

車道用コンクリートブロック舗装の構造的挙動に 及ぼすブロック寸法に関する一検討

加形 護¹ ・ 西沢辰男² ・ 畑 実³

¹正会員 鹿島道路株式会社 土木技術部 (〒112-8566 東京都文京区後楽 1-7-27)

²正会員 工博 国立石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒920-0392 石川県河北郡津幡町北中条)

³太平洋セメント株式会社 中央研究所 第1研究部 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

車道舗装に適用されるブロックの形状寸法は、車輛荷重に対する抵抗性を経験的に考慮して、一般的には 10×20cm 程度である。しかしながら、近年の景観性向上に関する要望から、車道舗装においても大版ブロックの適用が期待されている。そこで、大版ブロックの車道舗装への適用を図る目的で、ブロックの形状寸法、厚さ、路盤K値を要因とした車輪走行模擬試験装置(ロードシミュレータ)による載荷試験を行い、大版ブロック舗装の供用性能の評価とブロック下面の引張応力などを測定した。また、FEMによる理論解析結果も含めて大版ブロック舗装の構造的挙動を検討し、車道舗装に適用する大版ブロックに必要なブロック厚さと寸法比率、および、路盤K値などについて考察した。

Key Word : Block pavement, Block Size, Block thickness, Aspect Ratio, Lift up, K-value, Rut depth, Deflection, Stress, FEM model,

1. はじめに

ブロック舗装は路面のデザイン性に優れており、周辺環境との調和を図り、街路の景観性を向上させることができるため、歩道、公園、広場等の歩行者系舗装に広く普及している。これらの舗装では、ブロックの形状寸法が10×10cm程度から60×60cm程度の大版サイズのものまでが適用され、その豊富なバリエーションによって路面デザインを効果的に演出している。

これに伴って、近年では車道舗装に適用されるブロック舗装においても大版ブロックの適用が強く求められてきているが、車輛荷重に対する抵抗性を経験的に考慮して、一般的には形状寸法が10×20cm程度のインターロッキングブロックしか適用されていないのが現状である。^{1)、2)、3)}

そこで、大版ブロックを車道舗装に適用し、景観性向上に関する要望に応えるために、車輪走行模擬試験装置(ロードシミュレータ)による載荷試験を実施した。この載荷試験では、クッション砂と目地砂を用いた乾式施工による大版ブロック舗装について、ブロックの形状寸法と厚さ、および路盤K値を要因として、わだち掘れ深さ、たわみ量、ブロックのリフトアップ(跳ね上がり)量、ブロック下面の引張応力を測定し、これらに及ぼす要因を検証した。

また、FEMによる理論解析により、大版ブロック舗装の供用性能に及ぼす要因を定量的に考察した。

2. 大版ブロック舗装の供用性能評価

車道舗装の荷重条件下における大版ブロック舗装の供用性能を評価する目的で、実物大の車輪走行模擬試験装置による繰返し走行試験を実施した。また、この装置を用いて静的載荷試験を行い、ブロック下面に発生する引張応力を測定した。

(1) 試験概要

a) 試験装置



写真 1 車輪走行模擬試験装置

表 1 車輪走行模擬試験装置の仕様

舗装規模	幅員：4m × 延長 16m
走行速度	5km/h (定速)
輪荷重	繰返し走行試験：49kN (一定) 走行車輪：大型車輛用ダブルタイヤ トラバース：センターから片側 30cm 静的載荷試験：29kN ~ 69kN (可変)

大版ブロック舗装の供用性能の評価は、写真 1 に示す車輪走行模擬試験装置を用いて行った。この装置の仕様は、表 1 に示すとおりであり、輪荷重の繰返し走行における各種舗装の挙動を、現実の車輛走行に近い条件下で評価できるものである。

なお、本装置は屋外に設置されており、気温、湿度、降水量などの気象条件は、実験の実施時期により異なる。

b) 敷設パターンと舗装構造

実験に使用したブロックの形状寸法は、表 2 に示す範囲のものとし、短辺が 10~60cm、長辺が 20~60cm、厚さは 8、10、12cm の 3 種類とした。ブロックの敷設パターンは、インターロッキングブロック舗装で通常、車道舗装に適用される敷設パターン³⁾(90°または、45°ヘリンボンパターン)とは異なり、輪荷重の走行によるブロックの挙動を顕著に再現することを意図として、ブロックの長辺が車輪(タイヤ)の走行方向と直角に配置されるストレッチャーボンパターンとした(図 1 参照)。

表 2 実験に用いたブロックの形状寸法

長さ (cm)		アスペクト比	面積 (cm ²)
短辺(b)	長辺(a)		
10	20	0.5	200
15	30	0.5	450
20	30	0.7	600
30	30	1.0	900
22.5	45	0.5	1013
30	45	0.7	1350
45	45	1.0	2025
30	60	0.5	1800
40	60	0.7	2400
60	60	1.0	3600

注：アスペクト比は、ブロックの短辺と長辺との寸法比率である。

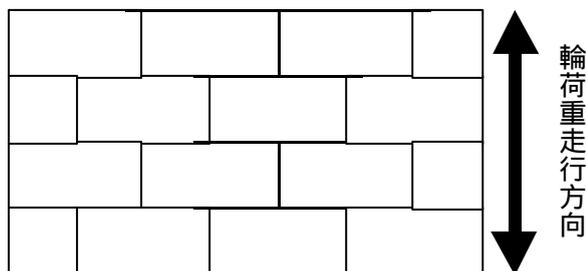


図 1 ストレッチャーボンパターン

路盤構造は図 2 に示すとおりであり、上層路盤には粒度調整碎石と厚さの異なる瀝青安定処理混合物を用いた。各々の路盤は上層路盤上で平板載荷試験(K₃₀)を行って支持力を管理し、K値がそれぞれ 1.5, 2.0 および 2.5N/mm³となるよう構築した。また、いずれの場合も路床土の設計 CBR は 3 とし、クッション砂(砕砂)の厚さは 2cm、目地幅は 2mm として、目地には 5号珪砂を充填した。

