

# 路床強度を確保する手法に関する検討

上浦正樹<sup>1</sup>・阿部長門<sup>2</sup>・三浦康夫<sup>3</sup>・金内正宏<sup>4</sup>・藤田博久<sup>5</sup>

- <sup>1</sup>正会員 工博 ジェイアールエフ・ホテル 業務部 (〒100 東京都千代田区丸の内 2-2-2)  
<sup>2</sup>正会員 工博 東亜道路工業(株) 技術研究所 (〒232 神奈川県横浜市南区中村町 5-318)  
<sup>3</sup>正会員 日本貨物鉄道(株) 運輸技術部 (〒100 東京都千代田区丸の内 1-6-5)  
<sup>4</sup>正会員 日本貨物鉄道(株) 運輸技術部 (〒100 東京都千代田区丸の内 1-6-5)  
<sup>5</sup>正会員 日本貨物鉄道(株) 運輸技術部 (〒100 東京都千代田区丸の内 1-6-5)

鉄道貨物ヤードにおいて使用されているコンテナ用フォークリフトは、輪荷重40tf近くなる荷役装置である。重輪荷重の交通を包含するコンテナ用荷役ホームにおいて、アスファルト舗装の路床強度は路床改良費と舗装厚に関係する舗装工事費の合計のトータルコストを考慮すると、設計CBRは6以上を確保することが経済的であることを明らかにした。また、路床強度の測定にあたり従来から用いられている CBR試験や平板載荷試験よりも簡易なHFWD (Handy Falling Weight Deflectometer) を路床強度の測定に使用して、これらの試験方法との対比を行った。この結果から、路床強度の測定に用いるうえでHFWDは有効な試験方法であることが確認された。

*Key Words : Asphalt pavement , heavy forklift , CBR test , Falling Weight Deflectometer , multi-layered elastic theory*

## 1. はじめに

日本貨物鉄道株式会社(以下 JR 貨物と呼ぶ)のコンテナ貨物ヤードでは、大型のフォークリフトにより鉄道コンテナを貨車およびトラックから取り卸し、または積み込むなどの荷役作業を行っている。この大型フォークリフトの輪荷重は、表-1に示すように通常の道路交通における場合よりもはるかに大きな値である。

そこで、大型フォークリフトによる輪荷重が載荷した場合のアスファルト混合物層下面の水平引張りひずみと路床上面の垂直圧縮ひずみを多層弾性計算を用いて算出し、重輪荷重の大型フォークリフトによるアスファルト舗装の供用性の低下を評価する方法とした。この方法では、米国アスファルト協会 (Asphalt Institute : AI) の破壊基準式<sup>1)</sup>を適用して、フォークリフトの載荷条件に基づく破壊するまでの輪数である許容載荷輪数を求めた。

そのうち、典型的なアスファルト舗装構成である表基層 (アスファルト混合物 : 厚さ 15 cm) , 上層

表-1 フォークリフトの輪荷重

種 類	積載荷重 (tf)	輪荷重 (tf)	
		(積載時)	(空車時)
12ftフォークリフト	7	10.3	4.2
20ftフォークリフト	15	20.1	7.8
トップリフター	24	33.7	15.5
リーチスタッカ	20	39.6	19.4

路盤 (アスファルト安定処理 : 厚さ 10 cm) , 下層路盤 (切込砕石 : 厚さ 25 cm) , 路床 (設計 CBR 8) のひずみと許容載荷輪数の計算例を示す (表-2) .

