

インターロッキングブロック舗装の たわみ特性に関する研究

柳沼宏始¹・矢澤修一²・笠原篤³

¹正会員 アイエルピー株式会社 技術開発部(〒113-0033 東京都文京区本郷1丁目28番地23号)
E-mail:h.yaginuma@ilb.co.jp

²正会員 アイエルピー株式会社 関連事業部(〒113-0033 東京都文京区本郷1丁目28番地23号)

³正会員 工博 北海道工業大学教授 社会基盤工学科(〒006-0817 札幌市手稲区前田7条15丁目)

本研究では、インターロッキング(IL)ブロック舗装におけるブロック間の荷重伝達率にブロック寸法・目地材料・路面の締固め方法等が与える影響、および路盤構造の強弱とILブロック舗装の荷重分散性能の関係を明らかにすることを目的として、小型のFWDであるHFWDを用いて供用中の車道舗装や試験舗装にてたわみ測定を行った。その結果、ブロック寸法と荷重伝達率には高い相関のあることが確認でき交通量に応じたブロック寸法を提案することができた。さらに、目地砂の機能を明らかにし、供用中の車道舗装において、路盤構造の差異が荷重分散性能に与える影響、ILブロック舗装の破損部と健全部におけるたわみ特性の差異を明らかにした。

Key Words: *hfwd, effect of interlocking, deflection ratio, evaluation of bearing capacity, joint and bedding sand*

1. はじめに

インターロッキングブロック(以下、ILブロックと呼ぶ)は、1974年頃に旧西ドイツより我国にその製造技術が導入された。それ以来、ILブロック舗装は歩行者系道路を中心に車道舗装や空港、港湾といった重荷重エリアにも適用されるまでに普及し、2000年時点でおよそ900万 m^2 /年、総供用面積では1億 m^2 に至っている。

この舗装は、レベリング層にクッション砂、目地部にも砂を使用する乾式工法により施工され多種多様な形状や色調、敷設パターンを選択性が高く、周辺環境と調和した舗装面を演出できることが普及した大きな要因として挙げられる。しかしながら、我国に導入されて30年近くが経過した現在でも、ILブロックの形状・寸法に関する明確な国内規定が定められていない。これは、ブロック寸法と噛み合わせ効果の関係をはじめ、目地砂の機能に関する基本的な研究がほとんど行われていないことによると推測される。このため、近年では設計者等のニーズも多様化し、車両乗入れ部に大版サイズ(200×300mm以上)のブロックが使用され

たり、目地砂の代わりにブロック側面にゴムを附着させた製品が使用されて供用後に問題となることも少なくなかった。したがって、ILブロックの寸法が荷重伝達率に与える影響と目地砂の機能について明確にすることが必要となる。また、現状の施工方法は車道舗装であっても歩道舗装と同様に手押しの専用コンパクトにより転圧が行われており、大型車交通量の多いバスターミナルや交差点部等では十分な締固め効果が得られないことに起因する供用初期段階での変形や変形に伴うブロックの破損も懸念される。施工後良好な供用性を維持するためには、路面の締固め方法が目地砂の充填率や荷重伝達率に与える影響について確認した上で、施工時の転圧方法を確立する必要がある。

ILブロックを用いた車道舗装では、舗装構造と荷重分散性能の関係や供用中に破損が生じた場合の破損部と健全部における荷重分散性能の比較に関する調査、研究についてもほとんど行われていないのが現状である。特に、供用中に破損が生じた場合では、短時間で敏速にしかも簡便に多数の支持力やたわみの測定が行える非破壊式の試験機が適用できれば、適切な支持力評価や施工管理が可能となり供用中の破損が低減でき、

適切な維持修繕工法の選定も可能となる。そこで、著者らは 1993 年に国内で開発された小型のフォーリング・ウェイト・デフレクトメータであるハンディ FWD¹⁾ (以下、HFWDと呼ぶ) を用いて、ILブロック舗装上にてたわみ測定を行った。なお、HFWDはアスファルト舗装の支持力評価²⁾や鉄道の土路盤の強度管理³⁾等にも利用されている。

本研究では、まず基本的な課題であるブロック寸法がILブロック舗装の荷重伝達率に与える影響や目地砂の機能について検証した。次に、施工上の課題であるILブロックの締固め方法が目地砂の充填率や荷重伝達率に与える影響についても確認した。これらの結果を基にたわみ測定の方法を検討することにより、供用中の車道舗装におけるILブロック舗装の荷重分散性能の比較にもHFWDの適用を試みた。

2. ILブロック層としての荷重分散作用

ILブロックは、図-1 に示すように 20~30 mm厚のクッション砂上に 2~3 mm程の目地幅を確保して敷設され、その目地には砂が充填される。目地幅は、ブロック周囲に設けられている目地キープにより確保される。ILブロックとクッション砂を除いては、構造的には従来のたわみ性舗装とほとんど違いはない。この舗装の原理は、ブロック相互の噛み合わせによって交通荷重を分散させて下方および側方に伝達させるため、ILブロック下部のクッション砂と目地砂は舗装が良好な供用性を維持するために、極めて重要な役割を担っている。

輪荷重直下のILブロックが沈下することにより密な状態にある目地砂には、せん断変形が生ずる。このせん断変形により、目地砂が体積膨張する正のダイレタンシーに起因するブロック間に水平方向の圧縮力が発生し、隣接するILブロック相互の間に荷重が伝達される⁴⁾。また、ILブロック舗装は、ある程度の交通荷重の繰り返しを受けることにより、目地砂とクッ

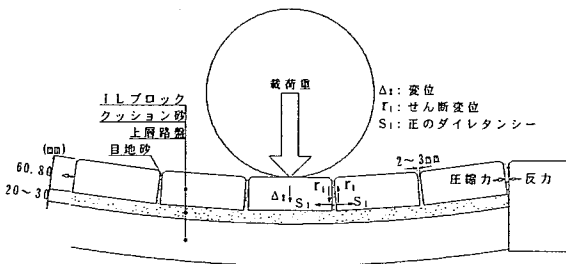


図-1 ILブロック舗装の原理

ション砂が密な状態となり、施工直後に比べてILブロックのたわみが徐々に減少する特性を示す。これにより、個々のブロック間には、目地砂の正のダイレタンシーにより水平方向の圧縮力が常に存在することとなり、強く噛み合うことで舗装体が版として荷重分散性能を発揮するようになる。このように、目地砂やクッション砂がち密化し、ブロックとブロックが強く噛み合った状態をロックアップ(lockup)⁵⁾と呼んでいる。このロックアップの挙動は、ILブロック舗装特有のものであることから、ブロックの目地には注入目地材などの固結材料を砂の代わりに使用することは望ましくない。

