

トンネル内の路盤噴泥対策の検討

Development of Method for Mud pumping of Track bed on Railway tunnels

森山 智明¹⁾ 富田 修司¹⁾ 清水 満¹⁾ 松田芳範¹⁾ 齋藤 貴⁴⁾

Tomoaki MORIYAMA, Syuuji TOMITA, Mitsuru SHIMIZU, Yoshinori MATSUDA and Takashi SAITO

The mud pumping action often happens under train vibration beneath track bed concrete of railway tunnels without invert. This phenomenon originates track bed settlement and tunnel lining crack caused by void beneath the track bed concrete, and it becomes a main problem on tunnel maintenance.

This paper shows the method resisting mud pumping under running of trains. In this method, cast-in-place concrete piles with small aperture are executed beneath the track bed of slab track and bear the track bed with the pile as beam structure.

Key Words : Mud pumping, Cast-in-pile, Vibration, Railway

1.はじめに

インバートコンクリート未施工の鉄道トンネルにおいて、列車走行に伴う振動により路盤コンクリート付近から土砂を伴った地下水の噴出現象が生じることがある。この噴泥現象は、土砂の噴出により路盤下に空隙を発生させ、路盤の沈下やトンネル覆工のクラック発生等のトンネル変状につながり、トンネル保守における大きな課題の一つである。また、路盤沈下対策として路盤下の空隙を充填しても、列車の走行によって充填材の下面で再び噴泥が発生することから、列車の運行を確保した上での恒久的な対策が望まれている。

路盤の噴泥発生原因¹⁾は、①路盤下への豊富な地下水の流入・滞水、②路盤下の地山が均等係数の低い砂質の軟弱な地山、③列車走行に伴う載荷・除荷によるポンピング作用の組合せにより発生すると考えられている。

そこで、列車の運行を確保しながら安全に施工できる噴泥対策として、既存の路盤構造を利用した対策工法を開発し、検討を行ったのでここに報告する。

2.噴泥対策工法の概要²⁾

路盤噴泥が発生している軌道構造の多くは、スラブ軌道の下に鉄筋コンクリートの路盤コンクリート、その下に無筋のりょう盤コンクリートという構造になっている。今回

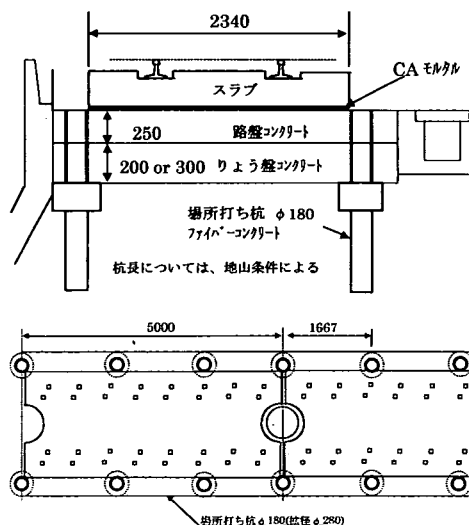


図-1 桁構造スラブ軌道の概要図

1) 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務 構造技術センター

2) 正会員 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 トンネル担当

開発した工法は、既設スラブ軌道の路盤下に、杭頭部を拡張した小口径の場所打ち杭を施工し、路盤構造自体を桁構造として杭でこれを支持する(図-1)。この工法は、軌道構造を杭で支持することにより列車振動によるポンプ作用を抑え、列車走行の間合時間に作業を行うことにより列車の運行が確保できる。今回、既設軌道構造を杭による支持形式に変更しても安全であること、杭頭部の拡張方法を確立し施工性が良好であること、杭の長期的安全性を確認すること等を確認するため、下記について検討を行った。

- 1) 桁構造スラブ軌道の静的載荷試験
- 2) 拡張杭施工確認試験
- 3) 桁構造スラブ軌道の動的載荷試験

3. 桁構造スラブ軌道の静的載荷試験

3.1 桁構造スラブ軌道の静的載荷試験

(1)試験概要：頭部を拡張された小口径場所打ち杭より支持された既設路盤構造の安全性を確認するために行った。

試験は、耐力的に厳しい線路直角方向の載荷試験を行い、1 m幅の実物大モデル(図-2)で行った。

(2)試験結果：荷重と載荷点変位の関係を図-3に示す。無筋コンクリートであるりょう盤コンクリートの載荷点位置での曲げひび割れ発生により、最大荷重 633kN から急激に荷重が落ちている。ひび割れ後に再び載荷を行うと 448kN の終局耐力を有しており、これは設計荷重の 4 倍の耐力を有している。