なお、本試験に使用したブロックは、目地キープ付きブロックと目地キープの無いブロックが混在しているが、目地キープの有無に拘わらずブロックの敷設時に 2mm 厚のスペーサーをブロック間に挿入して目地幅を均一に確保し、目地砂を充填する際にこれを抜き取った。

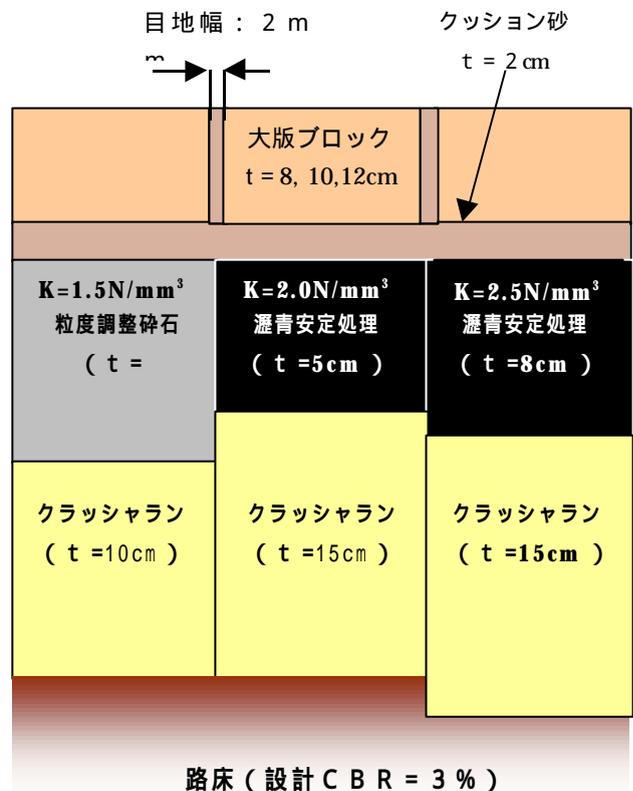


図 2 舗装構造

c) 繰返し走行試験

繰返し走行試験では、実際の車道舗装における車輛走行軌跡の変動を考慮し、舗装の幅員(4m)のセンターから片側 30cm (路面上では片側 60cm)の範囲でタイヤ(輪荷重 = 49kN)を左右にトラバースして、走行位置が正規分布となるように走行させた。また、走行回数は、インターロッキングブロック舗装における軽交通舗装での設計交通量(設計期間 10 年での 49kN 換算輪数が 7000 輪)に相当³⁾する 7000 回までとした。

d) 評価項目および測定方法

表 3 評価項目および測定方法

評価項目	測定方法	備考
路盤K値	平板載荷試験	直径30cm 載荷板による。
ひずみ	静的載荷試験	ブロック下面の引張り応力。(69kNまで載荷)
わだち掘れ深さ	横断プロファイル	走行回数が0, 100, 1000,
たわみ量	ベンケルマンビーム	7000回時に測定。(49kN
リフトアップ量	ベンケルマンビーム	輪荷重による往復走行)

評価項目および測定方法は、表 3 に示すとおりである。大版ブロック舗装が破壊しないためには、車輛の繰返し走行によってブロックがリフトアップして跳ね上がり、ブロック間のかみ合わせが無くなって、不陸やブロックの破損が生じないことが要求される。そこで、大版ブロックの車輛走行方向の跳ね上がりを縦断方向のリフトアップ、車輛走行と直角方向の跳ね上がりを横断方向のリフトアップとして、そのリフトアップ量(図 3 参照)を測定した。リフトアップ量の測定はベンケルマンビームを用いて行ったものであり、大版ブロックの端部(隅角部や縁部など)にベンケルマンビームの先端を合わせて測定したものである。この時、タイヤ(輪荷重)の走行に伴って発生するたわみの波形と、その前後でたわみの波形とは逆の方向に瞬時に発生するリフトアップの波形を記録計に記録し、そのピーク値を読み取ってリフトアップ量とした。