クッション砂は、ILブロックの安定性と平坦性を確保するとともに、ILブロック層に加わる荷重を均一に分散して路盤に伝達する役目と、目地の下部に充填する砂の供給源としての役割もある。施工中や交通荷重下で、目地砂の正のダイレタンシーに起因するILブロック間の水平方向の圧縮力が発生し荷重分散性能を生じるため、これらの圧縮力に対して反力を発揮させることのできる舗装端部の拘束が不可欠となる。

なお、舗装構造体の荷重分散性能とは、荷重をその層で分散させる程度を表わす概念であり、たわみの大小、層の弾性係数の大きさ等で一般的には表されることから、ILブロック舗装についても多くの研究がなされている。

そこで、本研究ではHFWDを用いたたわみ測定からILブロック舗装の荷重分散性能を評価した。

3. ハンディFWDの概要

本研究で用いたHFWDは、小型FWDの1種であり、技術者が多くの現場にて舗装に関する情報を得る

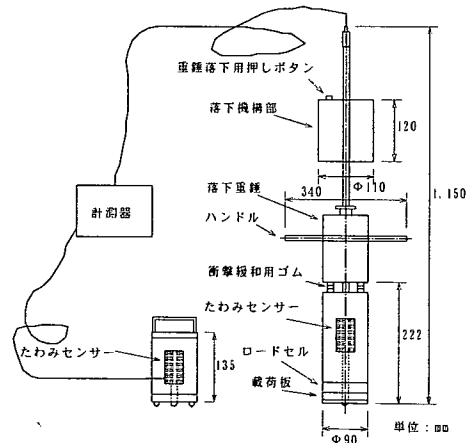


図-2 HFWDの外観図

表-1 HFWDの諸元

総重量	22kg
落錘重量	8kg
載荷板直径	90mm
最大落下高さ	800mm
載荷時間	5~30msec
荷重	0~5.0kN
たわみ計測範囲	0~2mm
たわみの分解能	0.001mm

表-2 海外におけるILブロックの寸法規格

国名	形状または寸法規定
米国	上面積 0.065 m ² 以下で長辺長と厚さの比 4.0以下
ドイツ	長辺長と厚さの比 4.0以下 (これより大きいものは平板)
英国	長さとは幅は 250 mm以下、長辺長と厚さの比 5.0以下、幅は 50 mm以上でどの端部からでも 50 mmの長さ

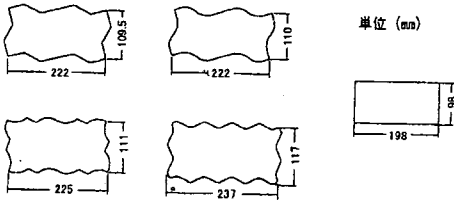


図-3 車道に一般的に使用されているブロック形状

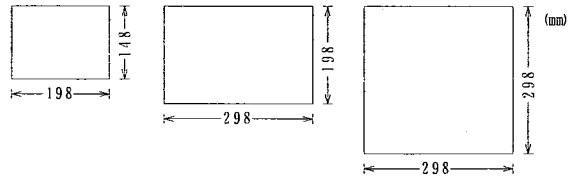


図-4 ストレートタイプのブロック形状

ことができるポータブルな載荷試験器であり、次のような特徴を持っている。

- 総重量が 22kg と軽量で運搬が容易である。
- 測定時間が 1 点約 1 秒と短く、短時間で多数のデータ収集が可能である。
- 載荷板直径が 90 mm であることから、ブロック 1 個 (100×200 mm サイズ) を抜き取るだけで、現場の路盤上でのたわみ測定が可能である。
- 比較的狭小箇所でも測定が可能である。
- 現場で路床および路盤材の締固め度の調査が可能となる。
- センサーの増設が容易でたわみ形状も得ることができる。

この装置は落錘部と計測部から構成されている。測定原理は 8kg の重錘を自由落下させる方式である。この時、3.0~5.0kN の衝撃荷重が発生して載荷点直下と載荷点から任意の位置のたわみを同時に測定することができる。図-2 に HFWD の外観図を、表-1 にその諸元を示す。IL ブロック上でたわみ測定を行う時は、基準荷重を 4.9kN とし、1 測点での重錘の落下回数は 3 回以上で、最初の落下を予備載荷として削除し、2 回目以降の荷重とたわみを測定データとして記録している。

4. ILブロックの荷重伝達率

(1) たわみ試験用 ILブロック舗装

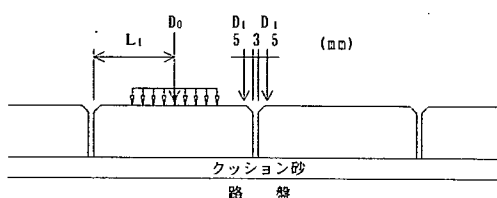
我国における IL ブロック舗装の定義は、インターロッキングブロック舗装設計施工要領書⁶⁾以下、要領

書と呼ぶ)によると、「小さなコンクリートブロックをクッション砂の上に敷設し、目地砂を介してブロック相互を噛み合わせる構造形式の舗装」としており、明確にブロック形状と寸法については規定していない。これに対して、海外では表-2 に示すように米国は ASTM⁷⁾で上面積の値と長辺長と厚さの比で寸法を規定し、ドイツでも「ドイツ連邦共和国におけるコンクリートブロックの適用(プランニング、設計、施工、引渡し)」⁸⁾の中で、長辺長と厚さの比により寸法を規定して明確に平板と区分けしている。また、英国では BS で米国やドイツよりも厳格に長さとは幅の値、長辺長と厚さの比、幅の規定を設けて極端に寸法の小さい形状は除外している⁹⁾。

我国の IL ブロックの形状は、長方形、正方形、六角形、八角形、多角形と多種多彩であり、ブロック側面の仕様は波形とストレートタイプに大別される。この中で、図-3 に示した長方形の波形とストレートタイプのブロックが車道舗装に一般的に使用されている。車道舗装における波形とストレートタイプの使い分けは、要領書によると大型車交通量が 100 台/日・方向以上では波形に限定している。これは、ストレートタイプに比べて波形の方が噛み合わせ効果が高いと考えられているためである。しかしながら、大型車の乗入れが少ない車道舗装等では、これらのブロックよりも寸法が大きいストレートタイプのブロック(図-4)も使用されるケースが年々増加する傾向にある。これらは、寸法の大きいストレートタイプのブロック程重厚感や安定感があると設計者等が認識していることによると思われる。車両通行の無い歩行者系道路では、これらのブロックを使用しても問題無いものの車道舗装では

表-3 試験舗装の内容

舗装番号	敷設パターン	ブロック形状	寸法 (mm)			長辺長 / 厚さ	目地	舗装構造
			長辺	短辺	厚さ			
1	ストレッチャーボンド (STB)		398	298	60	6.63	砂	
2	"		298	198		4.97		
3	"		198	148		3.30		
4	ヘリンボンボンド (HBB)		198	98		3.30		
5	"		222	109		3.70		