また、支点は拡張したφ280mm で支持したが、杭による支持状態でせん断破壊の問題が無いことは確認された。

3.2 杭頭拡張部のせん断試験

(1)試験概要：杭頭拡張部に作用するせん断力(図-4)に対する安全性を確認するため試験を行った。拡張部には、りょう盤コンクリートがリング状に載るが、設計は安全側を考え、線路側拡張部に線載荷により載荷を行った。試験体は、実物大(杭径φ 180mm、拡張+50mm)で、ファイバーコンクリート(混入率 1 %)を使用した。

(2)試験結果：破壊は、載荷盤内側から縦方向に一面せん断状にひび割れが発生し、図-5 に示す荷重-変位曲線から分かるように、最大耐力以降もファイバーによる効果のため急激な耐力の低下には至っていない。拡張部のせん断耐力は、杭 1 本あたりに作用する設計せん断力 $V_d=127\text{kN}$ を上回り、50mm 程度の拡張で計算すると以下のように設計荷重に対し安全であることが確認された。

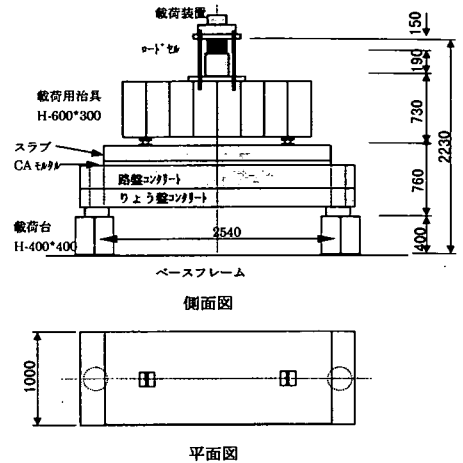


図-2 試験概要

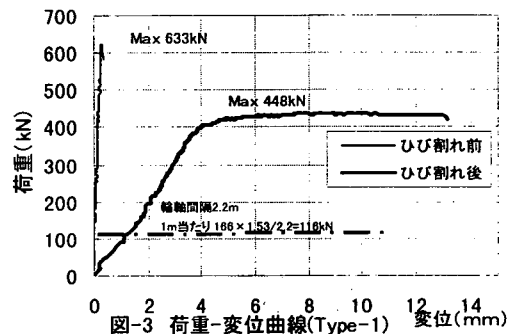


図-3 荷重-変位曲線(Type-1)

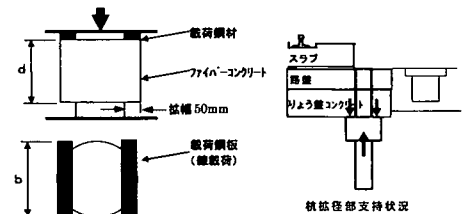


図-4 せん断試験概要

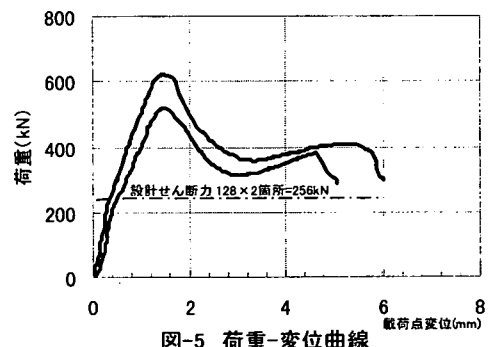


図-5 荷重-変位曲線

4. 拡径杭施工確認試験

現地と同様な地山条件下（強風化砂質凝灰岩）において、場所打ち杭および杭頭部の拡径が施工できることを確認するために施工試験を行った。拡径部は、今回開発した機械(写真-1)により行い、所定の精度で施工できることを確認した。

5. 拡径杭の動的載荷試験

5.1 試験体概要

試験体は、図-6 に示すようにりょう盤コンクリートを摸した RC 版に、杭無し、杭長 2, 3, 4m の場所打ち杭（SFRC 製）を造成した 4 タイプについて行った。杭には 50cm ピッチでひずみ計を設置し、版上には加速度計を、版下の地山には間隙水圧計を設置した。RC 版は目地材により 2×2m の版に縁切りされている。版の下には掘削ブリを薄く敷いてあり、また水をためることにより、噴泥の起きやすい条件を作っている。

