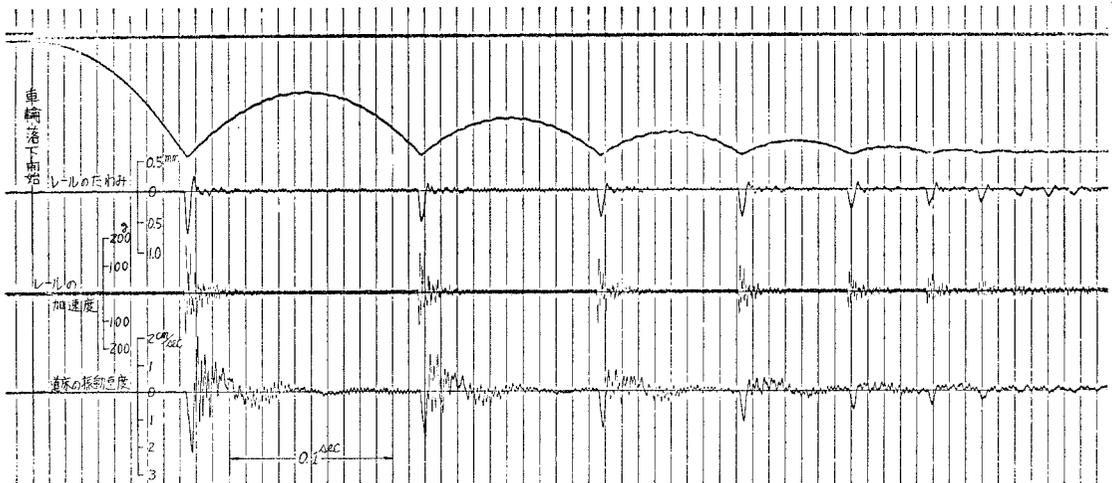
ずるひずみを知ればただちにレール面に加わる衝撃力の大きさに換算することができる。

車輪を 50 mm の高さから落した場合の測定記録の 1 例を図—17, 18 に示した。図—17 の最上段の線は車輪落下の始点を示すスイッチであり、その下は車輪の上下動を変位計を用いて測定した記録である。車輪はレール面に当って跳ね上がり、順次落下高さを減じながら何回も衝撃を加えることが判明する。

3 段目の線はレールの上下動をたわみ計によって測定した記録である。車輪の衝撃によってレールはいったん 0.7 mm 程度たわんだ後車輪を跳ね返し、その後小さな振動が続いているが、これはレールの振動というよりむしろ道床の振動があらわれていると考えられる。4 段目の線はレールに取付けた加速度計の記録であるが、加速度計の固有振動数 1300 c/sec に近い振動が記録されており、これは加速度計および記録装置の測定限界を超えているので真の加速度の大きさは不明である。

一番下の線はコンクリート道床の振動速度記録である。レールが衝撃を受けたときに道床は下方に移動を開始するが、道床の下方に向う速度が 0 となるのはレールのたわみが最大になってから 0.003 秒後である。これに続いて道床には 450 c/sec の高周波上下動と 20 c/sec の低周波上下動とが生じている。

図—18 にはレールに貼り付けたワイヤストレインゲージの記録が示されている。最上段はレール底部に生ずる曲げひずみであり、その下の 4 本の線はレール腹部に生ずるせん断ひずみである。さきに述べた方法によってこれらの記録を衝撃力の大きさに換算することができ、かつこの記録には高い周波数の振動があらわれていないので衝撃力の大きさを比較する上に最も信頼度が高いと考えられる。



図—17 車輪落下時に軌道各部に生ずる振動およびたわみ測定記録, B-1-6 $h=50$ mm



図-18 車輪落下時にレールに生ずるせん断応力および曲げ応力, B-1-6 $h=50\text{mm}$

このようにして車輪の落下速度とレールに加わる衝撃力との関係を求めた結果を図-19に示した。この図において横軸には車輪がレールにつき当るときの落下速度を示したが、この速度は車輪の落下時間より式(1)によって計算した数値である。また1回の落下実験においても車輪が何回も跳ねるので順次落下高さの減少する多数の測定点が得られ、第4回の衝撃までが図に記入されている。この図によれば衝撃力は落下速度にほぼ比例することが認められる。また同一の落下速度に対しては軌道の剛度の増加とともに衝撃力の増加することが認めら