- D_0 : ブロック中心部のたわみ
- D_1 : 載荷側ブロック内の目地縁部
または隅角部のたわみ
- D_1' : 目地を挟んで隣接する非載荷側ブロックの
目地縁部または隅角部のたわみ
- L_1 : 載荷板中心とブロック縁部 (隅角部) との距離
(ブロック形状により 99~247 (mm) と可変)

図-5 2つのセンサーの設置位置

ブロック寸法が大きくなる程噛み合わせ効果や荷重分散性能が低下し、段差や沈下が生じている。したがって、ブロック寸法と噛み合わせ効果の関係を明確にした上で、車道舗装に適用できるブロック寸法を規定する必要がある。

そこで、ILブロックの寸法が荷重分散性能に与える影響を確認することを目的に、北海道岩見沢市内の工場構内に寸法の異なるストレートタイプ4種類と波形タイプ1種類、計5種類の長方形タイプのブロックを用いた試験舗装を施工し、HFWDを用いてたわみ測定を行った。たわみ試験用舗装の内容を表-3に示す。なお、表-3に示したストレッチャーボンド (以下、STBと呼ぶ) とヘリンボンボンド (以下、HBBと呼ぶ) は、ILブロックの代表的な敷設パターンである。ブロックの寸法が小さい舗装番号4と5はSTBかHBBで施工され、これより寸法が大きい舗装番号1~3はSTBで施工されるのが一般的である。

(2) たわみ測定の方法

HFWDによるたわみ測定の方法は、図-5に示すようにまず任意のブロックの中心部にHFWDの載荷板の中心部を設置し、増設センサー (以下、第2センサーと呼ぶ) を載荷側ブロック内の目地近傍に設置して

行った。次に、第2センサーだけを目地を挟んで隣接する非載荷側ブロックの目地近傍に設置してたわみを測定する。噛み合わせ効果は、式(1)を用いて載荷側ブロックの目地近傍のたわみ量 (D_1) と目地を挟んだ状態におけるたわみ量 (D_1') の比で評価した。その比が1.0に近い程、目地を挟んだ2つのブロックのたわみが近似しており噛み合わせ効果が高いと言える。それゆえ、ここではこのたわみ比を荷重伝達率と呼び、ブロック寸法と荷重分散性能の関係を評価する指標として用いるものとする。測定は、3地点ずつブロック毎に行った。

$$\text{荷重伝達率} = D_1' / D_1 \quad (1)$$

ここで、 D_1 : 載荷側ブロックの目地近傍のたわみ量 (mm)

D_1' : 非載荷側ブロックの目地近傍のたわみ量 (mm)

なお、第2センサー (D_1) の設置位置については図-6の①~⑤に示すように目地縁部と隅角部に置くケースに分けて測定した。ここで、目地縁部についてはブロック短辺方向に載荷板と第2センサーを設置する

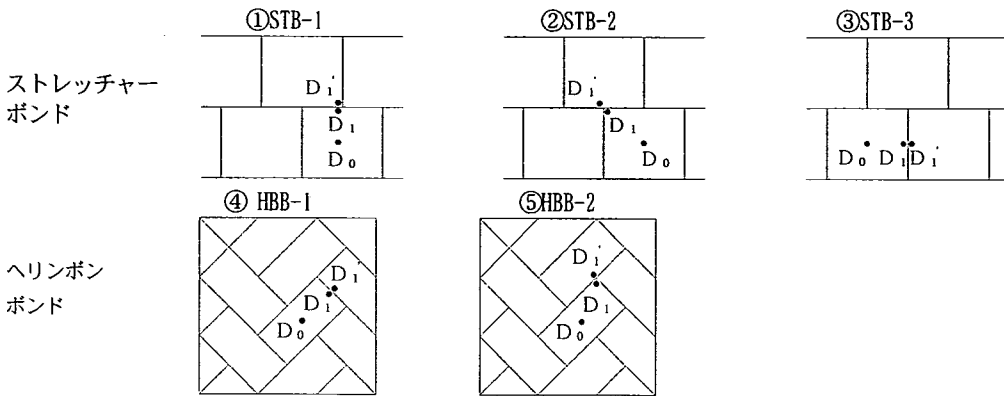


図6 たわみ測定のパターン

表-4 I Lブロックの荷重伝達率

舗装番号	舗装構造		縁部荷重伝達率とその変化率				隅角部荷重伝達率とその変化率			
	ブロック寸法 (mm)	全側面積と上面積との比	測定パターン	①目地砂未充填, クッション砂未締固め状態	②目地砂充填, クッション砂締固め状態	変化率(②/①)	測定パターン	①目地砂未充填, クッション砂未締固め状態	②目地砂充填, クッション砂締固め状態	変化率(②/①)
1	298×398	0.70	STB-1	0.20	0.25	1.25	STB-2	0.09	0.13	1.44
2	198×298	1.01	STB-1	0.14	0.36	2.57	STB-2	0.12	0.31	2.58
3	148×198	1.42	STB-3	0.14	0.60	4.29	STB-2	0.11	0.53	4.82
4	98×198	1.83	HBB-1	0.12	0.66	5.50	HBB-2	0.16	0.79	4.94
5	109×222	1.71	HBB-1	0.11	0.59	5.36	HBB-2	0.13	0.65	5.00

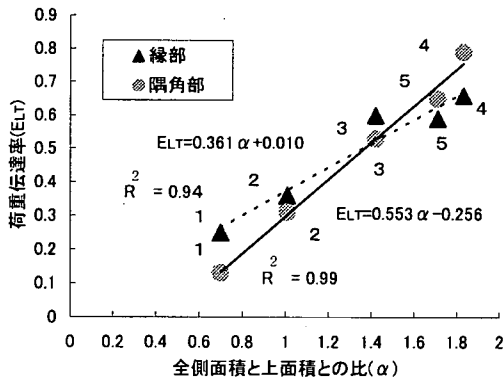


図-7 締固め状態における荷重伝達率

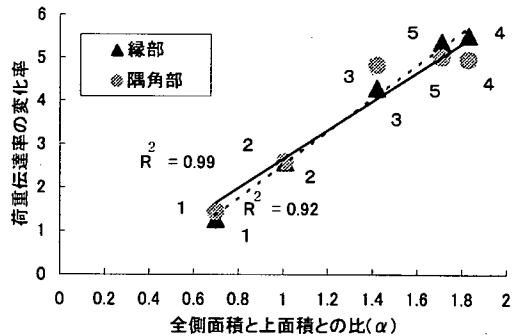


図-8 荷重伝達率の変化率

こととしたが、舗装番号3のブロックについては、短辺寸法が148mmと短く、載荷側ブロック内の目地縁部に第2センサーを設置するのに必要な距離(図-5のL₁に相当)90mm以上を確保できないため、長辺方向に設置(STB-3)した。