試験現場の地山条件は、表-1 に示す強風化砂質凝灰岩であり、噴泥の発生しているトンネル内の調査結果と比較しても物性値に悪い条件である。試験終了後、版中央下 2.5m 位置での土の飽和度は 94.8%であった。

表-1 地山資料試験結果比較表

	今回の動的 載荷試験	トンネル内変状調 査報告書(平成 7 年 3 月)
湿潤密度(g/cm ³)	1.897	1.75 (1.59~1.91)
一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	1.12	2.91 (2.08~4.64)
静弾性係数 (kgf/cm ²)	52.3	193 (100~346)
粘着力(kgf/cm ²)	0.48	3.70 (2.73~5.19)
内部摩擦角 (度)	14.6	22.7 (13.0~29.9)

()内は分布範囲を示す。

5.2 SWEEP 試験

(1) SWEEP 試験概要

連続した正弦波による動的応答性状を把握するため、4m の杭において加振振動数を 20~60Hz まで変化させる SWEEP 試験を行った。加振力を一定とし、版の上下振幅量、杭ひずみより実際に杭に作用する力を求めた。

(2) SWEEP 試験結果

図-7 に SWEEP 試験における加振振動数と RC 版の振幅量の関係を示す。22Hz をピークに大きな応答を示しており、明確な共振点のあることが分かる。図中の線は、試験体を 2 質点ばねマスモデルとして数値解析により求めた共振曲線である。解析的に求めた共振点は 23.5Hz であったが、両者は比較的良好に一致している。

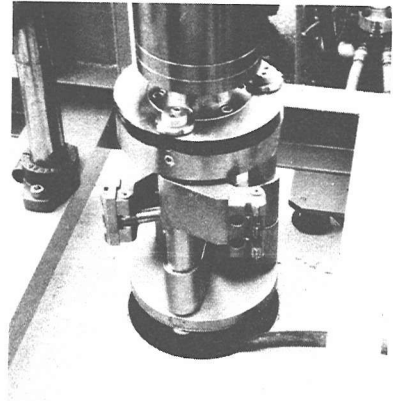


写真-1 拡径機

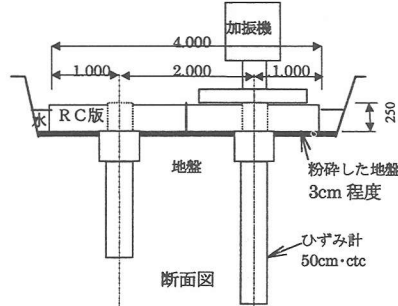
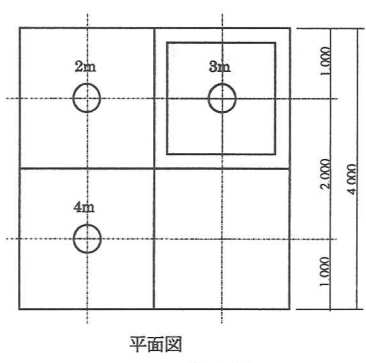


図-6 動的載荷試験概要

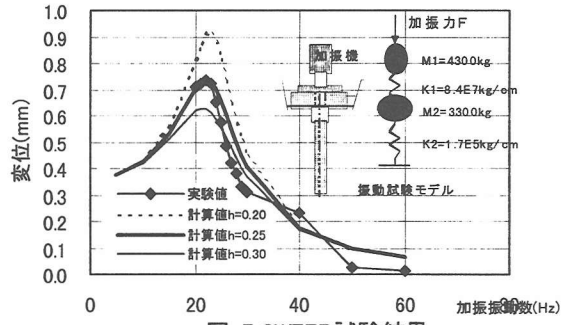


図-7 SWEEP試験結果

一致している。

杭のひずみ分布を図-8 に示す。加振振動数 30Hz の時、杭には加振力と同じ 78kN 相当のひずみが発生している。加振振動数 24Hz では、30Hz の約 1.5 倍ものひずみが発生していることから、杭には約 117kN の力が作用していることが分かる。

