

地上を走行する列車に起因する 地下構造物への変動土圧

仲山 貴司¹・牛田 貴士²・川中島 寛幸³・澤田 亮⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: ushida.takashi.33@rtri.or.jp

³正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)

E-mail: kawanakajima.hir-bc5v@jrtr.go.jp

⁴正会員 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: sawada@jrseg.co.jp

線路下を横断する地下構造物には、地上の列車荷重が土中を伝播して作用する。この荷重の算定では、レール剛性や道床、土中伝播時の荷重分散を考慮する必要があり、その算出過程は複雑である。そのため、設計基準類では等値等分布荷重に算出した値を一覧表で示しているが、最新の算出方法を用いた値は旅客列車荷重 (M-18)、新型機関車荷重 (EA-17) のみに留まっていた。そこで本報告では、新たに新幹線荷重 (P-16) に対して等値等分布荷重を算出してとりまとめた。

Key Words: box culvert, train load, P-load(P-16), variable earth pressure, equivalent uniform load

1. はじめに

線路下を横断する地下構造物には、地上の列車荷重が土中を伝播して作用する。そのため、設計ではこれを考慮して性能を確認している。ここで、地上の列車荷重が土中を伝播する際に荷重分散が生じることが知られており、この現象を考慮した地下構造物への作用を算出する方法はすでに確立されている。しかし、その算出過程は複雑であるため、設計基準類ではあらかじめ地下構造物への作用を算出し、等値等分布荷重に換算した値を一覧表で示している。

当初は、土中の荷重分散は図解法 (手計算) で安全側に解かれていたが、現在は、パソコン等により影響円法等の近似解法を活用した精度向上が図られている。さらに、レール剛性や道床における荷重分散も考慮するなど実際に近い挙動を表現する方法¹⁾も提案され、平成 13 年に発刊された「鉄道構造物等設計標準・同解説 (開削トンネル)」²⁾では、その算出結果を反映している。

ただし、この算出手法を用いて示されている等値等分布荷重は旅客列車荷重 (M-18)、新型機関車荷重 (EA-17) のみであり、これら以外の列車荷重は従前の算出手法で算出された値が現在も用いられているのが実情であ

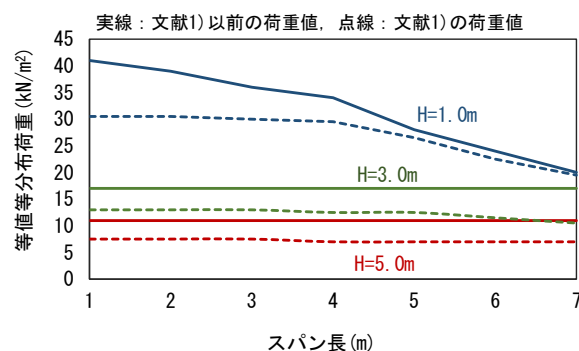


図-1 荷重値の比較結果 (単線, M-18)

る。図-1は文献1)以前と以後の等値等分布荷重値 (列車荷重 M-18) を土被り H 毎に比較したものである。文献1)のほうが精度向上が図られているため値が小さく、設計の合理化が図られることが明らかであるものの、前述したように算出過程が複雑であること等から荷重値が示されている M-18, EA-17 以外の列車荷重を考慮する設計では、算出手法の活用が進んでいない。

そこで本研究では、文献1)の算出手法を用いて新幹線荷重³⁾ (P-16) の等値等分布荷重値を算出した結果を報告する。

表-1 荷重分散に関するパラメータの設定

	①レール剛性	②道床内	③土中
Case1	なし($k=\infty$)	あり	あり
Case2	あり($k=2.5 \times 10^4$)	(0.20m)	(土被り 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0m)

k : 単位支持ばね係数(kN/m^2), $k=\infty$ はレールのたわみを考慮しない条件であり, 荷重分散を考慮しないことに等しい

2. 計算条件

文献1)では, ①レール剛性, ②道床内および③土中の荷重分散が考慮されている. 本研究では, これらの荷重分散に関するパラメータを表-1のように設定した.

レール剛性を考慮すると, レールにたわみが生じて荷重が分散されるため, 設計の合理化が図れる. ただし, 新たな軌道構造が導入された場合等に再度算出する必要が生じるため, これを考慮しないほうが汎用性が高い. そこで, レール剛性による荷重分散を考慮しない Case1 とバラストと木まくらぎの軌道を想定した Case2 も合わせて実施して, 影響度合いを検証することとした.