以上の検討により、JR 貨物で使用している大型フォークリフトによって生じるアスファルト舗装の供用性の低下は、アスファルト混合物の曲げによる疲労破壊よりも路床の繰り返し圧縮による永久変形の方がはるかに大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

そこで JR 貨物において制定した鉄道ヤード舗装設計基準<sup>2)</sup>においては、路床上面に発生する垂直圧縮ひずみから算定された許容載荷輪数をアスファル

表-2 各荷役装置のフォークリフトの許容載荷輪数

		12ftフォーク リフト	20ftフォーク リフト	トップ リフター	リーチ スタッカ
上層路盤面	下面の引張ひずみ(μm)	105	141	199	222
	許容載荷輪数 Nt(万回)	716	271	87	61
路床上面	上面の圧縮ひずみ(μm)	329	540	844	913
	許容載荷輪数 Nc(万回)	247	26	3.6	2.5

ト舗装の供用性を示す指標として採用した。従って、本研究では舗装の供用性における重要な因子である路床の強度を確保するための手法の検討を行うこととした。

## 2. 路床強度の確保

路床の支持力に関しては、アスファルト舗装要綱で CBR 法を用いて設計 CBR が 3 以上を確保することを基準としている。一方、軟弱な路床においては路床強度を確保するために、必要に応じてセメント安定処理や良質な材料による置換えなどの路床改良を行い、この路床改良のためにかかる改良費と舗装の工事費の合計のトータルコストを考慮しながら、路床強度を確保する設計が必要となってきた。

そこで、施工前の路床の設計 CBR を 3 とし、この設計 CBR が 4, 6, 8, 12 となるようにセメント安定処理による路床改良の厚さと設計条件を満たすために必要な舗装厚を求め、路盤材料を加熱式瀝青安定処理、開粒型大粒径路盤、水硬性粒度調整鉄鋼スラグとした時の直接工事費を算出した。この結果を、設計 CBR3 に対する比率で示したものが図-1 である。

この結果から、設計 CBR を 6 以上確保できれば、ほぼ経済的な舗装の断面設計が可能であることが明らかとなった。

## 3. HFWDによる路床強度の推定

### (1) 従来の路床強度測定法とHFWD

路床強度の評価方法としては CBR 試験、平板載荷試験、貫入抵抗試験などが用いられている。これらのうち CBR 試験は一般的に最も普及している試験方法であるが、現場試料の採取、室内試験を行う必要があることから、手間がかかり一日あたりの試験個数に限りのある方法である。一方、平板載荷試験は施工現場において測定し、 $K_{30}$  値として路床強

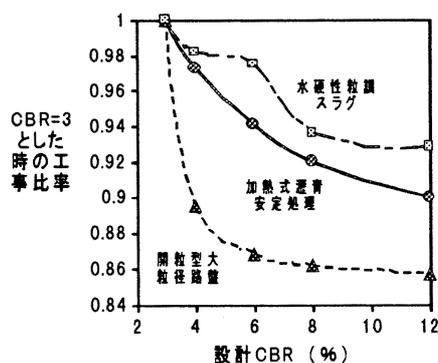


図-1 路床強度に対する直接工事費の比較

表-3 HFWDの諸元

荷板の直径	90mm
落下重錘質量	8kg
衝撃荷重	300~500kg
落下高さ	50~350mm
測定たわみ	0.1~2.0mm

度を評価する方法であるが、現場での測定装置のセットや反力装置を必要とするなどの多くの労力を要することから、もっと簡易でかつ現場測定が可能な試験装置が望まれているところである。

HFWD は、落下重錘式のたわみ測定装置である Falling Weight Deflectometer (FWD と略す) を簡易にした装置である。この HFWD の諸元を表-3に示す。

この装置の測定原理は、8 kg の重錘を自由落下させることにより、300 ~ 500 kgf の衝撃荷重が発生し、このときの載荷点直下と載荷点から 60cm 以内の任意の位置のたわみ量 (2 つのたわみ量) を測定するものである (写真-1)。

### (2) $K$ 値とCBR値の関係

現場 CBR と平板載荷試験による  $K_{30}$  値との関係は、ミドルブルークスらの換算曲線<sup>3)</sup>がよく知られているが、我が国においては植下<sup>4)</sup>により次式がまとめられている。



写真-1 HFWD 装置

$$K_{30} = 0.555 \times \text{CBR} + 2.2 \quad (1)$$

一方関根ら<sup>5)</sup>は、平板載荷試験、FWD、HFWDの各試験方法で得られた路床の支持力の関係を求めた。この中で、HFWD から推定した K 値と繰返し平板載荷試験の除荷後の接線より求めた kv 値とはかなり高い相関があり、締固めの程度の高い場合にはその比がほぼ 1:1 となることを報告している。さらに、HFWD から推定した K 値と道路の平板載荷試験による  $K_{30}$  値との関係も調べており、両者の関係はほぼ 1:2 となることを報告している。