れる。

図-20には軌道の剛度と衝撃力との関係を示した。さきに述べたごとく車輪の落下によってレールに加えられた圧力 F は次式によって与えられる。

$$F = Dy \dots\dots\dots(4)$$

ここに D は軌道の剛度であり、 y はレールの最大たわみとする。またレールに生ずる変形の仕事量は次式によって示される。

$$W = \frac{1}{2} Dy^2 \dots\dots\dots(5)$$

式(4),(5)より次式が導かれる。

$$F = (2DW)^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

車輪の落下によって軌道に衝撃を加えるときには車輪落下のエネルギーは上記の W に変換されるだけでな

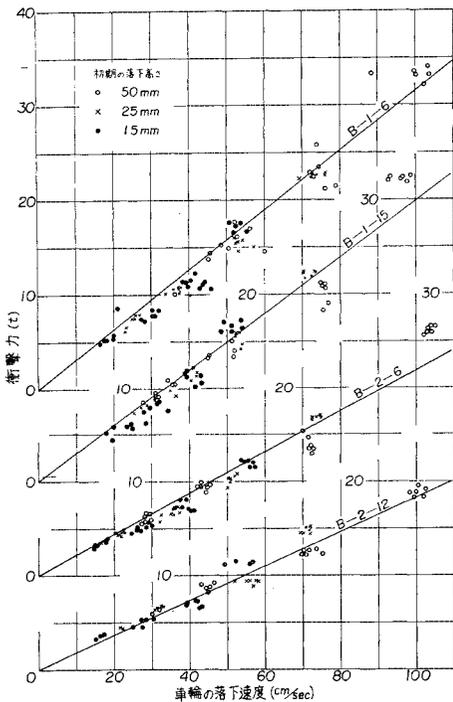


図-19 各種軌道における車輪落下速度と衝撃力との関係

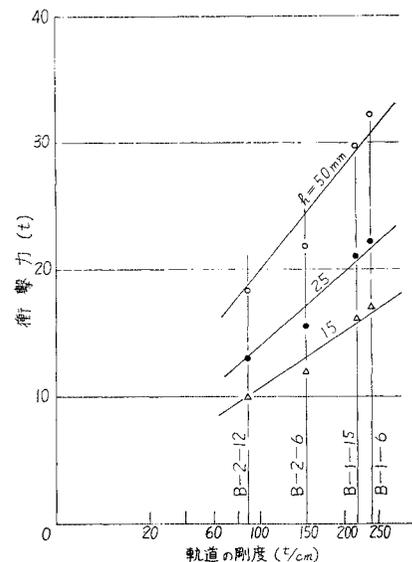


図-20 各種軌道の剛度と衝撃との関係

く、コンクリート道床にもたわみを生じさせ、またレールおよび道床に高い周波数の振動を発生する。したがって軌道に加えられる衝撃力も上記の F よりいくらか大きくなると考えられる。しかしいま F をもって衝撃力を代表し、 W をもって車輪の落下エネルギーを代表するものと見なせば式 (6) は軌道に加えられた衝撃力が軌道の剛度の平方根に比例することを示している。よって図-20の横軸は軌道の剛度の平方根に比例する尺度としたが、式 (6) がほぼ成立することが認められる。