道床内の分散程度は, 道床材料に応じた荷重分散のモデル化と道床厚の影響を受ける. 本検討で対象とする新幹線荷重に対しては PC まくらぎのスラブ軌道 (厚さ 0.25 m) 等の適用が想定されるが, 本検討では安全側に木まくらぎ・バラスト道床 (厚さ 0.20 m) を想定した. また, 土かぶりについては 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0 m の 6 ケースとした.

3. 列車荷重による変動土圧の算出

(1) 算出方法

以下に文献1)の算出方法を概説する. 当該手法では, 文献4)の手法で軌道をモデル化する.

a) レール剛性による荷重分散

輪重 W がレール上にあるとき, まくらぎ位置の反力は, 図-2 のように直下の圧力 P_1 と隣接するまくらぎ位置の圧力 $P_2, P_3 \dots$ に分散している状態となる. 軌道は連続弾性支持モデル (図-3) でモデル化すると, 各々の圧力は次式で算定される.

$$\begin{aligned} P_1 &= 2 \int_0^a ky dx = W \left[1 - \varphi_4 \left(\frac{a}{2} \beta \right) \right] \\ P_2 &= \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{3a}{2}} ky dx = \frac{W}{2} \left[\varphi_4 \left(\frac{a}{2} \beta \right) - \varphi_4 \left(\frac{3}{2} a \beta \right) \right] \\ P_3 &= \int_{\frac{3a}{2}}^{\frac{5a}{2}} ky dx = \frac{W}{2} \left[\varphi_4 \left(\frac{3}{2} a \beta \right) - \varphi_4 \left(\frac{5}{2} a \beta \right) \right] \\ \varphi_4(\beta x) &= e^{-\beta x} \cos \beta x, \beta = \sqrt{k/4EI} \end{aligned} \quad (1)$$

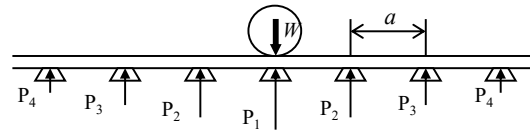


図-2 まくらぎ位置の反力

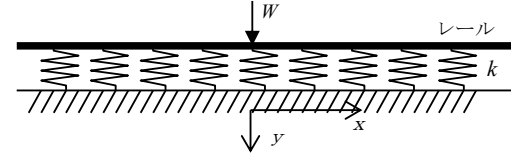


図-3 連続弾性支持モデル

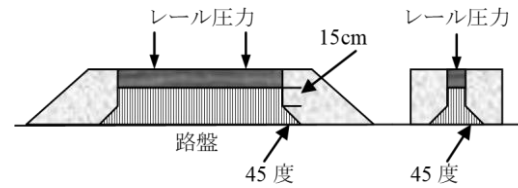


図-4 設計用道床内圧力分布図

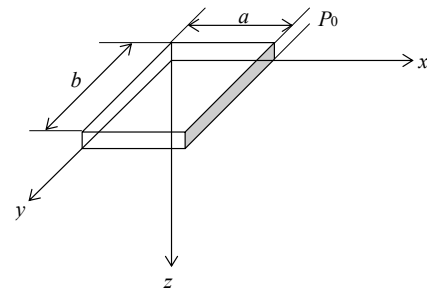


図-5 表面に作用する長方形荷重

ここに, EI : レール曲げ剛性, k : 単位支持ばね係数

b) 道床内の荷重分散

まくらぎ下面が道床に支持されているとして, 道床内での荷重分散は図-4のようにモデル化する. つまり, まくらぎ下面から 0.15m までは分散がなく, それ以深では 45度の分散とする.

c) 土中の荷重分散

土中の荷重分散は, 地盤を等方等質の半無限の弾性体と仮定したブーシネスクの基本式より導かれた等分布荷重の場合に用いられる式⁹⁾を使用する. 地下構造物の変形量が地盤の変形量に等しいと仮定すると, 上床版に作用する応力は地盤の応力に等しく, 次式で算定される.

$$\sigma_z = \frac{P_0}{2\pi} \left[\frac{mn}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \cdot \frac{1+m^2+2n^2}{(1+n^2)(m^2+n^2)} + \sin^{-1} \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}\sqrt{1+n^2}} \right] \quad (2)$$