また、目地砂充填の有無とクッション砂の締固め度による荷重伝達率の変動を確認するために、未締固めのクッション砂上にILブロックを敷設しただけの状態(目地砂未充填・クッション砂未締固め状態)とこの状態から目地砂を充填し、コンパクタによりブロックを転圧してクッション砂が締め固まり交通開放できる状態(目地砂充填・クッション砂締固め状態)とに

分けてたわみを測定するとともに、荷重伝達率を算出して両者の差による評価を行った。

(3) ブロック寸法が荷重伝達率に与える影響

HFWDにより測定したブロック毎のたわみ量の平均値を用いて算出した、荷重伝達率と荷重伝達率の変化率を表-4に示す。なお、舗装番号5のブロックについては、波形タイプを使用しているため、長辺と短辺の寸法が同じストレートタイプのブロックに比べると全側面積と上面積との比は、1.04倍の1.71となる。図-7、8は、表-4に示した目地砂充填・クッション砂締固め状態における荷重伝達率やその変化率と各プロ

ックの全側面積と上面積との比の関係を示したものである。なお、図中の数字は舗装番号を表している。これより縁部、隅角部とも締固め状態における荷重伝達率やその変化率と全側面積と上面積との比に高い相関のあることがわかる。荷重伝達率やその変化率は縁部、隅角部とも分散分析の検定で何れも1%で有意を示し、決定係数(R²)でも0.9以上の高い結果が得られた。

ブロックの全側面積と上面積との比が大きいかは、厚さが一定の場合ブロック寸法の小さい方が、寸法も一定の場合にはストレートタイプより波形タイプの荷重伝達率が高くなることを意味する。ブロック寸法が小さいと目地の数が多いため目地砂を詰め転圧することにより、ブロックが沈下して安定し、前述した目地砂が体積増加する正のダイレタンシーに起因するブロック間の水平方向の圧縮力の発生が促進され、隣接するI Lブロック相互の間に荷重を分散させる機能が大きく発揮されると考えられる。さらに、交通荷重の繰り返しを受けることでクッション砂と目地砂が安定しロックアップ状態に達するものと考えられる。これに対して、ブロック寸法が大きいものは、目地の数が少ないため目地砂を詰め転圧してもブロックの安定が悪く、ダイレタンシーに起因するブロック間に発生する水平方向の圧縮力も小さくなり、隣接するI Lブロック相互の間に荷重を分散させる機能も小さいと考えられる。したがって、車両が通行する用途に適用すると、供用後舗装面に変形や段差の発生が懸念される。

(4) I Lブロック寸法の規定化の検討

I Lブロックの荷重伝達率は、図-7に示したようにI Lブロックの全側面積と上面積との比の1次関数として表され、その決定係数も縁部、隅角部とも0.9以上と大きい。また、縁部と隅角部の第2センサーの設置方法を比較すると、隅角部設置は縁部設置に比べてD₀とD₁またはD₁'を対角線上に設置するため、載荷側ブロック内の隅角部に第2センサーを無理なく設置でき、ブロック寸法の差異を反映した設置方法となることから、I Lブロックの噛み合わせ効果、つまり荷重分散性能の評価には隅角部荷重伝達率(E_{L,T})を用いるのが適していると考えた。そこで、式(2)を展開し、隅角部荷重伝達率(E_{L,T})からI Lブロック寸法を規定することを試みた。

$$E_{L,T} = 0.553\alpha - 0.256 \quad (2)$$

ここで、E_{L,T}：目地砂充填・クッション砂締固め状態での隅角部荷重伝達率

α：I Lブロックの全側面積と上面積との比

ここで、式(2)を用いると、任意のE_{L,T}値に対応するブロック寸法を式(3)から求めることができる。

$$\alpha = (E_{L,T} + 0.256) / 0.553 \quad (3)$$

I Lブロックの厚さ：h、長辺長：L、短辺長：βL、とするとI Lブロックの全側面積と上面積との比(α)は、式(4)から求められる。

$$(2 \cdot h \cdot L + 2 \cdot \beta \cdot h \cdot L) / (\beta \cdot L^2) = \alpha \quad (4)$$

ただし、0 < β ≤ 1

ここで、米国やドイツでの規定で用いられている長辺長(L)と厚さ(h)の比を(r)とするとrは式(5)で定義される。

$$r = L/h \quad (5)$$

式(5)を変形すると、

$$L = r \cdot h \quad (6)$$

式(6)を式(4)に代入すると式(7)が得られる。

$$\alpha = 2h(1+\beta) / \beta \cdot h \cdot r \quad (7)$$

$$\beta = (-2) / (2 - \alpha \cdot r) \quad (8)$$

ただし、0 < β ≤ 1

荷重伝達率は、式(1)で定義されていることから、その取りうる範囲は0～1.0となる。荷重伝達率が小さければ、I Lブロックの沈下・移動・角かけが発生しやすく、I Lブロック舗装の平たん性が悪化しやすいことは容易に想像される。しかし、荷重伝達率とI Lブロック舗装のパフォーマンスとの関係を捉えた研究は皆無であることから、荷重伝達率の下限値の設定は困難な状況にあるが、一応ここでは0.5と設定した。その理由として以下を根拠とした。①ローラ転圧コンクリート舗装(以下、RCCPという)の無補強目地のひび割れ部の荷重伝達率は、中川らの研究¹⁰⁾によれば、0.5程度の値になると報告している。しかし、RCCPの目地のひび割れ部とI Lブロックの目地では、荷重伝達のメカニズム等に違いはあるものの両舗装ともダウエルバーなどの荷重伝達装置が無く、目地により荷重伝達が行われる舗装形式である。②荷重伝達率0.5は工学的見地からして、取りうる範囲の中間値である。

荷重伝達率の下限設定値を0.5、上限値を実験より得られた0.8として、各々に対応するI Lブロックの

寸法を式(3)および式(8)から求めた結果を表-5と6に示す。

なお、 β については $0 < \beta \leq 1$ と定義しているため、 $\beta=1.0$ となる r の値をまず求めている。これより、 r が最小値となるため以降の値設定については、運用上この値から0.5ずつ段階的に大きくしている。 $r=5.0$ をこえる値は、ブロック寸法が厚みによって極端に小さくなったり、長辺長が大きくなったりするため実用的でなく $r=5.0$ 迄とした。

このことを換言すれば、表-5および表-6に示されているブロックは、荷重伝達率が各々等値であることから、表中のどの寸法のブロックを用いても、荷重分散性能が等しいことを示している。