5.3 動的載荷試験³⁾

(1)試験概要

加振機は、振動数と荷重の制御が行える油圧サーボ式バイプロを用いて加振した。加振機による加振力は、杭 1 本に対し、設計軸重に相当する 78kN (±39kN) で一定とし、与える振動数は新幹線の高速走行時を考慮し、200, 260km/h にそれぞれ対応する 24, 30Hz とした。載荷時間は各周波数とも 8h ずつで、およそ 1 年間の軸輪通過回数となる。

(2)試験結果

杭長 2m の載荷試験の状況を写真-2 に示す。左手前が大きく傾いている RC 版は、杭無し試験後の状況である。試験の RC 版の変状状況は表-2 の通りであり、杭無しものは、30Hz 載荷開始 20 分後に沈下が始まり 75 分で RC 版が大きく傾いたため、試験を終了した。設計荷重が作用

する 30Hz では、全ての杭とも変状は見られなかった。1.5 倍の荷重が作用する 24Hz では、杭長 2m,3m が 120 分程度から RC 版の沈下等の変状が見られたが、杭長 4m については変化が見られなかった。

試験終了後、杭を掘り出して周面及び杭先端を観察したが、噴泥の発生は認められなかった。

図-9 に 30Hz,24Hz それぞれの杭のひずみ分布を示す。周面摩擦力により、深くなるほど杭のひずみは減少し、1m 当たりのひずみの減少量(傾き)にコンクリートの剛性(EA)を掛けたものが周面摩擦力となる。杭のひずみの減少量で整理したものを図-13 に示す。24Hz 加振時

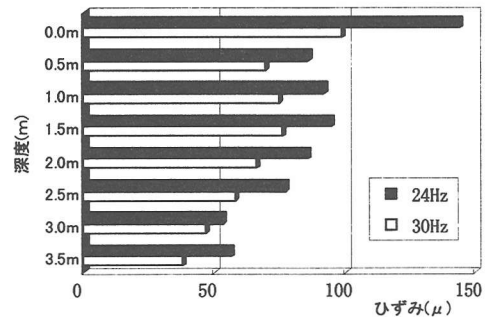


図-8 SWEEP試験杭歪み分布(杭長4m)

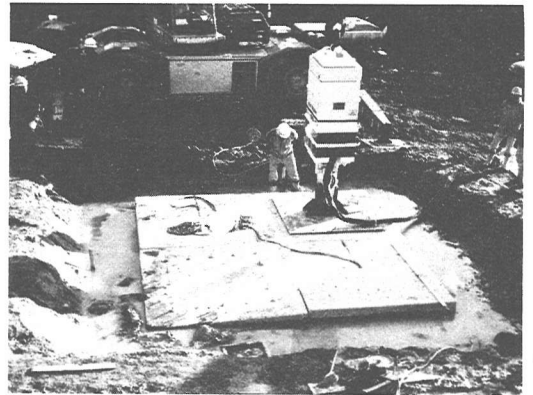


写真-2 動的載荷試験状況(杭長 2m)

表-2 動的載荷試験における変状状況

形 状	30Hz(78kN 相当)	24Hz(117kN 相当)
杭無し	20 分後に沈下が始まり、75 分で最大 150mm 沈下し、傾斜が著しいため中止	
杭 2 m	16 時間載荷 →変状無し	120 分後に沈下が始まり、8 時間後で最大 60mm 沈下
杭 3 m	8 時間載荷 →変状無し	130 分後に沈下が始まり、3 時間後に最大 90mm 沈下し中止
杭 4 m	8 時間載荷 →変状無し	8 時間載荷 →変状無し

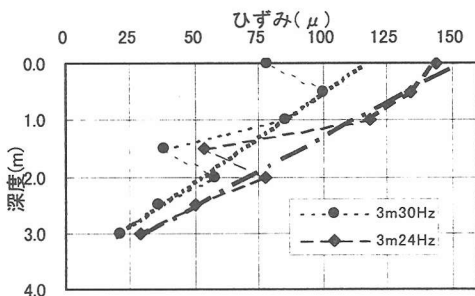


図-9 杭ひずみ分布(杭長3m)