ここでは、HFWD の載荷板の直径が 9cm であることから載荷板の直径が 30cm に対しての K 値を得るために、線形的な補正を用いている。

$$K_{\text{HFWD}} = K_9 \times (D_9 / D_{30}) = K_9 \times 0.3 \quad (2)$$

ここに、 $K_{\text{HFWD}}$  : 補正後の K 値 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$K_9$  : HFWD による K ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$D_9$  : HFWD の載荷板の直径 9cm

$D_{30}$  : 一般的な載荷板の直径 30 cm

従って、ここに HFWD で求めた補正後の K 値 ( $K_{\text{HFWD}}$ ) と平板載荷試験で求まる K 値 ( $K_{30}$ ) との関係求めた (図-2)。

これにより、

$$K_{\text{HFWD}} = 1.9 \times K_{30} \quad (3)$$

または、 $\text{CBR} = 0.95 \times K_{\text{HFWD}} - 4.0$

### (3) HFWDによる弾性解析

HFWD を用いてたわみ量を測定し、これを多層弾性計算により計算されたたわみと比較することにより、いくつかの層の弾性係数を推定することが可能である。ここでは、路床の 1 m を 2 層と仮定し、0.2 m 単位で層厚を変化させて、HFWD から簡便に各層の CBR 値の推定が可能か検討を行うこととした。

#### 1) 各層厚が未知のケース

HFWD によって、載荷点直下のたわみ量を

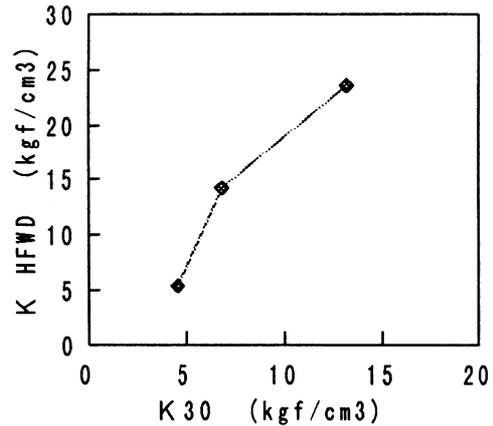


図-2  $K_{\text{HFWD}}$  と  $K_{30}$  の関係

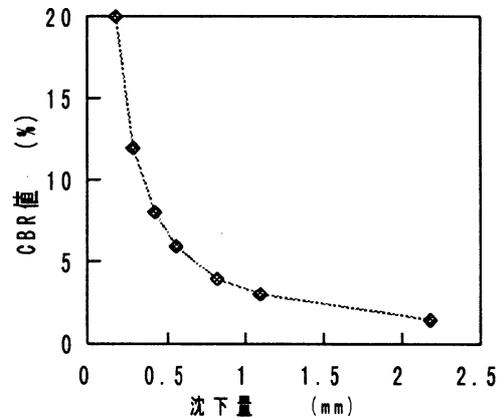


図-3 HFWD による CBR 値の推定 (載荷点直下)

Timoshenko の弾性論で導かれた次式により推定する。

$$d = ap(1 - \nu^2)/2E \quad (4)$$

ここに、 $d$  : 剛性円形載荷板の表面沈下量 (mm)

$P$  : 載荷応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\nu$  : ポアソン比

$a$  : 円形載荷板の半径 (cm)  $E$  :

路床の弾性係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

ここで、路床を表面から 1 m と仮定して 1 層または 2 層で構成される場合における平均 CBR と沈下量を載荷点直下のみの場合 (図-3) と載荷点直下および載荷点から 20cm の地点について求めた (図-4)。この計算では、多層弾性計算に基づき 2 層の CBR 値のうち上層が下層よりも小さいときには上層の値を用いることとし、上層路床および下層路床の CBR 値を 1.5、3、4、6、8、12、20 の組み合わせとした。層厚は、上層の厚さを 0、20、40、60、80、100cm とし、これに合わせて下層の厚さを設定する。なお、計算に用いる路床の弾性係数は、 $E = 100 \times \text{CBR}$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ) で換算した。