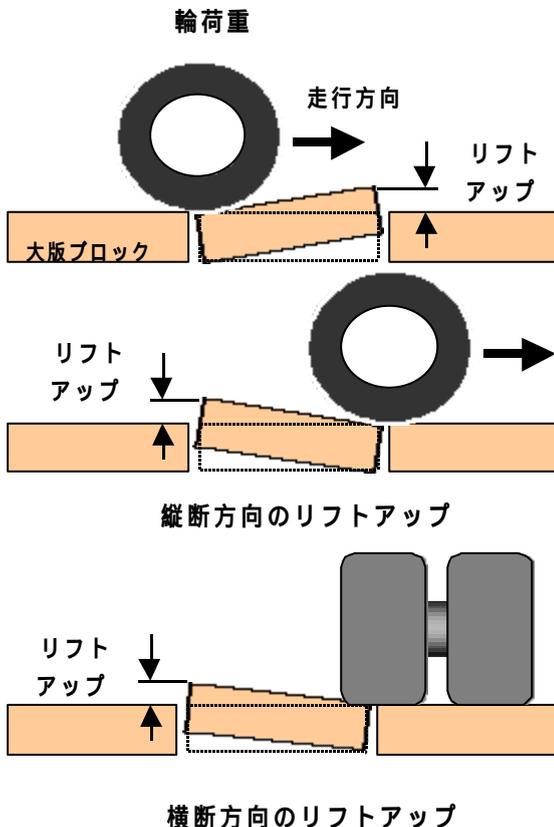


図 3 ブロックのリフトアップ量

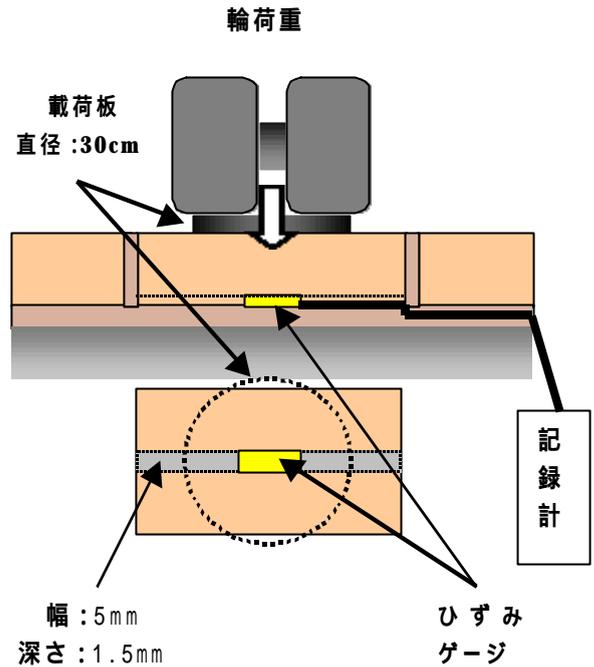


図 4 ひずみゲージの貼り付け位置と応力の測定方法

e) 静的載荷試験

輪荷重による大版ブロックの曲げ抵抗性を評価するために、ブロック下面に発生する引張応力を静的載荷試験によるひずみの測定結果から算出した。ひずみの測定方法は図 4 に示すように、ブロック下面の中央部に幅 5mm、深さ 1.5mm の溝を設けてこの中心部にひずみゲージを貼り付け、ブロックを敷設して荷重を載荷したものである。荷重の載荷方法は、ブロック上面の中央部に鋼製の載荷板(直径 30cm)を設置し、この上から車輪走行模擬試験装置のダブルタイヤを介して、輪荷重を 29kN から 69kN まで 4.9kN 間隔で載荷したものである。ブロック下面の引張応力は、この静的載荷試験で計測したひずみと、予め室内の曲げ強度試験によって求めたブロックの弾性係数とを乗じて算出した。

なお、ブロックの弾性係数は、室内の曲げ強度試験で得られた応力・ひずみ曲線の 1/3 破壊強度における応力から求めたものである。その結果、即時脱型コンクリート製ブロックの弾性係数は 39,400MPa、流し込みコンクリート製ブロックの弾性係数は 31,000MPa であった。

(2) 路面の供用性能に及ぼす各種要因の影響

図 5 は、繰返し走行試験における走行回数とリフトアップ量(横断方向と縦断方向で発生したリフトアップ量の最大値)およびわだち掘れ深さ(最大

沈下量)との関係を示したものである。走行回数の増加と共に目地砂の落ち込み、消失、ポンピングが発生し、リフトアップ量とわだち掘れ深さは徐々に大きくなるが、路盤K値を 2.5N/mm^3 として路盤の支持力を大きくした場合には、わだち掘れ深さの発生はごく僅かで、リフトアップは生じていない。

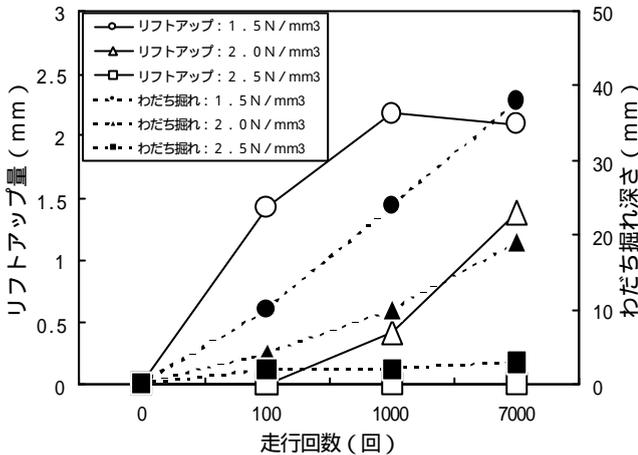


図 5 走行回数とリフトアップ量およびわだち掘れ深さの関係 (ブロック形状: $30 \times 45\text{cm}$ 、厚さ: 8cm)

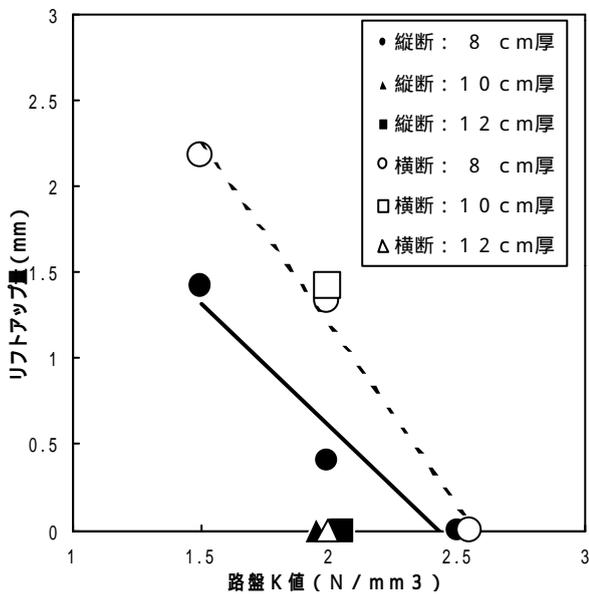


図 6 路盤K値とリフトアップ量の関係 (ブロック形状: $30 \times 45\text{cm}$)

図 6 は、走行回数 7000 回、ブロックの形状寸法が $30 \times 45\text{cm}$ における路盤K値とリフトアップ量(横断方向と縦断方向で発生したリフトアップ量の最大値)との関係をブロック厚ごとに示したものである。