歩道や軽車両通行帯など、大きな隅角部荷重伝達率を期待しなくても良い場合、(すなわちILブロックの沈下量が小さい場合)には、大きめのILブロックを使用することができ、その寸法の限界は表-5の通りである。また、車道や大型車専用ヤードなどの重交通のように大きな隅角部荷重伝達率を期待する場合には、表-6に示されている小さめのILブロックを使用しなければならないこととなる。

ここで表-5および表-6のブロック寸法に対して、表-2に示した①ドイツ規格である「 γ (ブロック長辺長と厚さの比)が4」以下、②米国の規定である $\gamma \leq 4$ 、上面積 0.065m^2 以下、③英国規定である「 γ (ブ

ロック長辺長と厚さの比)5以下」、「辺長250mm以下」、「幅50mm以上」に当てはまるILブロック寸法を算出したのが表-7である。

表-7から、3か国の規定値の中で長辺が最小値であるブロックについて取り出し、使用に推奨できる最大ILブロック寸法を表-8に示した。なお、我国で標準的に使用されている歩道・軽交通用60mm厚、車道用80mm厚とした場合のILブロックの最大寸法は、網掛け部に示されている。

したがって、ILブロックの寸法規格に海外で用いられている長辺長と厚さの比だけでなく「全側面積と上面積との比」も併用することにより、交通区分に応じたILブロックの寸法を提示できた。

次に、波形タイプとストレートタイプの荷重伝達率を比較する。表-3にある舗装番号5の波形タイプの全側面積と上面積との比は、表中に示すように1.71となる。これを、長辺と短辺の寸法が同じストレートタイプにすると、その比は1.64となり、波形タイプとの差は0.07となる。この差を式(2)を用いて荷重伝達率に換算すると0.04となり、波形タイプはストレートタイプに比べて6%程荷重伝達率が高くなる。このことは式(2)を用いることにより、波形タイプとストレートタイプの荷重伝達率も客観的指標で示すことができることを意味している。

表-5 隅角部荷重伝達率が0.5の場合のブロック寸法(mm)

ブロック長辺長と厚さの比(r)	短辺比(β)	ブロックの厚さ(mm)				
		40	50	60	80	100
2.93	1.000	117×117	147×147	176×176	231×231	293×293
3.00	0.948	120×114	150×142	180×171	210×228	300×284
3.50	0.716	140×100	175×125	210×150	280×200	350×251
4.00	0.544	160×92	200×115	240×138	320×181	400×230
4.50	0.480	180×86	225×108	270×130	360×173	450×216
5.00	0.412	200×82	250×103	300×124	400×165	500×206

表-6 隅角部荷重伝達率が0.8の場合のブロック寸法(mm)

ブロック長辺長と厚さの比(r)	短辺比(β)	ブロックの厚さ(mm)				
		40	50	60	80	100
2.09	1.000	84×84	105×105	125×125	167×167	209×209
2.50	0.721	100×72	125×90	150×108	200×144	250×180
3.00	0.536	120×64	150×80	180×96	240×129	300×161
3.50	0.427	140×60	175×75	210×90	280×120	350×149
4.00	0.355	160×57	200×71	240×85	320×114	400×142
5.00	0.265	200×53	250×66	300×80	400×106	500×133

表-7 隅角部荷重伝達率を0.8~0.5とした場合の各国規定に対応するブロック寸法

各国規定	ブロックの厚さ(mm)			
	50	60	80	100
米国	200× (71~115)	240× (85~138)	320× (114~184)	400× (142~162)
ドイツ	200× (71~115)	240× (85~138)	320× (114~184)	400× (142~230)
英国	250× (61~103)	250× (84~135)	250× (126~219)	250× (215~250)

表-8 交通区分に対応した最大ILブロック寸法の推奨値

区分	ブロックの厚さ(mm)			
	50	60	80	100
軽交通 (E_{LT} : 0.5程度)	200×115	240×138	250×219	250×250
重交通 (E_{LT} : 0.8程度)	200×71	240×85	250×126	250×215

5. 目地材の違いが荷重伝達率に与える影響

ILブロックをはじめ、天然石、タイル、レンガ等の乾式舗装材料の目地には砂が使用されている。これは、前述したように交通荷重下で砂の正のダイレタンシー（体積増加）に起因するブロック間の水平方向の圧縮力の発生を促進させ、隣接するILブロック相互間に荷重分散性能を発揮させる重要な役割を担っているためである。

しかしながら、1990年以降透水性ILブロックが年々増加する傾向にあり、この目地砂が透水機能を低下させる要因のひとつとして考えられ、目地幅を狭くして目地砂を詰めない工法や目地砂の代わりにブロック側面にゴムテープを付着させるなどした製品も開発されている。これらの工法や製品は、供用後に歩道であっても段差や沈下が生じているケースが見受けられる。そこで、目地砂とこれらの工法や製品との荷重伝達率の比較評価を行うために試験舗装を施工してHFWDによるたわみ測定を行った。

試験舗装は、表-9に示すように歩行者系道路での施工実績が増加している298×298×60(mm)サイズのブロックを用いて、目地幅2mmの目地砂使用の従来工法と目地幅を極力狭くして目地砂を詰めない突合わせ目地や、目地幅2mmで目地砂の代わりにブロック側面にゴムテープを貼り付けた目地（以下、ゴム目地）の比較を行った。

HFWDによるたわみ測定は、図-9に示した位置にて各5地点ずつ行った。評価には、式(1)より求められる荷重伝達率を用いた。これは、荷重伝達率をたわみ比で定義しているため、敷砂層以下の舗装構成層がたわむことにより見かけ上の荷重伝達率が計算されるためである。測定結果を表-10に示す。

測定結果より、突合わせ目地、ゴム目地のSKB-1とSKB-2における荷重伝達率は砂目地に比べるといずれも1/3前後の低いレベルにある。このことから、荷重分散性能が小さく、ブロックの噛み合わせ効果も当然低くなると推測される。したがって、目地砂を詰めない代わりに目地幅を狭くする工法や目地砂の代わりにゴム目地を用いる方法はブロックの噛み合わせ効果が期待できず、供用後に段差や不陸が生じやすくなるためブロック系舗装材料にはいずれも適さないと考えられる。

6. ILブロックの締固め方法が目地砂の充填率や荷重伝達率に与える影響

目地砂の有効性が確認されたことから、次にILブロックの締固め方法が目地砂の充填率や荷重伝達率に与える影響についての実験を行った。なおここで、目地砂の充填率とは、1㎡当りの目地の容積（使用したブロックの周囲長×厚さ×目地幅）から求まる理論上