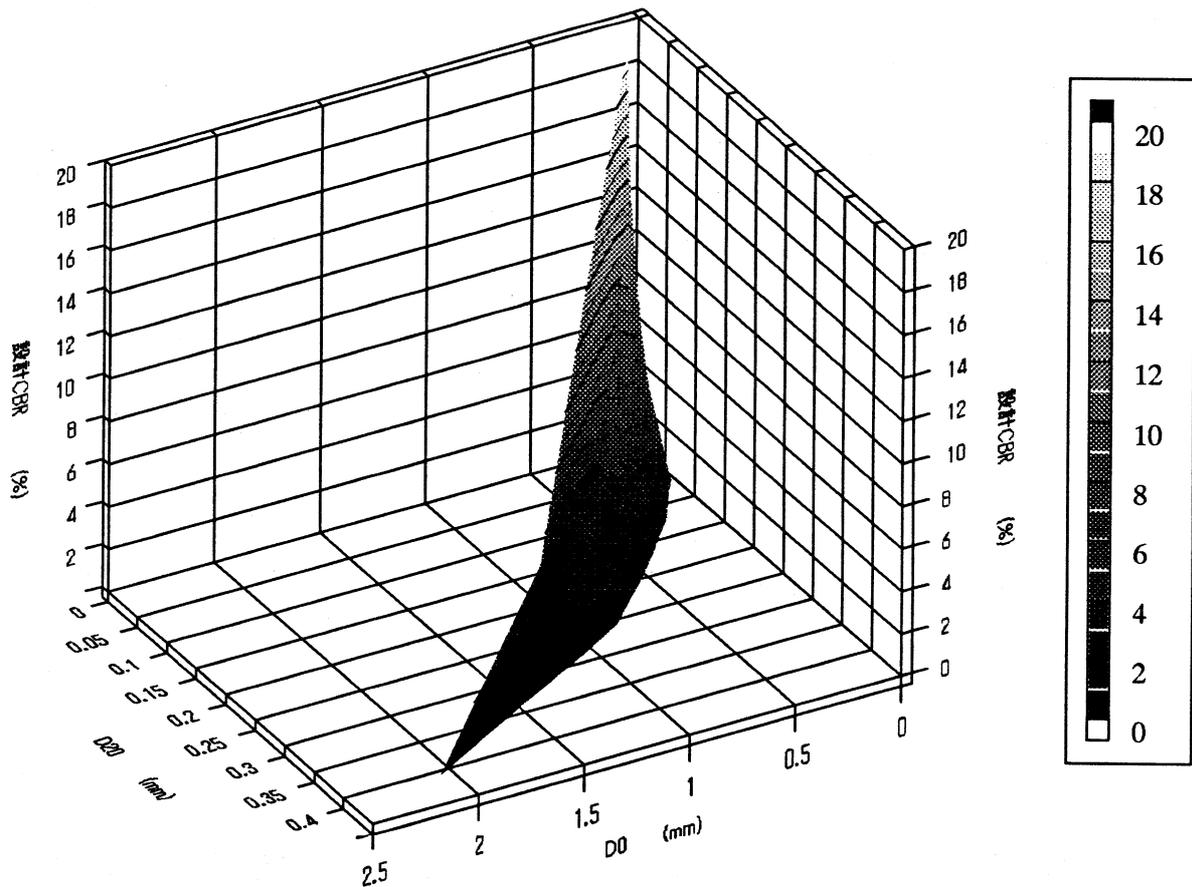


図-4 HFWD による CBR 値の推定 (D0, D20 の 2 点法)

表-4 路床強度の特性

	施工前		施工後	
	改良前	路床 1m	改良厚 60cm	
地点 CBR (%)	2.6	10.3	20	
K HFWD (kgf/cm <sup>3</sup> )	5.5		26.1	
推定 K 30 値	2.9		13.7	
HFWD の推定 CBR (%)	1.1		20.7	