ブロック厚を 8cm から 12cm と大きくする事により、また、路盤K値を 2.5N/mm^3 と大きくする事によりリフトアップは生じなくなっている。

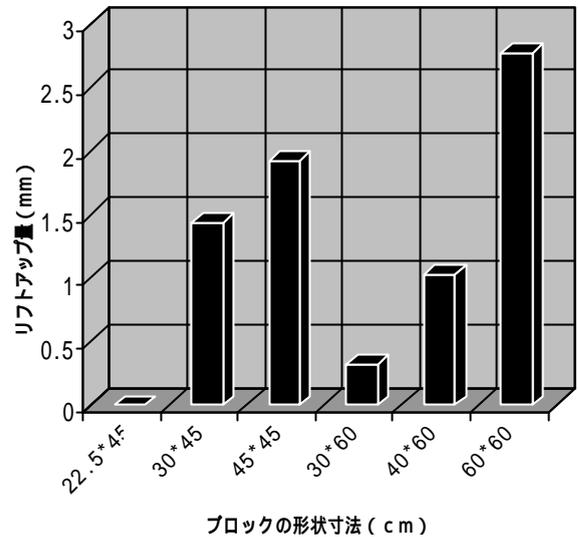


図 7 ブロックの形状寸法とリフトアップ量 (路盤K値 = 2.0N/mm^3)

図 7 は、路盤K値が 2.0N/mm^3 、車輪走行回数が 7000 回におけるブロックの形状寸法とリフトアップ量(横断方向と縦断方向で発生したリフトアップ量の最大値)の関係が最も顕著に確認された測定結果(ブロック厚さ: 10cm)を示したものである。ブロックの形状寸法が大きい程、また、ブロックのアスペクト比(短辺と長辺との寸法比率)が大きいほど、リフトアップ量は大きくなる傾向が見られる。

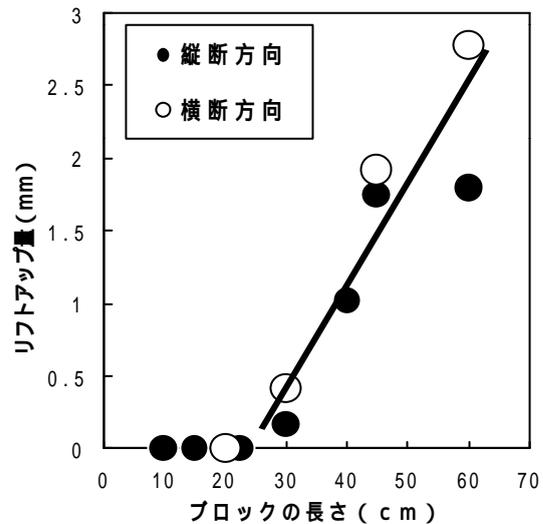


図 8 ブロックの長さ(7000回、ブロック厚さ $8 \sim 12\text{cm}$ 、路盤K値 2.0N/mm^3)とリフトアップ量の関係

図 8 は、路盤 K 値が 2.0N/mm^3 、走行回数が 7000 回でのブロックの長さ（縦断方向とは車輪走行方向の長さ、横断方向とは車輪走行と直角方向の長さ）とリフトアップ量（横断方向と縦断方向で発生したリフトアップ量の最大値）との関係を示したものである。ブロックの長さが大きくなるとリフトアップ量は大きくなるが、ブロックの長さが 30cm 未満ではリフトアップは生じていない。また、ブロックの形状寸法が $10 \times 20\text{cm}$ の一般的なインターロッキングブロックではリフトアップが生じていない。なお、リフトアップはブロック側面の目地キープの有無に関係なく発生している。

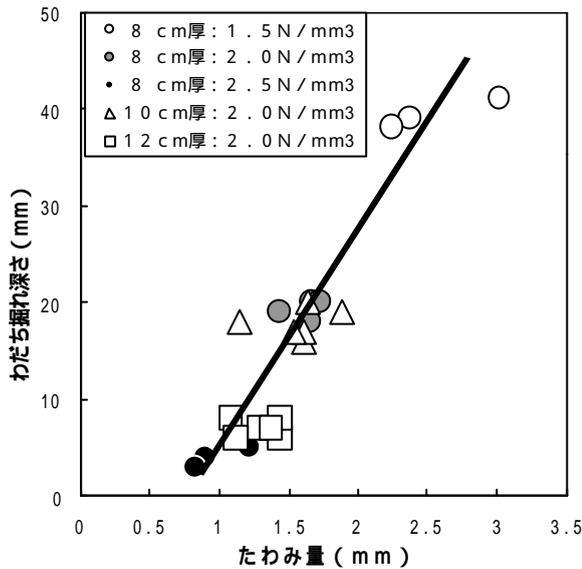


図 9 たわみ量とわだち掘れ深さの関係

図 9 は、わだち掘れ深さ（最大沈下量）とたわみ量との関係をブロック厚と路盤 K 値で層別して示したものである。ブロック厚および路盤 K 値を大きくすると、わだち掘れ深さもたわみ量も小さくなる傾向にある。また、たわみ量が小さくなればわだち掘れ深さも小さくなっている。ブロック舗装の荷重分散効果が、たわみで生じるブロック同志の競り合いによる荷重伝達と考えれば、ブロック舗装には適度なたわみが必要であるものと考えられ、²⁾ わだち掘れの抑制によるリフトアップの低減効果（図 5 参照）なども踏まえると、本実験の範囲内での最適たわみ量は、概ね $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ の範囲にあるものと推測される。

以上から、大版ブロック舗装の供用性能に影響を及ぼすリフトアップ量やわだち掘れ深さを抑制するには、ブロックの形状寸法やアスペクト比に応じて路盤 K 値とブロック厚を大きくし、たわみ量を $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 程度に制御することが必要であるものと考えられる。