表-9 試験舗装の内容

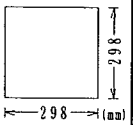
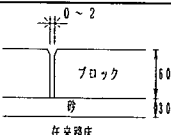
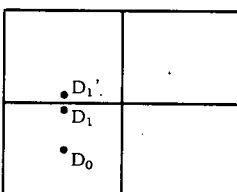
舗装番号	ブロック形状	敷設パターン	目地構造	目地幅 (mm)	舗装構造 (mm)
1		スタックボンド	砂	2	
2			突合わせ	0~1	
3			ゴム	2	

表-10 たわみ量測定結果

目地構造	D ₀ (mm)	SKB-1 (mm)		SKB-2 (mm)		荷重伝達率 (D ₁ ' / D ₁)	
		D ₁	D ₁ '	D ₁	D ₁ '	SKB-1	SKB-2
砂	0.348	0.337	0.227	0.265	0.109	0.67	0.42
突合わせ	0.456	0.378	0.071	0.282	0.044	0.19	0.16
ゴム	0.452	0.365	0.084	0.284	0.040	0.23	0.14

①SKB-1



②SKB-2

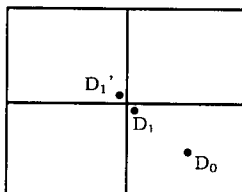


図-9 たわみ測定のパターン

表-11 目地砂の施工方法

段階	施工方法	目地砂の増加分 (kg/m ²)	目地砂の充填率 (%)
1	目地砂充填後、専用コンバタにより十分転圧	3.91	77.9
2	散水しながら目地砂再補充	0.95	96.8
3	タイヤローラにより転圧後、目地砂再補充	0.16	100.0

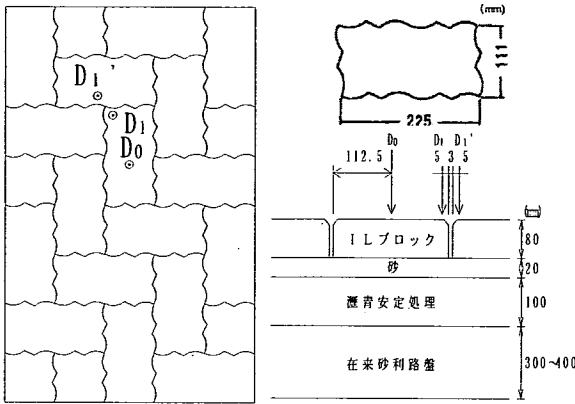


図-10 たわみ測定的位置

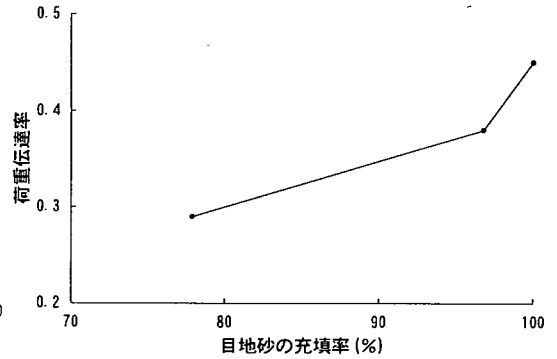


図-11 施工段階における荷重伝達率

必要な数量 (kg) に対する施工上の使用量 (kg) の割合を言う。

実験は、ダンプトラックが1日当たり100台以上通行する工場構内にて実施した。目地砂には、充填性を考慮して細目で単一粒度の5号珪砂(最大粒径1.18mm以下)を、ブロックの転圧には従来から用いられている手押しの専用コンパクタとタイヤローラ(8ton)を用いた。

HFWDによるたわみ測定は、表-11に示す施工の段階毎に図-10に示した位置で各7地点ずつ行った。測定結果を図-11に示した。これより、ブロックの荷重伝達率は目地砂の充填率と転圧効果に伴って大きくなる傾向を示した。

特に、目地砂充填後専用コンパクタにより十分転圧した状態(段階1)から、散水して再補充する迄(段階2)の荷重伝達率の向上は30%以上を示した。これは、目地砂の正のダイレタンスーに起因するブロック相互間に荷重分散性能を発揮させているものである。また、タイヤローラにより転圧を行うことによって目地砂の充填率の増加分は3.2%と少ないものの(段階3)、荷重伝達率は段階2に比べて約20%の向上が認められた。このことは、タイヤローラのような大型の締固め機械を用いることによって、目地砂の正のダイレタンスーに起因するブロック間の水平方向の圧縮力の発生が促進され、隣接するブロック相互間の荷重分散性能がさらに高まることを示している。

したがって、1日当たりの大型車交通量が100台を越える車道舗装では、従来から用いられている手押し専用コンパクタによる転圧だけでは不十分であり、目地砂の正のダイレタンスー効果をより一層発揮させるためには大型のローラにより路面の仕上げ転圧を行うことが望ましいと言える。

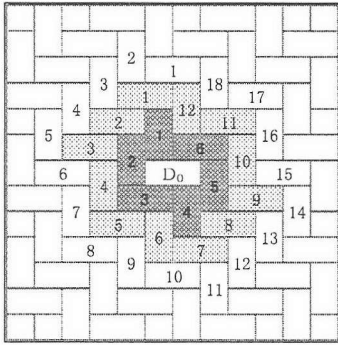
なお、図-10に示したブロック形状と同一と見なせる表-3の舗装番号5の目地砂充填・クッション砂締固

め状態の荷重伝達率(=0.65)と比べて、図-11に示した荷重伝達率に大きな差が認められるのは、表-3と図-10に示すように舗装構造が大きく異なることによって、たわみ量の絶対値が異なることに起因していると推測される。

7. 供用中の車道舗装における荷重分散性能

(1) 路盤構造の差異による荷重分散性能の比較

ILブロックによる車道舗装では、1日1方向当たりの大型車交通量が100台を越える道路では、上層路盤に安定処理工法が用いられているのが一般的である。これは、旧建設省(現独立行政法人)土木研究所における走行実験から車道舗装ではわだち掘れやブロックの破損(角欠け、割れ)を防ぐには、粒状路盤よりも安定処理工法の使用が有効であることが確認されたことによるものである¹¹⁾。一般的に、粒状路盤に比べて安定処理工法の荷重分散性能が高いことは知られている。そこで、同一路線上で同時期にILブロックの形状、目地砂、締固め方法等の施工方法も同じ条件で粒状路盤(以下、RM-40と呼ぶ)とセメント安定処理工法(以下、CTBと呼ぶ)上に施工した千葉県白子町における試験舗装¹²⁾にて、ILブロック舗装の荷重分散性能の比較をHFWDにより行った。測定は、施工後2年以上経過し目地砂が100%充填された車両走行部上を対象に実施した。これより、ILブロック舗装の荷重分散性能に影響をおよぼす要因のうち、ブロック形状、目地材、ブロックの締固め方法、目地砂の充填率、さらに交通履歴も同一条件となることからILブロック間の荷重伝達率に差異が無くなり、異なる路盤構造上に施工したILブロック舗装の荷重分散性能の比較ができると考えられる。