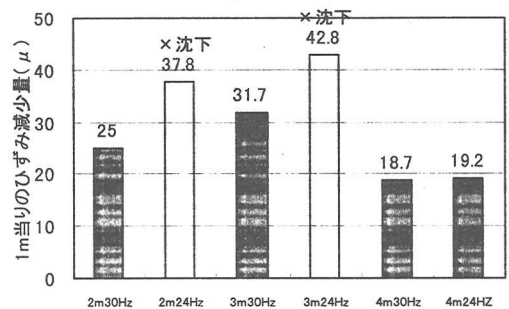


図-10 杭ひずみの減少量(m当)

のひずみ減少量は、作用荷重が大きな分、周面摩擦力の負担が大きくなっている。杭が沈下したケースでは、杭周面に大きな摩擦力が発生していることが分かる。杭周面の摩擦力は、杭周面と地盤とのせん断ばねが降伏するまでは、変位の増加に伴い周面摩擦力も増加すると考えられる。このことから、杭頭における振幅で整理すると図-11 のようになり、試験箇所の地山条件では、振幅によりせん断ばねが低下し沈下するかしな
い
か
の
境
界
は、
振
幅
量
と
し
て
0.8mm 程度と考えられる。

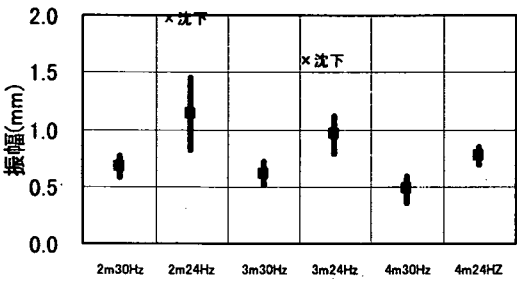


図-11 RC版振幅量

5.4 列車走行シミュレーション

(1)目的

動的載荷試験より、繰り返し載荷に対し一定の振幅以下では杭の変状は発生しないこと、正弦波単調載荷では共振により杭に大きな振幅が発生するケースがあることが確認された。

今回、杭が実際にトンネル内に施工された場合の列車走行時の振動による挙動を把握するため、「鉄道車両と線路構造物の動的相互作用シミュレータ(DAISTARS)」⁴⁾を用いて解析を行い、杭の振幅、作用荷重について検討を行った。

(2)解析方法

解析モデルは、スラブ 3 枚（長さ 15m）の区間を杭支持としたモデル(図-12)とした。解析は、列車走行速度をパラメータとし、走行速度 0,110,210,260,300km/h の 5 ケース行った。

車両モデル:解析に用いた「鉄道車両と線路構造物との動的相互作用シミュレータ(DAISTARS)」では、車両は、車体・台車枠・輪軸の相互を立体的にバネとダンパで結合した 23 自由度の振動系でモデル化されている。車両モデルとして設計輪重 157kN(16tf)の車両 12 両を走行させ解析を行った。

構造物モデル:解析モデルを簡略化するため、スラブおよび路盤を 1 本の梁モデルとし、杭は、軌道直角方向の左右 2 本を 1 本のスカラーばねとした。主な構造物モデルの諸元を表-5 に示す。杭のばね値は動的載荷試験より得られた値を用い、スラブ桁の剛性はスラブおよび路盤を重ね梁として計算し、無筋コンクリートであるりょう盤は無視している。単位重量にはりょう盤部を含んでいる。減衰定数 $h=0.05$ とした。

(3)解析結果

図-13 に走行速度 260km/h における杭番号 10 の杭軸力の時刻歴図を示す。図より、杭に作用する軸力は 108kN(杭 2 本分)程度であり、杭軸力のピークは台車間隔毎に現われていることが分かる。また、台車毎のピークの値はほぼ一定であり、列車の通過に従い振幅が大きくなるような現象は全てのケースで見られなかった。

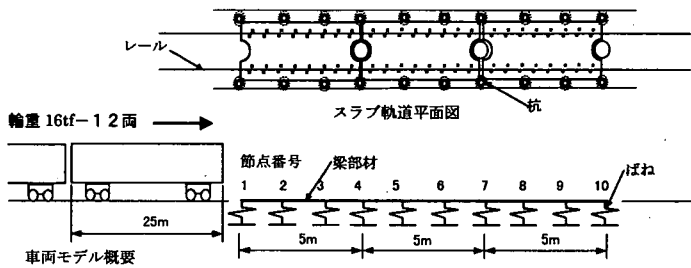


図-12 解析モデル概要図

表-3 構造モデルの部材諸元

	ヤング係数 (tf/m ²)	断面積 (m ²)	断面2次モーメント(m ⁴)	単位重量 (tf/m)
スラブ桁	3.00E+06	1.72	6.39E-03	4.3
	ばね係数 (t/m)	備考		
杭	3.40E+04	杭2本分		