(3) ブロック下面の引張応力に及ぼす各種要因

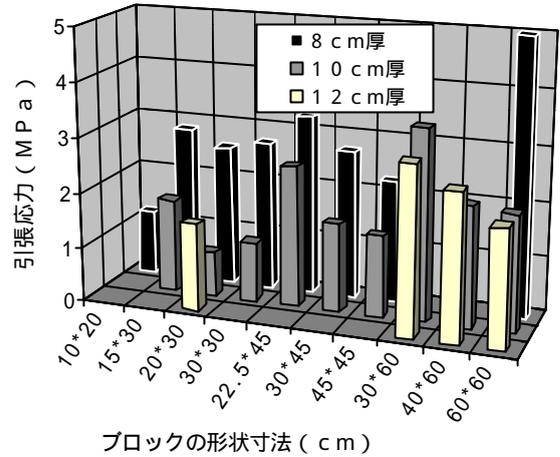


図 10 ブロック下面の引張応力とブロック形状およびブロック厚さ
(輪荷重: 49kN 、路盤 K 値: 1.5N/mm^3)

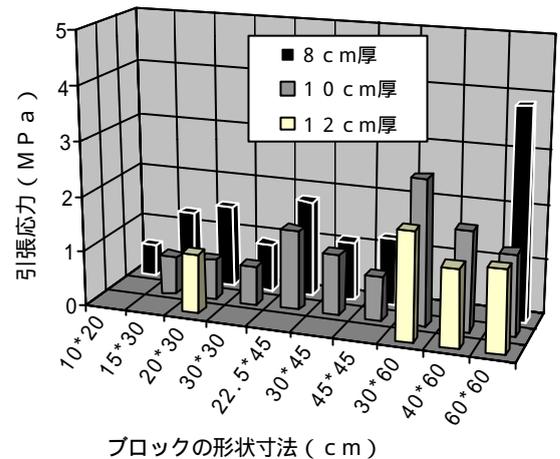


図 11 ブロック下面の引張応力とブロック形状およびブロック厚さ
(輪荷重: 49kN 、路盤 K 値: 2.5N/mm^3)

図 10 は路盤 K 値が 1.5N/mm^3 、図 11 は路盤 K 値が 2.5N/mm^3 において、輪荷重を 49kN 載荷した場合のブロック下面に発生する引張応力を、ブロックの形状寸法とブロック厚さごとに示したものである。ブロック下面の引張応力は、路盤 K 値が大きいほど、ブロック厚が大きいほど、ブロックの形状寸法が小さいほど、また、ブロックのアスペクト比が 1.0 に近いほど、小さくなる傾向にある。

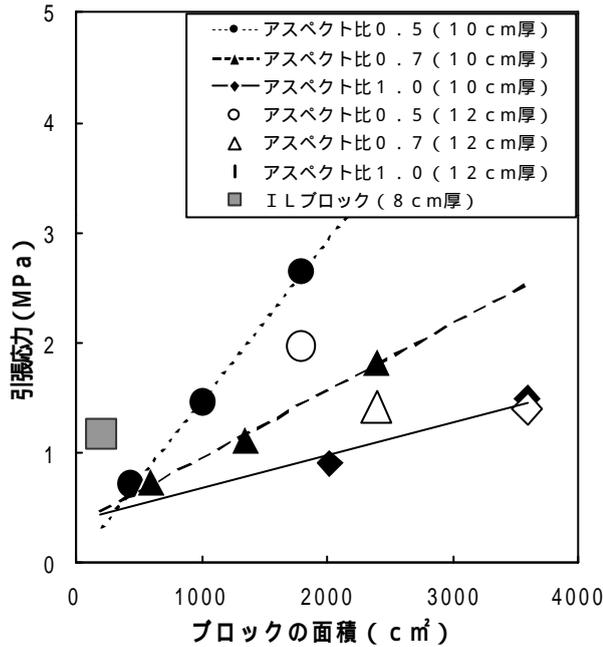


図 12 ブロックの面積とブロック下面の引張応力 (輪荷重: 49kN、路盤K値=2.5N/mm³)

図 12 は、ブロックの面積と引張応力との関係を、ブロックのアスペクト比とブロック厚で層別して示したものである。ブロックの形状寸法が 60cm × 60cm 程度の大版ブロックの引張応力を、図中に示した一般的なインターロッキングブロック舗装 (ブロックの形状寸法: 10cm × 20cm、ブロック厚さ: 8cm、路盤 K 値: 1.5N/mm³) でブロック下面に発生する引張応力と同程度にするには、本試験の範囲内では、路盤 K 値を 2.5N/mm³、ブロック厚を 12cm とし、大版ブロックのアスペクト比を 1.0 程度にすれば良いという結果が得られた。

以上より、ブロックの形状寸法が 60cm × 60cm 程度の大版ブロックの下面に生じる引張応力を小さくするには、路盤 K 値とブロック厚を大きくし、大版ブロックのアスペクト比を 1.0 に近づけるのが効果的であることが分かった。また、この大版ブロックの引張応力を、一般的なインターロッキングブロック舗装 (ブロックの形状寸法: 10cm × 20cm、ブロック厚さ: 8cm、路盤 K 値: 1.5N/mm³) でブロック下面に発生する引張応力と同程度にするひとつの方法として、路盤 K 値を 2.5N/mm³、ブロック厚を 12cm と大きくし、大版ブロックのアスペクト比を 1.0 程度にすれば良いことが分かった。

3. FEM 解析

(1) FEM モデル

コンクリートブロックの形状寸法が、大版ブロック舗装の応力や変形に及ぼす影響について調べるた

めに、Winkler の路盤上の平板 FEM モデルを用いて解析を行った。このモデルにおいては、ブロック間の目地における荷重伝達は、せん断、曲げ、ねじりの 3 つのばねを持つ目地要素で表現されている。図 13 は大版ブロック舗装の解析のための要素分割の例である。ブロック舗装全体の領域は 6m × 6m であり、その中央に正方形の等分布荷重が作用している。構造および荷重条件の対称性を考慮して、図に示すような 1/4 の領域を実際の解析の対象とした。

