

敷き並べたブロックの座屈実験

EXPERIMENTS ON THE BUCKLING OF BLOCKS LAID IN A LINE

川口昌宏*
By Masahiro Kawaguchi

1. 緒言

これまで舗装の座屈に関して研究してきた結果によれば、舗装の座屈のメカニズムは、低ライズアーチや、かくの場合にみられる飛移座屈の一種だと考えられる¹⁾²⁾。理論解析にあたって、先に報告した連続舗装の場合には、座屈長は簡単に決まらないが、座屈波の起点および終点における境界条件は、かなり明確なものと考えられ、取り扱いが容易である。しかし、実際の舗装では、目地やクラックがあって、この点で舗装は不連続である。また、すべての目地やクラックが力学的に一様というわけではない。一つ一つの不連続点が力学的にどのような境界となるのかは、実際の舗装について調べなければわからないであろう。

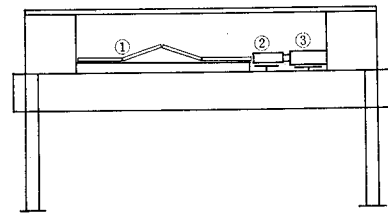
問題の手がかりを得ようと、まず、ごく簡単なモデルについて

- ・境界のメカニズムの観察
- ・座屈モードと境界条件の関係の考察
- ・境界条件と座屈荷重のばらつきを観察

などを行なうため、実験を行なった。

2. 実験方法

この実験装置は先の報告¹⁾に述べたものと同じものであるから概略図のみを図-1に示す。試験体には断面13.0×88mmのラワン材を用いた。ヤング率は圧縮試験によれば、 $5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、曲げ試験によれば $15 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ である。実験の応力の範囲では、フックの法則にしたがうと考えられる。また密度は 0.51 g/cm^3 である。このような材質の、長い板材のラワンをノコギリで切断して、必要な長さのブロックをつくった。端面はヤスリで仕上げた。



- ① 試験片
- ② ループ荷重計
- ③ オイルジャッキ

図-1 実験装置

実験方法は、一端よりオイルジャッキで圧縮力を加え座屈させた。圧縮力の大きさは、ループ荷重計により、変形はノギスにより測定した。

3. 実験結果

行なった実験の種類は表-1に示す。図-4は実験結

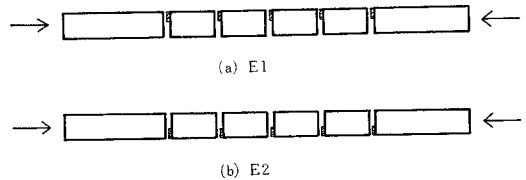
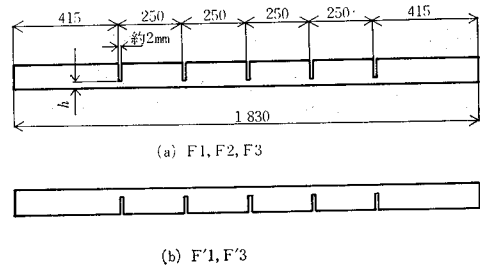


図-2 偏心圧縮試験



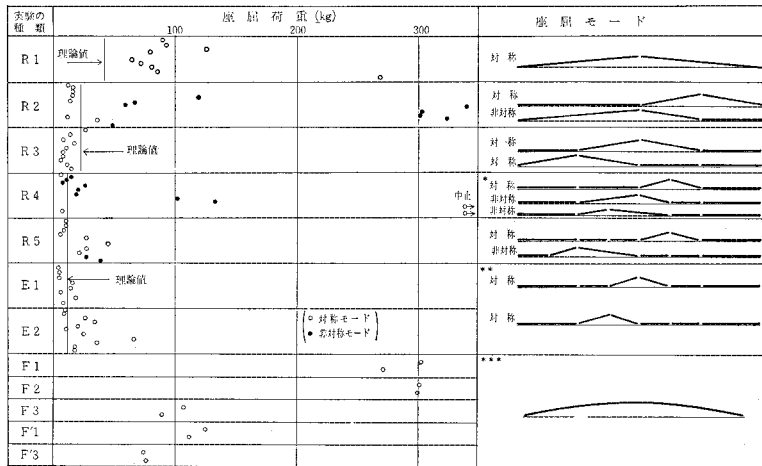
F1, F'1: $h=5 \text{ mm}$, F2: $h=3 \text{ mm}$, F3, F'3: $h=2 \text{ mm}$