ここに, $m=a/b$, $n=z/b$
また, a, b は図-5による

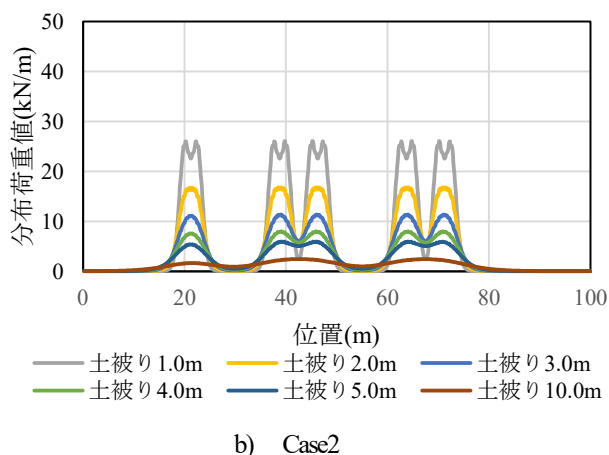
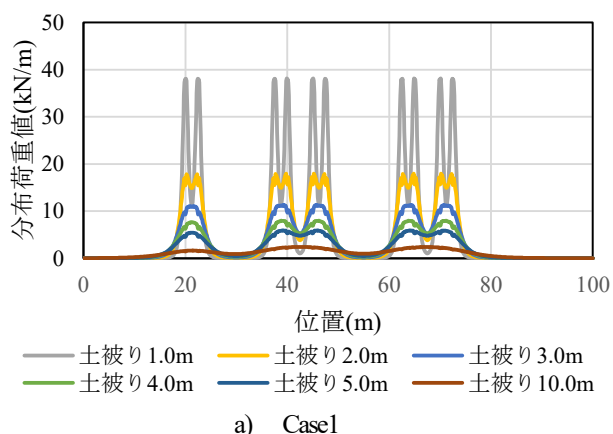


図-6 上床版位置での変動土圧分布

(2) 算定結果

上床版位置での変動土圧分布を図-6に示す。レール剛性による分散を考慮しない場合、土被りが 2.0 m 以下の条件では最大値が、レール剛性を考慮する場合と比較して大きく算出される結果となった。一方、2.0 m より大きい土被りでは、上床版位置での変動土圧に大きな差異は認められなかった。

以上より、列車荷重による変動土圧は、土被り 2.0 m 以下の場合にレール剛性による荷重分散の影響があることが分かった。

4. 等値等分布荷重への換算

(1) 換算方法

設計では図-7に示すように、「3. 列車荷重による土圧の算定」で算定した土圧（図-6）を移動させ、上床版に生じる最大モーメントが等値となるような等値等分布荷重に換算する。その際、図-8に示すように、固定間スパン長 L のく体をスパン長 L の単純桁とした。なお、せん断の照査に用いる等値等分布荷重も同様の手順で算出する⁶⁾。

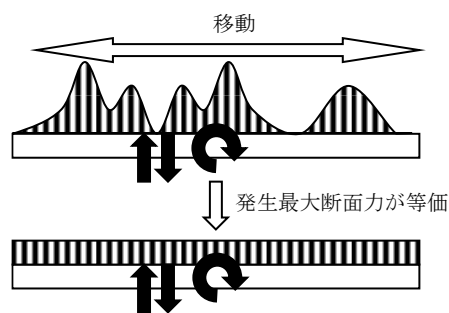


図-7 換算等値等分布荷重の考え方

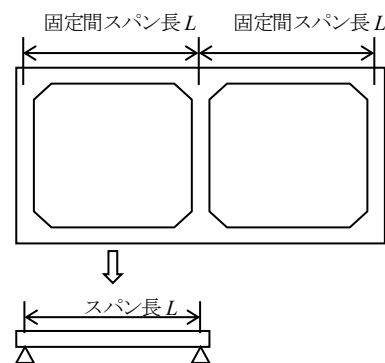


図-8 スパン長の考え方

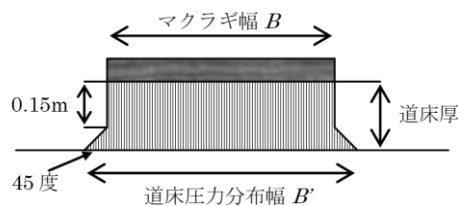


図-9 道床圧力分布幅

$$q'_M = \frac{8 \times M_{\max}}{L^2} \quad (L/2 \text{ の地点が最大の場合}) \quad (3)$$

$$q'_M = \frac{32 \times M_{\max}}{3 \times L^2} \quad (L/4 \text{ の地点が最大の場合}) \quad (4)$$