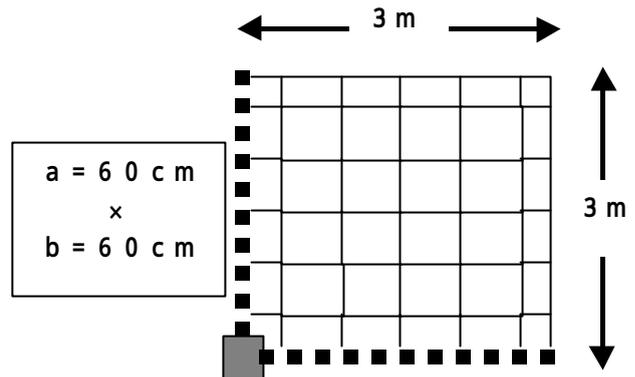


図 13 大版ブロック舗装の要素分割 (ブロックの形状寸法: 60 × 60cm の例)

表 4 決定された路盤 K 値とばね係数の値

区分	路盤 A	路盤 B
路盤 K 値 (N/mm ³)	1.5	3.0
せん断ばね (N/mm ²)	10.0	
曲げばね (N/mm)	500.0	

このモデルにおいて最も重要な点は、路盤 K 値および目地要素のばね係数の値の決定である。本研究においてはこれらの値を FEM による計算値と、実験値を比較することによって決定した。表 4 はそのようにして決定された値をまとめたものである。実際には、これらの値は大版ブロックの形状寸法や敷設パターンが異なれば違ってくるものと考えられるが、本研究では、すべて同じ値と仮定した。他の材料定数は、コンクリートブロックの弾性係数を 35,000MPa、ポアソン比を 0.2 とした。

これらの値を用いてひずみと変位を計算し、実測結果と比較したものが図 14 である。計算されたひずみは高いひずみレベルでやや大きい値を示している。

一方、計算されたたわみと実測値とはやや大きな差が見られる。このような差はあるものの、以降の計算については表 4 の値を用いることとした。

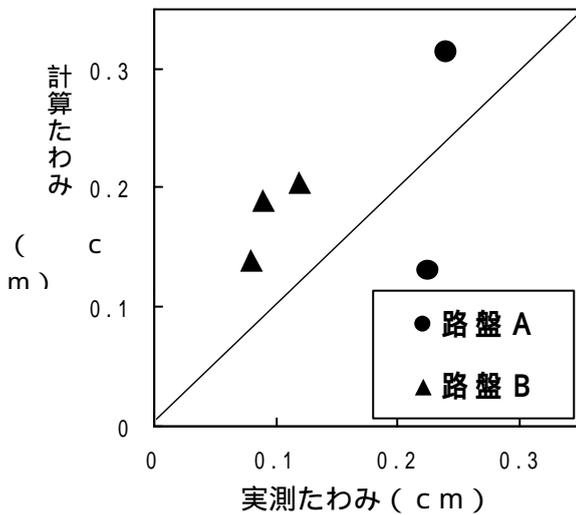
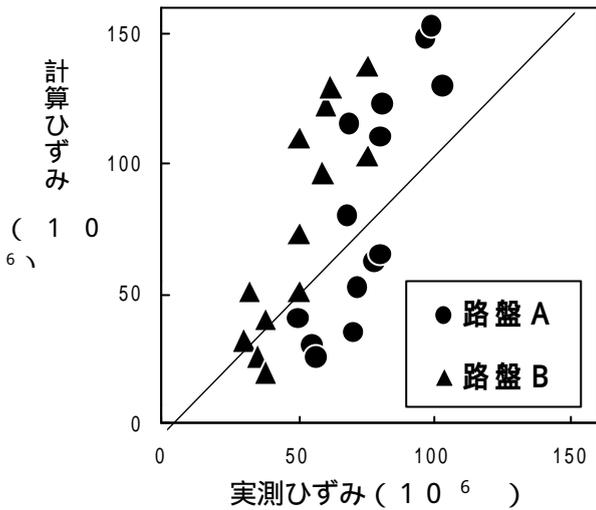


図 14 FEMによる計算値と実測値の比較

(2) 設計変数の影響

大版ブロック舗装の応力やたわみはブロックの形状寸法や路盤の種類の影響を受けると考えられる。本項では、FEMシミュレーションによって、ブロックの応力やひずみに及ぼす路盤K値やブロックの形状寸法、および、ブロック厚さの影響について検討を行った。

シミュレーションに用いたブロックは、15cm×30cm、20cm×30cm、30cm×30cm、30cm×60cm、40cm×60cm、60cm×60cmの形状寸法である。各々のブロック厚さは、8、10、12cmとし、路盤のK値は1.0、2.0、3.0N/mm³と変化させた。69kNの荷重を舗装の中央に載荷し、目地要素のばね定数には表4の値を用いて、ブロック下面の最大曲げ応力と、最大たわみを計算した。

(3) 路盤K値の影響

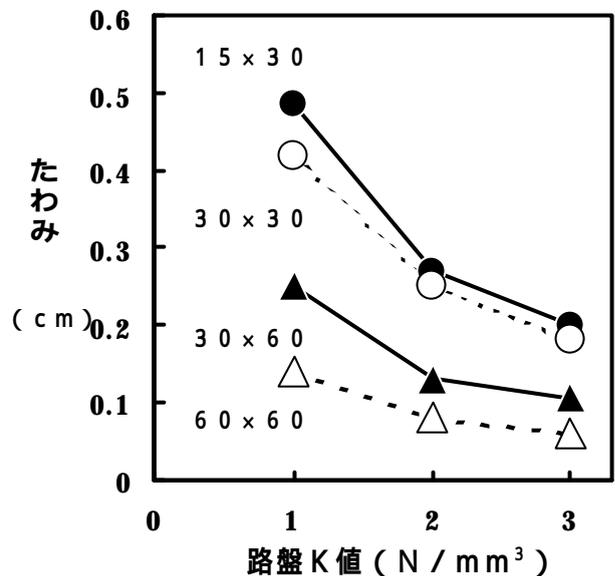
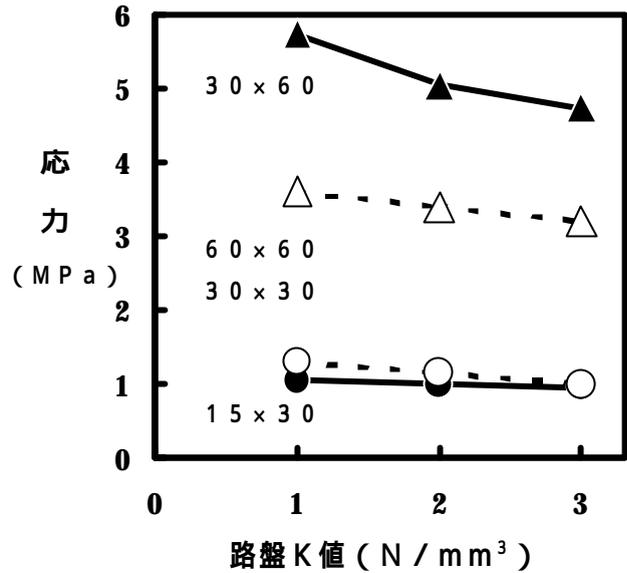