レールが衝撃を受けたときにレールに生ずるたわみと車輪落下速度との関係を図-21 に示した。落下速度の大きいほどまた軌道の剛度の小さいほどたわみが増加することが認められる。特に B-2-12 軌道におけるたわみが大きい。式 (1) を用いて計算すれば車輪落下のエネルギー T は次式によって与えられる。

$$T = Mh \frac{a}{l} = \frac{aM}{2cgl} v^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに M は車輪の重量とする。車輪落下のエネルギーが全部レールのたわみ変形のエネルギーに変換されると仮定すれば式 (5) の W は式 (7) の T に一致し、したがってレールのたわみ量は車輪の落下速度に比例するはずである。しかし図-21 によれば落下速度が2倍になってもたわみ量は 1.5~1.7 倍になるに過ぎない。また表-2 に示した軌道の剛度を用いて計算すれば落下速度 100 cm/sec に対するレールのたわみ量は図-21 に示した値の 1.5 倍程度になるはずである。このように落下速度の大きいときに特にレールのたわみ量が予想よりはるかに小さくなる理由としては車輪落下のエネルギーの半分近くが軌道に生ずる高周波振動およびコンクリート道床の変形および沈下の仕事として消費されるためと考えられる。また表-4 に示した軌道の剛度は一定値ではなく、第2種軌道パッドに 20t までの静荷重を加えて

たわみ量を測定した結果によれば荷重が 10t を超えた後に急にばね定数が増加して第1種パッドに近くなることが認められた。

図-19, 20 はレール腹部に生ずるせん断応力より衝撃力の大きさを求めた結果であるが、同様にしてレール底部に生ずる曲げ応力よりも衝撃力の大きさを知ることかできる。また衝撃によってレールに生ずるたわみを静荷重によるたわみに比較することによって図-21 に示したレールのたわみを衝撃力に換算することができる。これらの結果をまとめて表-6 に示した。

レール腹部に生ずるせん断ひずみから求めた衝撃力と曲げひずみから求めた衝撃力とはほぼ一致しているが、レールのたわみから求めた衝撃力は 10% ほど小さく出ている。レール腹部に生ずるせん断ひずみから衝撃力を求める方法は軌道自体の慣性の影響がほとんど入らないのもっとも信頼度が高いと考えられる。

車輪の落下時に落下点の近くのコンクリート道床に生ずる第1波の下向き振動速度と車輪落下速度との関係を図-22 に示した。いずれも道床に生ずる振動速度は車輪の落下速度とともに増加するが、特に B-2-12 軌道においては振動速度が車輪の落下速度に比例するというこ

表-6 各種の軌道が受ける衝撃力の大きさ

車輪の落下速度	軌道名	B-1-6	B-1-15	B-2-6	B-2-12
	軌道の剛度	237.6 t/cm	218.4 t/cm	150.5 t/cm	88.9 t/cm
56.7 cm/sec	せん断	17.26 t	16.63 t	12.01 t	11.38 t
	曲げ	17.88	17.95	12.23	11.56
	たわみ	—	—	—	10.29
73.3	せん断	22.58	22.14	16.84	14.74
	曲げ	22.83	24.03	16.57	14.75
	たわみ	—	—	—	13.17
103.5	せん断	33.18	32.23	26.07	18.98
	曲げ	31.20	34.17	24.38	18.85
	たわみ	—	—	—	16.78

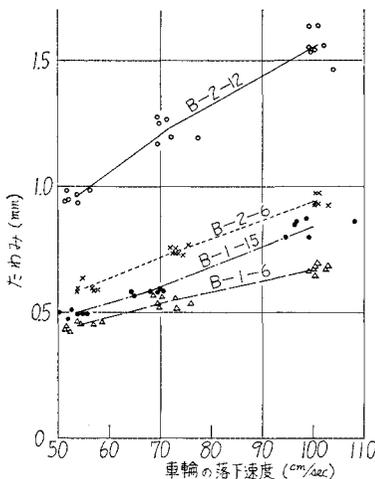


図-21 車輪落下実験によるレールのたわみ

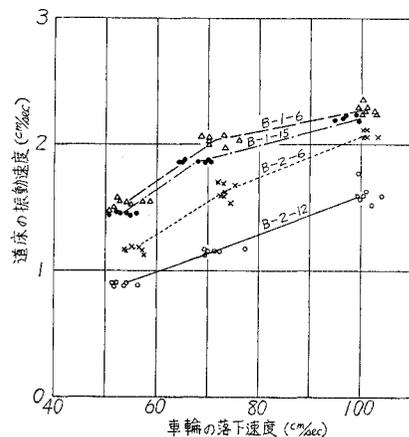


図-22 車輪落下時における道床に生ずる下向きの振動速度 (コンクリートブロックまくらぎ)