また、有効幅の考えより求めた低減率 β を乗じて、換算等値等分布荷重 q_M とする。

$$q_M = \beta q'_M \quad (5)$$

有効幅とは、スラブに荷重が作用するとき、この荷重に対して抵抗する範囲である。上床版の有効幅は固定された一方向スラブの考えを基本とし、計算の簡略化のため一律に $0.5L$ とする。ただし、この有効幅が路盤に伝わる道床圧分布幅 B' （図-9）より小さい場合は、道床圧分布幅を有効幅とする。

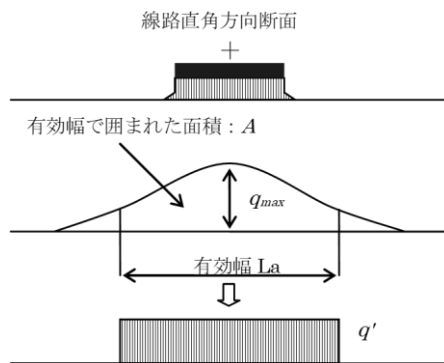
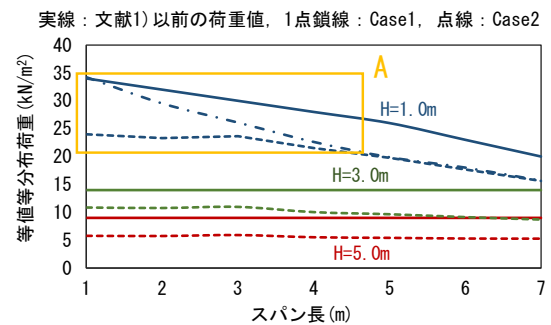


図-10 線路直角方向断面



※H=3.0, 5.0ではCase1とCase2の線が重なっている

図-11 荷重値の比較結果 (単線, P-16)

表-2 曲げモーメントを算出する場合の鉛直土圧(P-16)(kN/m²)

線別		単 線			複 線			複々線		
スパン L (m)		1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
土被り H (m)	0.0	133.0	67.0	45.0	133.0	67.0	45.0	133.0	67.0	45.0
	1.0	34.5	29.5	26.5	34.5	30.0	26.5	34.5	30.0	26.5
	2.0	16.0	15.5	15.5	16.5	16.0	16.0	17.0	16.5	16.5
	3.0	10.5	10.5	10.5	12.0	12.0	12.0	13.0	13.0	13.0
	4.0	7.5	7.5	8.0	9.5	9.5	10.0	11.0	11.0	11.0
	5.0	6.0	5.5	6.0	8.0	8.0	8.0	9.5	9.5	9.5
	10.0	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	7.0	7.0	7.0

線別		単 線				複 線				複々線			
スパン L (m)		4.0	5.0	6.0	7.0 以上	4.0	5.0	6.0	7.0 以上	4.0	5.0	6.0	7.0 以上
土被り H (m)	0.0	42.0	36.0	27.0	21.0	42.0	36.0	27.0	21.0	42.0	36.0	27.0	21.0
	1.0	23.0	20.0	18.0	16.0	23.0	20.0	18.5	16.0	23.0	20.0	18.5	16.0
	2.0	14.0	13.0	12.5	11.5	14.5	13.5	12.5	12.0	15.0	14.0	13.0	12.0
	3.0	9.5	9.0	9.0	8.5	10.5	10.5	10.0	9.5	11.5	11.0	10.5	10.5
	4.0	7.0	7.0	6.5	6.5	9.0	8.5	8.5	8.5	10.0	9.5	9.5	9.5
	5.0	5.5	5.5	5.0	5.5	7.5	7.5	7.5	7.5	9.0	9.0	8.5	9.0
	10.0	2.5	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	7.0	7.0	7.0	7.0

※レール剛性による荷重分散を考慮していない値。また、土被り 0m の値は橋梁の算定方法による。

$$La=0.5L \quad (0.5L > B') \quad (6)$$

$$La=B' \quad (0.5L < B') \quad (7)$$

線路直角方向の地中応力分布幅は図-10 のように、まくらぎ中心位置が最大値となる上に凸の分布となっている。ある位置におけるまくらぎ中心直下の地中応力を $q_{\max}$ とし、有効幅で囲まれる面積を A とすると、有効幅の考えよりその地点で上床版が受け持つ荷重は、有効幅 La で平均化した値となり、次式で算定する。