図 15 応力とたわみに及ぼすK値の効果 (ブロック厚さ=12cm)

図15は、路盤K値の変化に伴う曲げ応力とたわみの変化を示したものである。曲げ応力やたわみは、路盤K値が増加するに従って減少し、その影響はたわみの方が大きい。この結果より、たわみを減少させるためには路盤の剛性を高めることが有効である。

路盤K値を一定にすると、応力は形状寸法が大きなブロックほど大きくなるが、たわみは形状寸法が大きなブロックの方が形状寸法が小さなブロックよりも小さくなる。

また、たわみが1.0から1.5mm以上になると、大きな残留変形を生ずる恐れがあるという試験結果(図9参照)を踏まえ、たわみは小さいほうが望ましい。その意味で、形状寸法が小さなブロッ

クは発生する応力は小さいが、たわみは大きいことから、ブロックにはある程度の大きさが必要であると思われる。

(4) ブロック厚さの影響

図 16 は、ブロック厚さの変化に伴う曲げ応力とたわみの変化を示したものである。ブロック厚さは曲げ応力に大きな影響を及ぼすが、たわみに及ぼす影響は非常に小さい。したがって、ブロックの応力を小さくするためには、ブロック厚さを大きくすることが有効である。

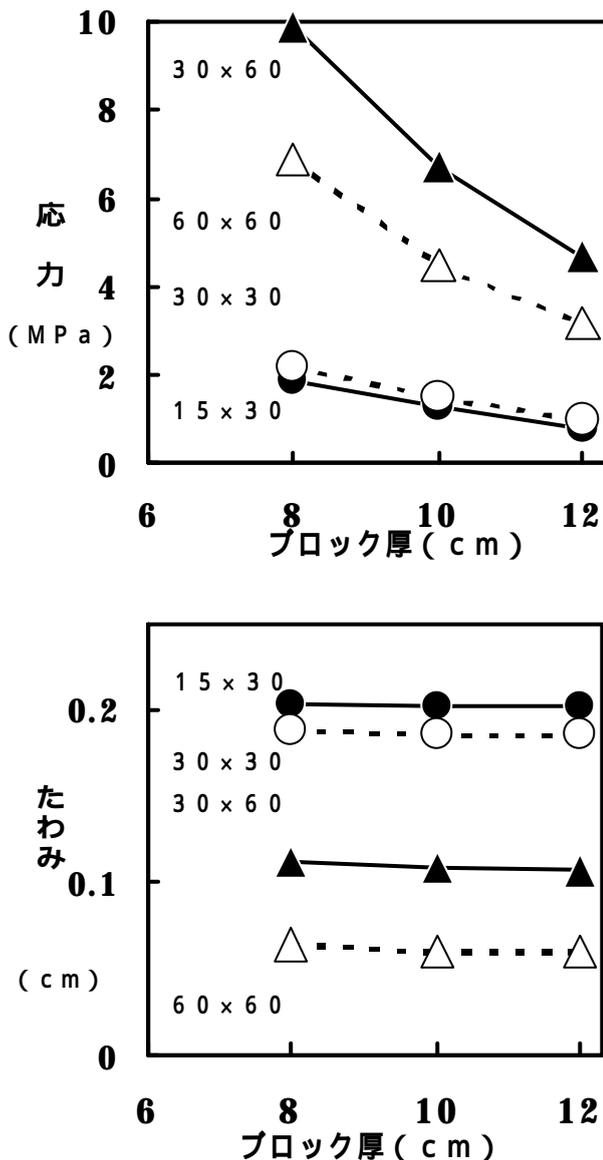


図 16 応力とたわみに及ぼすブロック厚さの効果 (路盤K値=3.0N/mm³)

(5) ブロックの形状寸法の影響

図 17 は、ブロックのアスペクト比 (b : 短辺 / a : 長辺) の変化に伴う曲げ応力とたわみの変化

を示したものである。形状寸法が小さいブロックの場合には、アスペクト比の影響は小さい。アスペクト比が 0.5 と 0.66 の応力が 1.0 の応力よりも小さいのは、荷重面積が1つのブロックの面積よりも大きいので、荷重直下のブロックに作用する総荷重がその分だけ小さくなるためである。

一方、形状寸法が大きなブロックの場合には、アスペクト比は応力やたわみに大きく影響する。アスペクト比が 1.0 (正方形) の場合に応力とたわみが最小になり、試験などからも同様の結果が得られている。⁴⁾ また、形状寸法が小さなブロックではたわみが 1.0mm をかなり上回っており、残留変形が懸念されることから、形状寸法が大きな正方形のブロックが設計上、最適な形状といえる。