区分	名称	たわみを測定するブロック数
	D_0	載荷点直下のたわみ量
	D_1	D_0 を設置したブロックに接する6個のブロックのたわみ量
	D_2	D_1 を設置したブロックに接する12個のブロックのたわみ量
	D_3	D_2 を設置したブロックに接する18個のブロックのたわみ量

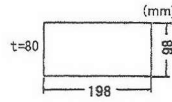


図-12 ヘリンボンボンド (90°) パターンの位置関係

a) たわみ測定の方法

路盤構造の差異による I L ブロック舗装の荷重分散性能の比較は、ブロック上にてたわみ測定を行いその面的分布状況を評価することで行った。

HFW D によるたわみ測定は次のように行った。まず、任意のブロックを選定してブロック中心に HFW D で載荷し、そのたわみを D_0 とする。次に、このブロックに隣接する 6 個のブロック (図-12 の 部分) 中心のたわみ (D_1) を第 2 センサーで測定する。さらに、その外周のブロック (総数 12 個、図-12 の 部分) に第 2 センサーをセットしたたわみ (D_2) を求め、またその外周のブロック (総数 18 個、図-12 の 部分) のたわみ (D_3) を計測する。各ブロックの位置関係とブロック寸法を図-12 に示す。

ここでは、I L ブロックの荷重分散性能をたわみ比として式 (9) で評価した。

$$\text{たわみ比} = D_i / D_0 \quad (9)$$

ここで、 D_i : $i = 1 \sim 3$

なお、式 (9) と前述した式 (1) との違いは、式 (1) はブロック寸法の違いを比較するために図-5 に示すように目地を挟んだ非常に狭い間隔 (=13mm) のたわみを測定し、評価には載荷板のたわみ (D_0) ではなく第 2 センサーのたわみだけを用いている。これに対して、式 (9) は路盤構造の違いを比較するため載荷板 (D_0) とその周囲のたわみを広範囲に測定し、評価には載荷板のたわみ (D_0) と広範囲に測定した第 2 センサーのたわみの平均値 (D_i) を用いている。

b) 測定結果

表-12 は、たわみ量とたわみ比の結果をまとめたものである。これより、粒状路盤上のたわみ量 (D_0) は 0.103 mm を示したのに対し、CTB では半分以下の 0.043 mm となった。また式 (9) から求めたたわみ比のグラフ (図-13) からわかるように、荷重分散性能がより優れていると考えられる CTB は粒状路盤より相

対的にたわみ比が大きく、センサーの位置が D_2/D_0 、 D_3/D_0 と遠くなることによるたわみ比の低下率も小さい傾向にある。このように、I L ブロック間の荷重伝達率に差異が無いと見なせるケースでは、路盤構造が異なると I L ブロック上のたわみ量 (D_i) やたわみ比に差異が生じることが確認できた。この差異は、路盤構造の剛性によるもので支持力の大きい路盤上に I L ブロックを施工すると、I L ブロック舗装の荷重分散性能が大きくなることを示している。これより、I L ブロック間の荷重伝達率に差異が無いと見なせるケースでは、I L ブロック舗装の荷重分散性能は路盤の支持力と相関があると言える。

(2) 破損部と健全部の荷重分散性能の比較

a) 測定概要

HFW D により、路盤構造の差異による荷重分散性能を把握することが確認できたことから、次に供用中の車道舗装において、破損部と健全部の支持力比較を行った。

測定は、供用約 8 年を経過して I L ブロック舗装面にわだち掘れやブロックの角欠けが発生した A 交通のバスプールにて実施した。I L ブロックの形状、寸法、舗装構造を図-14 に示す。たわみ測定は図-12 に示した方法と同じである。

b) 測定結果

表-13 に各センサー位置におけるたわみ量を、図-15 にたわみ比を示す。これより、健全部のたわみ量は 0.166 mm を示したのに対して、破損部では 1.5 倍程大きい 0.25 mm となった。また、たわみ比も各センサー位置において破損部に比べて健全部の方が 1.3 倍大きい傾向にある。したがって、破損部では健全部に比べて荷重分散性能が低下しており、舗装体の支持力低下がたわみ測定から確認された。

以上より、HFW D を用いることでたわみ比から舗装構造の健全度を相対的に評価することが可能となる。

表-12 たわみ量測定結果

調査位置	たわみ量 (mm)				
	項目	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃
CTB	平均値	0.043	0.018	0.016	0.013
	D _i /D ₀		0.42	0.37	0.30
RM-40	平均値	0.103	0.027	0.018	0.014
	D _i /D ₀		0.26	0.17	0.14

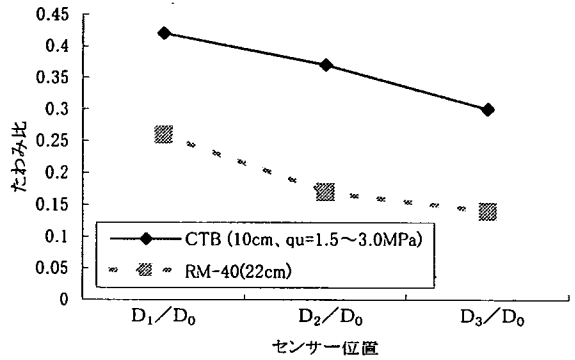


図-13 たわみ比と路盤構造の関係

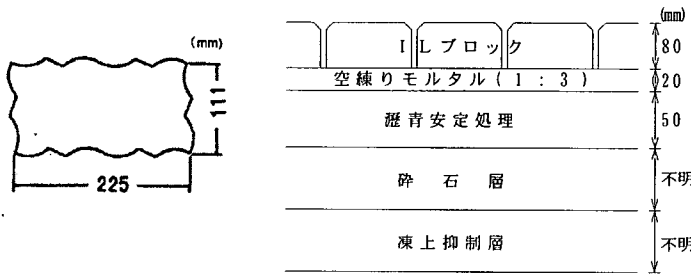


図-14 I Lブロック舗装の構造

表-13 たわみ量測定結果

調査位置	たわみ量 (mm)				
	項目	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃
健全部	平均値	0.166	0.103	0.061	0.040
	D _i /D ₀		0.620	0.367	0.241
破損部	平均値	0.250	0.121	0.069	0.044
	D _i /D ₀		0.484	0.276	0.176