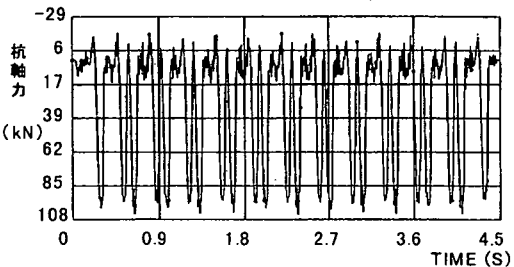


図-13 杭軸力の時刻歴図(V=260km/h)

図-14 に走行速度と杭の下方方向最大変位、図-15 に走行速度と杭の最大軸力の関係を示す。下方方向変位、軸力の最大値が発生する位置は、杭番号9であり、進出側が進入側より2～3%程度で大きな値となっている。

変位の最大となるケースは、走行速度 260km/h 時の 0.39mm であり、静的値(走行速度 0km/h)と比べ 5.7%の増加である。

杭軸力は、解析モデルでは杭 2 本分を 1 つのばねとしているため、実際の杭に作用する軸力は図中の値の 1/2 となる。杭軸力の最大値は、走行速度 210km/h 時で 125kN あり、静的値より 6.2%大きくなっている。いずれの速度においても列車の振動による大きな共振増幅現象や走行速度による顕著な影響は見られない。

(4)まとめ

列車走行シミュレーション解析により、トンネル内に支持杭を施工した時の変位振幅は、0.4mm 程度であり、動的載荷試験で得られた沈下に対する変位振幅の限界値 0.8mm より小さいことが確認できた。また、1 つの杭ばねに作用する軸力は、列車振動に対して大きな共振増幅現象は見られず、杭のばらつき等を考慮しても輪重 157kN 以下であった。

6.おわりに

列車の運行を確保した上での恒久的な路盤噴泥対策の開発を目的に、安全性、施工性、経済性を考慮した新しい対策工法を検討してきた。その結果、既存の軌道構造を活用した「桁構造スラブ軌道」工法が路盤噴泥対策として効果があり、構造的にも十分安全であることが確認できた。

今後は、列車の間合および狭隘空間での実施工を考慮し、施工精度や施工時間等の施工性の検討を実施し、同工法の実用化に向けた検討の深度化を図っていく予定である。

参考文献

- 1)伊能：鉄道路盤の噴泥現象の解明とその防止対策，鉄道技研報告 (No.1252) 1983. 11
- 2)清水, 永谷: 鉄道トンネルにおける噴泥対策工法の開発, 第 33 回地盤工学研究発表会 1998. 7
- 3)富田, 清水, 森山, 齋藤: 噴泥対策に用いる支持杭の動的載荷試験, 第 33 回地盤工学研究発表会 1998. 7
- 4)涌井, 松本, 松浦, 田辺: 鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集 No. 513/I-31, pp129-138, 1995. 4

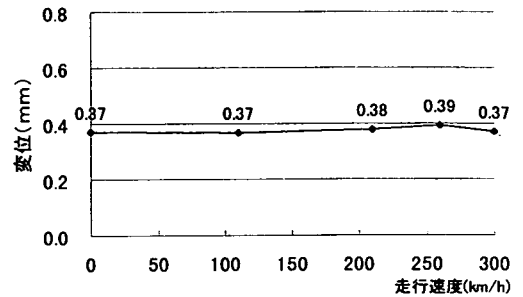


図-14 走行速度と下方方向最大変位

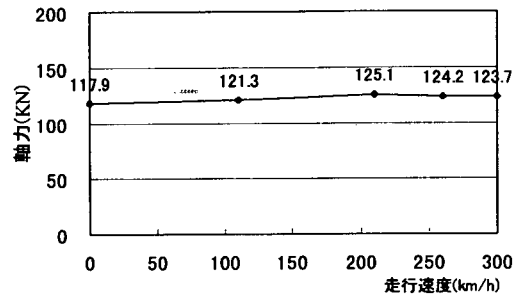


図-15 走行速度とばね軸力最大値