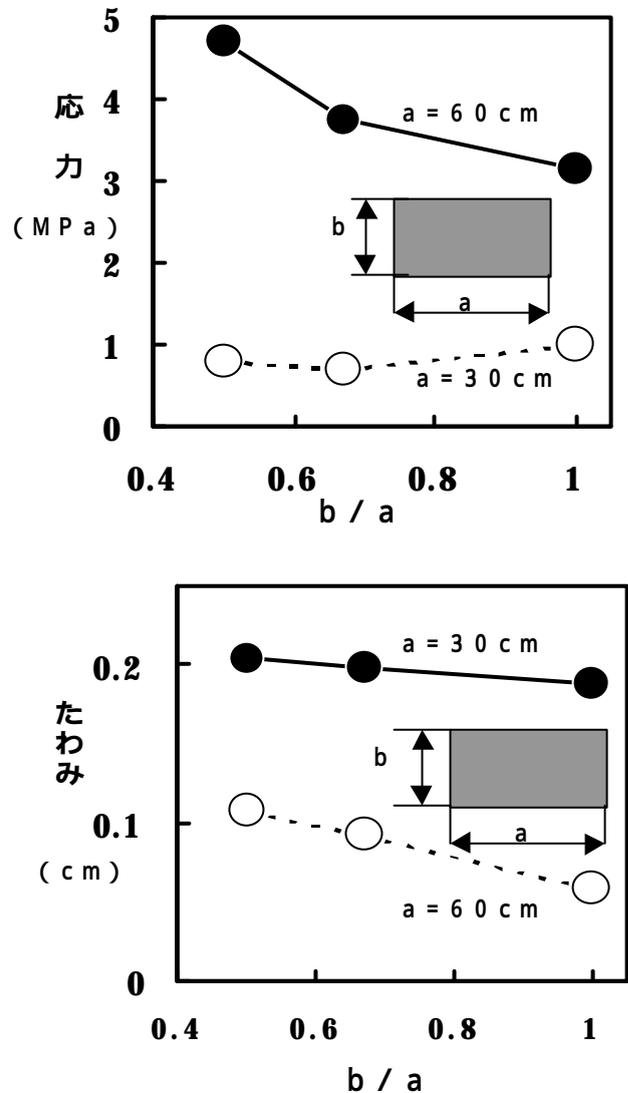


図 17 応力とたわみに及ぼすアスペクト比の効果 (ブロック厚さ12cm、路盤K値=3.0N/mm³)

4. まとめ

大版ブロック舗装の構造的挙動を検討するために実施した車輪走行模擬試験装置による試験結果から、以下の事項を確認した。

- (1) 大版ブロック舗装の供用性能に影響を及ぼすブロックのリフトアップ量や、わだち掘れ深さを小さくするには、ブロックの形状寸法やそのアスペクト比に応じて路盤K値とブロック厚を大きくし、たわみ量を0.5~1.0mm程度に制御する必要がある。
- (2) ブロック下面に発生する引張応力を小さくするには、路盤K値およびブロック厚を大きくし、ブロックのアスペクト比を1.0に近づける。
- (3) ブロックの形状寸法が60cm×60cm程度の大版ブロック舗装において、ブロック下面の引張応力を、一般的なインターロッキングブロック舗装(ブロック寸法:10cm×20cm、ブロック厚さ:8cm、路盤K値:1.5N/mm³)と同程度にするには、路盤のK値を2.5Nmm³、ブロック厚を12cmと大きくすると共に、アスペクト比が1.0に近い大版ブロックを用いるのが効果的なひとつの方法として考えられる。

FEM解析の結果からは、以下の事項を確認した。

- (1) 曲げ応力とたわみは路盤K値が増加するに従って減少し、その影響はたわみの方が大きい。また、形状寸法が小さなブロックの場合、発生する応力は小さいものたわみは大きいため、ブロックにはある程度の大きさが必要である。
- (2) ブロックの厚さは曲げ応力に大きな影響を及ぼすが、たわみに及ぼす影響は非常に小さい。したがって、ブロックに発生する応力を抑制するためには、ブロック厚さを厚くすることが有効である。
- (3) 形状寸法が大きなブロックのアスペクト比は、曲げ応力やたわみに大きく影響し、アスペクト

比が1.0(正方形)のブロックは曲げ応力とたわみが最小になる。

なお、本試験結果及び解析結果に基づいて、施工した実施工現場の供用状態は、供用後4年が経過した時点でも良好な状態にある。

5. おわりに

景観性向上として要望される大版ブロックを、車道舗装に適用するために実施した載荷試験および理論解析により、良好な大版ブロック舗装の供用性能を確保するための構造的要因について検証した。

今後 これらの妥当性をさらに確認するとともに、良好な供用性能を持続させるための要因についても検討して行くことで、ブロック舗装の普及に貢献出来れば幸いである。

参考文献

1. 柳沼宏始、畑 実、石下幸司：インターロッキングブロック舗装の機能的破損について、第20回日本道路会議論文集(1993)
2. 石下幸司、関根重年、加形 護、内海吾朗：ILブロック舗装の荷重分散に関する一検討、舗装Vol.31-6(1996)
3. インターロッキングブロック舗装設計施工要領：社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会(平成12年7月)
4. 西沢辰男、野田悦郎、福田 正：プレキャストコンクリート舗装の力学特性に関する基礎的検討、土木学会論文集 No.496/V-24, pp.81~88, 1994.8

EFFECTS OF BLOCK DIMENSION ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF BLOCK PAVEMENT FOR ROADWAYS

Mamoru KAGATA, Tatsuo NISHIZAWA, Minoru HATA

In block pavement for roadways, only a block type with a size of 10×20cm is usually used. However, block dimension and shape should be determined in terms of structural integrity and improvement of environmental scenery of road. The aim of this study is to examine the applicability of relatively large size blocks to roadway pavements based on the experimental results obtained by using a traffic load simulator which simulates moving wheel on pavement. In this study, the effects of size and thickness of block and type of base course on deflection and stress of pavement were investigated. Furthermore, the experimental results were confirmed by simulations using a finite element model.