$$q' = A / La \quad (8)$$

有効幅 La で平均化した値 q' とまくらぎ中心直下の荷重 $q_{\max}$ との比を低減率 β とする。

$$\beta = q' / q_{\max} \quad (9)$$

ここで、低減率 β は、有効幅、求める深さ、載荷面積が同じならば、載荷荷重によらず一定である。

なお、複線および複々線の土圧については、以下の手

順で求めた割増係数 f を単線の値に乗じた。

- 単線の場合と同様に、まくらぎ中心位置の線路方向の地中応力分布を求め、最大地中応力 $q_{L\max}$ となる位置を求める。
- 線路直角方向の地中応力分布を求め、隣接線同士の分布を合成して、最大地中応力 $q_{C\max}$ を求める。
- 複線以上の割増係数 f を次式によって算定する。

$$f = q_{C\max} / q_{L\max} \quad (10)$$

(2) 換算結果

表-2 に Case1 の条件で算出した等値等分布荷重を 0.5 kN/m² 刻みで示す。なお、土被り 0m については橋梁と同じ算出方法で求めたものである。

図-11 に土被り $H=1.0, 3.0, 5.0$ m の場合について、従来の方法により算出した荷重値、Case1 および Case2 の条件で文献 1) の方法により算出した荷重値を示す。従来の荷重値と Case2 の算出結果を比較すると、M-18 の場合 (図-1 を参照) とほぼ同様な低減傾向を示している。ま

た、P-16 の場合にも精度の高い算出方法を用いる効果がみられることがわかる。

文献 1)の方法により算出した荷重値は、従来の方法により算出した荷重値と比較して、全体的に低減される結果が得られた。これは土中の荷重分散に用いた安全側の図解法（手計算）と、精度の高い影響円法による近似解法との差異と考えられる。

また、Case1 と Case2 の算出結果の差異は、土被りが小さくスパン長が短いとき（図-11 中 A）に表れており、その差は 10 kN/m^2 程度であった。つまり、レール剛性による荷重分散の影響はこの範囲で限定的に現れるものであり、レール剛性を考慮しなくても全体的に荷重値が低減することがわかる。

しかし、本解析ではレール剛性による荷重分散の効果を考慮するための単位レール支持ばね係数 k に在来線を想定した値（新幹線軌道よりも分散効果が大きい値）を用いたものの荷重値の差異は限定的であった。また、単位レール支持ばね係数 k はレール種類毎に異なるため、等値等分布荷重を算出する煩雑な計算がたびたび必要となることが想定される。そのため、この差異が設計結果に影響を及ぼす可能性はあるものの、設計実務における汎用性を考慮して表-2 に示す新幹線荷重による鉛直土圧は Case1 の算出結果を採用することとした。

5. まとめ

本研究では、文献 1)の方法を用いて新幹線荷重による

変動土圧の等値等分布荷重に関する検討を行い、以下の知見を得た。

- ・レール剛性による分散を考慮しない場合、土被りが 2.0 m 以下の条件で上床版位置における土圧分布の最大値が、考慮する場合と比較して大きく算出される。
 - ・土中分散の算出を安全側の図解法から、精度の高い影響円法等にすることで、全体的に等値等分布荷重が小さく算出される。
 - ・設計に用いる等値等分布荷重は、土被り 1.0 m 程度以下、スパン長 3.0 m 以下の限定的な範囲で、レール剛性による分散の影響による差異が認められた。
- これらの知見を踏まえ、新幹線荷重による鉛直土圧（等値等分布荷重）は、レール剛性による分散は考慮せず、道床による分散と土中分散を考慮した値を採用した。今後は他の列車荷重についても検証を進めるとともに、算出手法の精度向上にも取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 滝沢聡，棚村史郎：開削トンネルの列車荷重による上載荷重の検討，鉄道総研報告，Vol. 14，No.8，pp.7-12，2000.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，2004.
- 4) 佐藤吉彦：新軌道力学，鉄道現業者，1997.
- 5) 木村猛：土の応力伝播，鹿島出版会，1978.
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・開削編，2021.

VARIABLE EARTH PRESSURE ACTING ON UNDERGROUND STRUCTURE CAUSED BY RUNNING TRAIN ON GROUND SURFACE

Takashi NAKAYAMA, Takashi USHIDA,
Hiroyuki KAWANAKAJIMA and Ryo SAWADA

The underground structures under the railtrack is affected by the variable earth pressure caused by the running train on the ground surface. Also, the load is affected by the dispersing effect by the rail stiffness, track bed and ground material, and it is calculated through the complicated process. Therefore, some design standards provide the calculated variable earth pressure value as the equivalent uniform loads. However, It is provided only for passenger train load(M-18) and locomotive train load(EA-17). In this study, the equivalent uniform loads for Shinkansen load(P-16) is calculated for each earth covering and each the span of the box culvert.