図-3 切り込みのある連続板

* 正会員 工博 日本大学講師 理工学部交通工学科

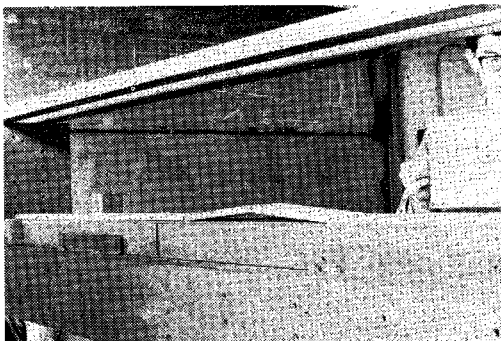
表-1 実験の種類

実験の種類	試験体の構成 注：(1), (21), (221)などはブロックの番号を示す。
R1	(1)-100.0 cm, (2)-100.0 cm の2枚のブロックを使う。並べる順序および各ブロックの表裏をかえて実験。
R2	(1)を分割した(11)-50.0 cm と, (12)-49.5 cm と, (2)の3枚のブロックを使う。並べる順序は(2)+(11)+(12)または(2)+(12)+(11)。この各ブロックの表裏をかえて実験。
R3	(11), (12)と(2)を分割した(21)-50.1 cm, (22)-49.8 cm の4枚のブロックを使う。並べる順序および各ブロックの表裏をかえて実験。
R4	(11), (12), (21)の約50 cmのブロックと, (22)を分割した(221)-24.3 cm, (222)-24.4 cm の5枚のブロックを使用。並べる順序および各ブロックの表裏をかえて実験。
R5	(11), (12)の約50 cmのブロックと(21)を分割した(211)-25.2 cm, (212)-24.4 cm, および(221), (222)の6枚のブロックを使う。各ブロックを並べる順序および表裏をかえて実験。
E1	R5で使用したブロックの片端面上辺に沿って、厚さ0.6 mmのボール紙を幅5 mmに切ったものを貼りつける。ボール紙のある方を上側にして、偏心圧縮により上側が曲げ圧縮となるようにする(図-2a)。ブロックの順序をかえて実験。
E2	E1で用いたブロックを裏返して、偏心圧縮により下側が曲げ圧縮となるようにする(図-2b)。ブロックの順序をかえて実験。
F1	長さ183 cmの板の中央と、その左右に25 cm および50 cmのところにのこぎり目を入れる。のこぎり目は、板厚を残すところ5 mmの深さまで入れる。この切り残った側が下になるようにして、偏心圧縮により、上面が曲げ引張となるような実験をする(図-3a)。
F'1	F1で用いた試験片を裏返して、下側が曲げ引張となるようにする(図-3b)。
F2	F1の試験体の目地をさらに切り込み、残すところ3 mmとする。残った側を下にする。
F3	F2の試験体の目地をさらに切り込み、残すところ2 mmとする。残った側を下にする。
F'3	F3の試験体を裏返して、上側が曲げ引張になるように置く。