とができる。B-2-12 軌道において道床に生ずる振動速度は車輪落下速度の 1.6% 程度であるが、B-1-6 軌道においては 2.3~2.9% となっている。さきにレールの受ける衝撃力は軌道剛度の平方根にほぼ比例することが認められたが、道床の振動速度においても軌道剛度の平方根にほぼ比例することが認められる。

次に各種の軌道が第 1 回の衝撃を受けた後の振動の軽減状況を比較するために軌道が第 1 回の打撃を受けてから第 2 回、第 3 回の打撃を受けるまでの時間とそのときの車輪の落下速度との関係を 図-23 に示した。この図によれば車輪の落下速度は時間の経過とともに直線的に減少することが認められる。B-1-6 軌道においては 0.1 秒当り 18 cm/sec の減少となり、B-2-6 軌道においては 29 cm/sec の減少となっている。

以上はコンクリート ブロック まくらぎを使用したコンクリート道床について行なった実験結果であるが、木短まくらぎを埋込んだコンクリート道床軌道についても同様な実験を繰返した。しかしこの場合には実験の繰返しによって木短まくらぎが漸次コンクリート道床より分離する傾向にあり、各種の軌道パッドの効果を同一の条件で比較することは困難であった。その中で車輪の落下速度とコンクリート道床の振動速度との関係を測定した結果を 図-24 に示した。道床に生ずる振動速度は車輪の落下速度が増すとともに増加するが、増加の割合は次第に少なくなっている。

また H-2-12 軌道に生ずる振動は H-2-6 軌道に生ずる振動の 70~80% となることが認められる。しかしこれを 図-22 に較べると 1.6~1.7 倍の振動速度となっている。木短まくらぎの緩衝効果を考えに入ればコンクリート ブロック まくらぎを使用した場合より振動が小さくなると予想したのにその反対の結果になった。タイプレートを木短まくらぎにねじくぎで強く締めた場合に

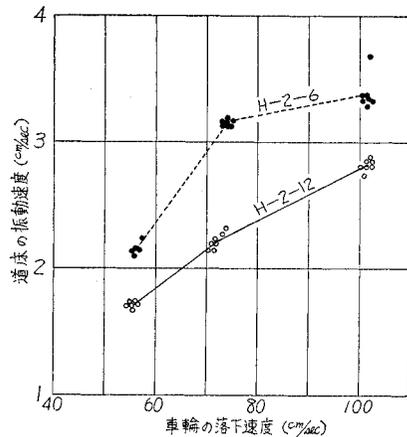


図-24 車輪落下時における道床に生ずる下向きの振動速度 (木短まくらぎ使用)

は木短まくらぎは圧縮されてそのばね定数の増すことをさきに述べたが、これだけでは説明がつかない。コンクリート ブロック まくらぎを使用したコンクリート道床には中央に溝がないのに対して木短まくらぎを使用した場合には軌道間に溝があり、かつまくらぎとコンクリートとは一体とはならないのでコンクリート ブロックまくらぎの場合と同一の軌道パッドを使用し、かつ同一の衝撃を加えても大きな変形および振動を生ずるのではないかと考えられる。

5. 結 論

トンネル内のコンクリート道床軌道において第 1 種軌道パッドを使用した場合と第 2 種軌道パッドを使用した場合とについて列車走行時にレールおよび道床に生ずる振動を比較測定した。第 2 種パッドを使用した場合には第 1 種パッドを使用した場合に較べてレールの振動はいくらか大きくなったが、道床に生ずる振動速度は約 1/2 に減少した。軟かい軌道パッドを使用すればレールの振動が大きくなるのは当然であり、むしろ道床の振動速度の大きさがレールに加えられた衝撃力の大きさを代表すると考えられ、衝撃を緩和する上に軟かい軌道パッドの使用が大いに有効であることが明らかにされた。