この結果から、路床の構造が未知な場合において HFWD により 2 箇所の変形量が計測できれば CBR 値の推定が可能となった。

## 2) 各層厚が既知のケース

路床を 2 層とする場合に、多層弾性計算を用いた逆解析により各層の弾性係数の推定が可能である。この逆解析方法は、HFWD で得られた測定たわみと計算たわみの残差平方和 (RMS) を最小にする方法である<sup>6)</sup>。

$$RMS = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} \quad (5)$$

ここで、RMS：残差平方和

$x_1$ ：荷点直下の計算たわみ

$x_2$ ：荷点より 20cm 離れた位置の計算

たわみ

$y_1$ ：荷点直下の測定たわみ

$y_2$ ：荷点より 20cm 離れた位置の測定たわみ

## 3) 実際の適用例

宇都宮貨物ターミナル駅のコンテナ荷役ホーム増設工事において CBR 試験と HFWD (荷点直下のたわみと荷点より 20cm の地点の測定) によるたわみ測定を行った。施工前後の路床土の特性を表-4 に示す。

表-4 は、HFWD の結果より K 値を推定し、換算係数 1.9 を用いて  $K_{30}$  値を推定し、式(1)を用いて CBR 値を推定したものである。

路床改良前は、本箇所の CBR 値に比べ HFWD から推定した CBR 値がかなり小さいものの、改良後の結果では HFWD からの推定値の方が大きくなっている。

この原因としては、本箇所の土質は自然含水比 95% の軟弱な関東ロームであり、改良後は上層が強固となったため、荷重の分散性能の違いが前後の推定結果の違いに表れたものと推定される。

路床改良前後の解析結果により、CBR 試験結果と HFWD (直下のたわみ測定のみ) では、ほぼその範囲内にあることが確認された。

#### 4. ジオテキスタイルを用いた路床強度の確保

##### (1) 施工の背景

凍結寒冷地の舗装は、気温 0 度以下の日がつづく路床土が凍結するようになり、現象として凍上が発生したりする。さらに、春先の融解期にアイスレンズが融けて路床の含水比が急激に高くなり、軟弱化を起こすようになる。これを防止するために、寒冷地の舗装では一般に凍上しにくい材料によって路床土を置き換えている。凍結深さが設計舗装厚よりも大きいときは、その差に相当する分が凍上抑制層となり、粒状材料による置換え工法が使われている。この置換え層によって、軟弱な路床では路床強度が増加する。そこで、凍上抑制の効果をもちつつ所定の路床強度を確保する方法として、置換え層とジオテキスタイルを併用する方法について検討を行った。

##### (2) ジオテキスタイルの設計と施工

軟弱な路床にジオテキスタイルを敷設して路床強度を確保する方法は、米国等で今まで数多くの事例がある。しかし、JR 貨物では適用例がなく、北海道支社北旭川駅構内の貨物ヤードで試験施工をすることとした。本貨物ヤードの舗装設計条件を表 -5 に示す。

従来の設計法においては、CBR 3 以下の路床改良時に置換え工法を施工する場合は「施工厚から 20cm を減じたもの有効改良厚とするもの」としている。一方、米国においてはジオテキスタイルを使用して路盤と路床の境界を設けた場合には、路床強度が 1.8 (1.6 ~ 2.0) 倍程度増加することが報告されている<sup>9)</sup>。

そこで本設計においては、路床の置換え深さ (掘削深さ) をできるだけ少なくするために、軟弱地盤の一部 (深さ 60cm) を置換え、従来の設計法では地点 CBR が 3.8 となるが、この層の下面にジオテキスタイルを敷設して所定の路床強度 (設計 CBR 6 以上) を確保することとした。ジオテキスタイルの諸元を表 -6 に示す。上記の参考文献に基づき、最小の 1.6 倍をジオテキスタイルの使用による路床強度の増加として設計 CBR を 6.1 (=3.8 × 1.6) とした。