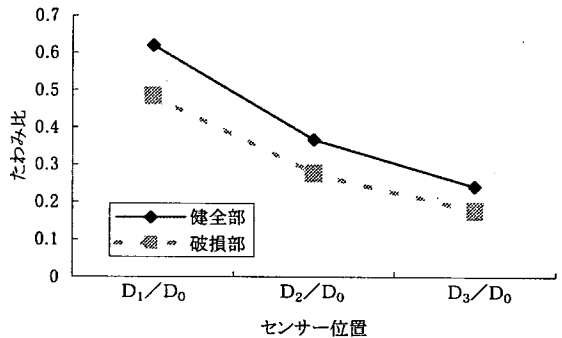


図-15 破損部と健全部のたわみ比の比較

8. 結論

本研究は、多数の形状を有し目地砂とクッション砂を用いて施工する I L ブロック舗装のブロック寸法や目地材料の違いが、荷重伝達率に及ぼす影響評価といった基本的な課題について検証した。その上で、施工時の路面転圧方法とその効果、供用中の車道舗装で荷重分散性能の比較や評価を行ったものである。

これらの課題に対して、小型の FWD である HFW D を用いて供用中の車道舗装や試験舗装を施工して、たわみ測定の方法を検討しながら I L ブロック上にたわみ測定を実施した。その結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) I L ブロックの寸法と噛み合わせ効果の関係は、I L ブロックの全側面積と上面積との比と隅角部における荷重伝達率 (E_{LT}) を用いて評価できる。さらに、波形タイプとストレートタイプとの荷重伝達率についても客観的指標で示すことができる。
- (2) 荷重伝達率が等値のブロック形状を示すことができたことから、従来から論議されてきたブロックの形状と荷重分散性能の関係を明らかにすることができた。
- (3) I L ブロックの寸法規格には、海外で用いられている「長辺長と厚さとの比」とともに「全側面積と上面積との比」も併用することにより、交通量に応じた I L ブロックの寸法を提示できた。すな

わち、歩道・軽交通用 60 mm 厚で 240×138 mm 以下、
車道用 80 mm 厚で 250×126 mm 以下、短辺長で 50
mm 以上を提案した。

- (4) ブロック寸法が小さい方が目地砂を詰め転圧することで、荷重伝達率の変化率が大きくなる。このことは、ブロックが沈下して安定し I L ブロック間の荷重分散性能が高くなることを示している。
- (5) I L ブロックの目地材には砂が適切である。これは、突合わせ目地やゴム板を使用する工法では砂に比べて荷重伝達率が 1/3 程度に小さくなり、荷重分散性能も低くなるためブロック間の噛み合わせ効果が期待できず、供用後に段差や不陸の発生が懸念される。
- (6) I L ブロックに目地砂を充填し転圧することによって、砂の正のダイレタンシーに基づくブロック相互間の荷重分散性能の発揮を確認できた。また、1 日当たりの大型車交通量が 100 台を越える車道舗装では、従来から用いられている手押しの専用コンパクトによる転圧だけでは不十分であり、目地砂の正のダイレタンシー効果をより一層発揮させるためには大型のローラにより路面の仕上げ転圧を行うことが望ましい。
- (7) 供用中の車道舗装では、I L ブロック上のたわみ比から、路盤構造の差異が荷重分散性能に与える影響や舗装構造の健全度を相対的に評価することが可能である。
- (8) HFWD は、I L ブロックのように多数の形状を有し、目地砂とクッション砂を用いて施工するブロック系舗装材料の荷重分散性能の確認や支持力評価に適した試験器である。

今後の課題は、I L ブロック舗装の荷重伝達率とパフォーマンスに関するデータ収集とブロック上だけでなくブロックを抜き取って路盤上でもたわみを測定して、路盤層以下の荷重分散性能を評価することである。さらに、明確な I L ブロックの寸法規定とドイツで実施されている路床、路盤の品質規定¹³⁾として、小型の載荷試験器を用いて測定した弾性係数の規定を、我が国の I L ブロックによる車道舗装の路床、路盤にも適用することである。これらについては継続研究としたい。

参考文献

- 1) 笠原篤, 伊藤保彦, 古川真男: ハンディなフォーリング・ウェイト・デフレクトメータの開発, 雑誌「道路建設」, pp. 66-70, 1993. 5.
- 2) 左京賢一, 秋本隆, 笠原篤: ハンディ・フォーリング・ウェイト・デフレクトメータによる舗装支持力評価に関する研究, 第 21 回日本道路学会論文集, pp. 694-695, 1995. 7.
- 3) 関根悦夫, 村田修, 阿部長門, 丸山輝彦: FWD による鉄道盛土の締固め管理に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 1 巻, pp. 121-128, 1996. 12.
- 4) B. Shackel 著, 三浦裕二監訳, 巻内勝彦, 林重徳訳: インターロッキングブロック舗装の設計と施工, 鹿島出版会, 1992.
- 5) Clifford, J.M.: A Description of "Interlock" and "Lock-up" in Block Pavements, Concrete Block Paving Second International Conference, Proceedings, pp.50-54, 1984.4.
- 6) (社) インターロッキングブロック舗装技術協会: インターロッキングブロック舗装設計施工要領書, 2000.
- 7) ASTM, Designation: C936-96: Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units, 1996.
- 8) Pesch, L.: Application of Concrete Pavers in the Federal Republic of Germany - Planning, Design, Installation, Acceptance, 1990.
- 9) British Standard 6717: Precast, Unreinforced Concrete Paving Blocks-Requirements and Test Methods, 2001.
- 10) 中川伸一, 川村和幸, 笠原篤, 西沢辰男: コンクリート舗装の目地部における荷重伝達の評価法について, 開発土木研究所月報, pp. 38-47, 1993. 11.
- 11) 柳沼宏始, 飯島尚, 池田拓哉: 大型車両を用いたインターロッキングブロック舗装の耐久性評価, 雑誌「舗装」, pp. 4-10, 1988. 6.
- 12) Kunishima, T., Arai, K. and Yaginuma, H.: Utilization of Glass Cullet for Sand-Cushion Layer of I.L.B. Pavement, Concrete Block Paving 6th International Conference, Proceedings, pp.159-166, 2000.9.
- 13) 峰岸順一: 動的平板載荷試験による路床・路盤の評価, 都土木技研年報, pp. 111-120, 2000.

(2002. 4. 24 受付)

STUDY ON DEFORMATION OF INTERLOCKING BLOCK PAVEMENT

Hiroshi YAGINUMA, Shuichi YAZAWA and Atsushi KASAHARA

This study evaluated how the dimensions of blocks, type of joint material, and method of road surface compaction affect the load transfer efficiency in interlocking block pavement. We also compared the effects of load distribution on pavement with strength of base structures. For these purposes, we measured deflection by lightweight FWD on test pavements and installed on roadway. The measurements revealed a close relationship between block dimensions and the load transfer efficiency, and clarified the effect of joint sand. It was confirmed that, installed on roadway, the load distribution effect varies by base structure and by whether the section is damaged or undamaged.