次に軌道パッドのばね定数と衝撃を緩和する能力との関連を知るためコンクリート道床上の試験軌道に種々のばね定数を有する軌道パッドを挿入してこの上に車輪を落とし、レールに加わる衝撃力の大きさおよびコンクリート道床に生ずる振動速度を測定した。レールに加わる衝撃力は車輪の落下速度に比例し、また同一の高さから車輪を落した場合について比較すればレールに加わる衝撃力は軌道の剛度の平方根に比例することが理論的に推定され、また実験によって確かめられた。道床に生ずる振

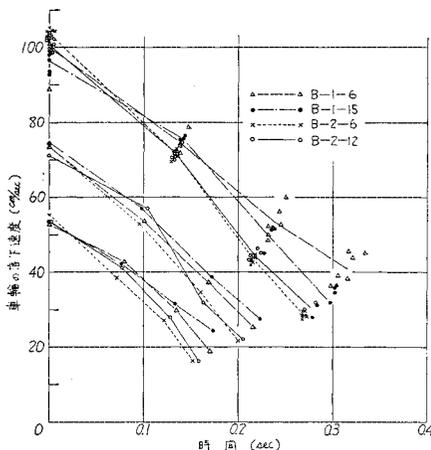


図-23 衝撃の回数と車輪の落下速度との関係

動速度の測定においても同様の傾向が認められた。ここに軌道の剛度とはレール面に加えた荷重の大きさをレール面のたわみで割った値であって1個のまくらぎの支点沈下係数のほぼ2倍に相当するが、軌道パッドが軟くなれば2倍よりさらに大きくなる。よって軌道パッドを厚くしてばね定数を低下すれば衝撃を緩和する能力は増すが、効果の増加割合は次第に減少する。今回は最も軟いタイパッドとして厚さ12mmの第2種パッドを使用した。これ以上厚さを増しても軌道の剛度はそれ程低下せず、経済上不利と考えられる。

コンクリート道床軌道に衝撃を加えたときに軌道に生ずる振動を測定した結果450 c/secの高周波と、20 c/secの低周波が存在することが認められた。このような低周波の存在はコンクリート道床自体が路盤上でたわみ振動を示している。実際のコンクリート道床軌道においても列車通過時にこの程度の振動数の振動を生ずるとすれば波状磨耗による上下振動とほぼ周期が一致する場合もあり得る。よってこのような固有振動数を持つコンクリート道床軌道において波状磨耗が発生するのではないかと考えられる。

終りに軌道パッドのばね定数の測定その他で鉄道技術研究所軌道ならびに軌道材料研究室の方々から多大のご協力を受け、また試験軌道の敷設ならびにトンネル内のコンクリート道床の調査において金沢鉄道管理局施設部保線課、金沢保線区ならびに敦賀保線区の方々から多大のご援助を受けたことを述べ、ここに厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 北岡寛太郎：これまでの直結軌道一ずい道内の直結一，鉄道線路，第15巻，第5号，昭42-5
- 2) 北沢秀勝・坂 芳雄：スラブ軌道の開発と実用化，土木学会誌，第55巻，第10号，昭45-10
- 3) 飯野義夫：深坂ずい道および北陸ずい道の保守，鉄道線路，第15巻，第5号，昭42-5
- 4) 峯村芳郎・大本東一郎：軌道パッド（第2種）試験成績，鉄道技術研究資料，第16巻，第2号，昭34-2
- 5) 戸原春彦・塚本京市・西川良一・宮入宮人・松本 正：軌道パッド（第2種）の圧縮変形と溝の形状，鉄道技術研究報告，No. 116（施設編第42号），昭35-4
- 6) 豊田昌義：軌道パッドの適性ばね定数試験一有田川フラット試験一 鉄道線路，第16巻，第4号，昭43-4
- 7) 小野一良：軌道応力計算法の一考察（軌条接目部），業務研究資料，第26巻，第6号，昭13-3

(1970.12.12・受付)