表 -5 貨物ヤードの設計条件

地点 CBR (%)	0.5
5tf 換算輪数	120 万回
凍結深さ	120 cm
置換え深さ	84 cm

表 -6 ジオテキスタイルの諸元

重量 (g/m <sup>3</sup> )	160
引張強度 (kg・5cm)	150 × 140
伸び率 (%)	28 × 23
厚さ (mm)	0.52

表 -7 CBR 値の設計値と路床弾性係数から推定した測定値の比較

	CBR (%)	
	設計値	FWD 測定値
路床上部	20	-
路床下部	0.5	-
平均値	6.1	6.5
平均 E <sub>sg</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	610	650

##### (3) FWD による路床強度の推定結果とその評価

施工後約 8 月を経過した後、FWD により舗装体と路床の構造評価を行った。CBR の設計値と路床弾性係数から推定した測定値の比較を表 -7 に示す。

この結果、FWD による路床強度は 6.5 と推定され、ジオテキスタイルの使用によって所定の路床強度を確保できることが確認できた。この理由としては、ジオテキスタイルを用いることで置換え層の粒状碎石と軟弱な路床土の境界を形成することができ、碎石のめりこみなどを防止することで沈下を抑制できたことなどがあげられる。

## 5. まとめ

本研究で以上のことが明らかとなった。

1) JR 貨物では、コンテナ荷役ホームで大型フォークリフトを使用しているが、この箇所に用いるアスファルト舗装では路床強度が CBR 6 以上確保することが路床改良を考慮したトータル工事費で最も経済的であることが明らかとなった。

- 2) 路床強度を確保するための測定方法として、CBR 試験法や平板載荷試験法に変わって、HFWD を使用できる可能性を明らかにした。
- 3) HFWD と多層弾性計算を組み合わせ、路床の弾性係数や CBR 値が推定できる。適用例に基づき、CBR 試験による結果と HFWD から算定した結果がほぼ一致しており、HFWD で路床強度の推定が可能となった。
- 4) ジオテキスタイルと置換え層を併設した路床改良後の強度は、参考文献 6) と同様な地点 CBR 値の約 1.6 倍の強度となった。このため、軟弱地盤におけるジオテキスタイルを敷設することの有効性が確認された。
- 2) 上浦正樹, 丸山暉彦, 姫野賢治, 阿部長門: 鉄道貨物ヤードにおけるアスファルト舗装設計に関する研究, 土木学会論文集, No. 520, pp. 47- 54, 1995.
- 3) 最上武雄, 福田秀夫: 現場技術者のための土質工学 鹿島出版会, 1975.
- 4) 植下協: 講座「舗装の力学」, 舗装, 8-6, pp.33-38, 1973.
- 5) 関根悦夫, 村田修, 木幡行広, 矢崎澄夫, 阿部長門, 雑賀義夫, 丸山暉彦: 礫材を用いた鉄道盛土の転圧試験 (5), 第 31 回地盤工学研究発表会, D-9, 1174, pp. 2347-2348, 1996.
- 6) T. A. Haliburton, J. D. Lawmaker, V. C. McGuffey 著, 田中茂, 山岡一三, 廣田泰久訳: ジオテキスタイル設計マニュアル, 土木工学社, pp.113-117, 1987.  
(1996.10.14 受付)

#### 参考文献

- 1) The Asphalt Institute: Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), Ninth Edition, pp. 7 - 13, 1982.

## RESEARCH OF THE METHOD ESTIMATING AND MAINTAINING THE SUBGRADE STRENGTH

Masaki KAMIURA, Nagato ABE, Yasuo MIURA, Masahiro KANAUCHI, Hirohisa FUJITA

This paper concerns the development of the pavement structural design in railway container yards where weight forklifts are driving for loading works. One important objects in this paper is to estimate the subgrade strength easily. By the economical analysis on the construction cost, the minimum subgrade strength was decided as CBR 6. HFWD was introduced to estimate the subgrade strength which is more conveniently estimate the strength. The other object is to maintain the subgrade strength more inexpensively. The geotextile was introduced to the subgrade in the yard pavement in the cold area and the construction cost was less than the conventional methods.