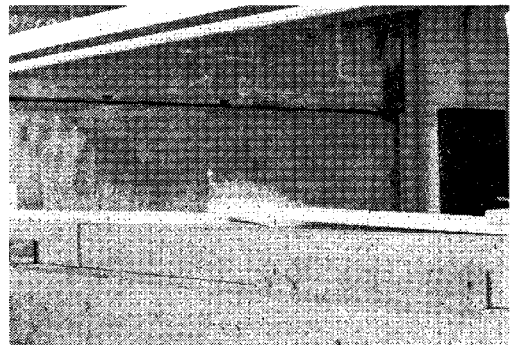


同一種の実験結果は実験順序のとおり上から下へ記入してある。図中の理論値は境界をヒンジと仮定して計算したリングの下限座屈値である。

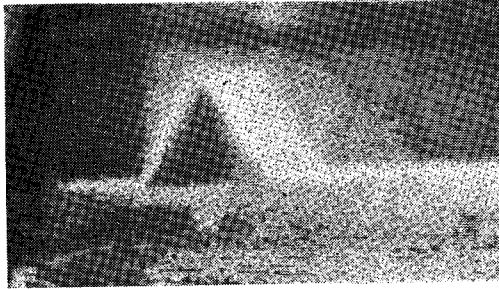
図-4 実験結果



6.2 kg で静かに持上った。
写真-1 R4-1



132 kg で激しく持上り、押し合
いがずれて下がったところ。
写真-2 R4-9



66 kg でやや激しく持上ったところ、この後押し合いがはずれて下がった。ビデオテープ画像の写真。

写真-3 E2-8

果を示す。

4. 数値計算

ブロックが互いにヒンジで結合されていると仮定し、リンクの飛移座屈理論²⁾にのせて、座屈荷重の略算を行なう。持具のばねおよび初期変形(偏心圧縮は初期変形に置換えられる)を両方考慮する。記号の説明は図-5に示す。

図-5 に示したリンクの持上り後のつりあい条件は

$$Q = 2P_A \cdot \frac{C}{\sqrt{l^2 + C^2}} \doteq 2P_A \cdot \frac{C}{l}$$

適合条件は、

$$2(\sqrt{l^2 + C^2} - \sqrt{l^2 + C_0^2}) = \frac{P - P_A}{EA} \sqrt{l^2 + C_0^2} \times 2 + \frac{P - P_A}{\mu}$$

であるから、整理して、

$$\frac{1}{2} \{ (C/l)^2 - (C_0/l)^2 \} = \frac{P - P_A}{EA/r}$$

ここにおいて、つぎのような無次元量を導入する。

$$\frac{P_A}{EA/r} = p_A, \quad \frac{P}{EA/r} + \frac{v_0^2}{2} = p, \quad \frac{Q}{EA/r} = q,$$

$$C/l = v, \quad C_0/l = v_0, \quad r = 1 + EA/2\mu l$$

これによって、つりあい条件および適合条件は、それぞれ

$$q = 2p_A v$$

$$p - p_A = \frac{1}{2} v^2$$

となり、これより p_A を消去すると

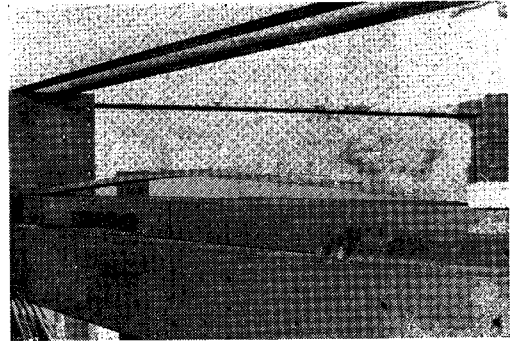
$$p = \frac{q}{2v} + \frac{v^2}{2}$$

と全く前論文²⁾の式(4)と一致する。

ポテンシャルエネルギーは、床を基準にすれば、座屈前においては、

$$U = \frac{P^2}{2EA} l \times 2 + \frac{P^2}{2\mu}$$

これを無次元化して



107 kg で激しく持上ったところ、中央のこぎり目のところでやや折れている

写真-4 F3-1

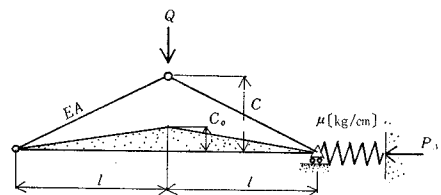


図-5 初期変形および持具のばね作用があるリンクの座屈

$$u = \frac{U}{EA/l} = (p - v_0^2/2)^2$$

同じように、座屈後のポテンシャルエネルギーは

$$U_A = \frac{P_A^2 l}{EA} r + Q(C - C_0)$$

$$u_A = p_A^2 + q(v - v_0)$$

以上から、下限座屈値は

$$d = u - u_A = 0$$

より求められる。すなわち、これは前論文²⁾の式(23)であり、下限座屈を生ずる v_e は

$$v_e^4 + v_0 v_e^3 - v_0^2 v_e^2 - (v_0^3 + 2qv_0^2 + 2q)v_e + 2qv_0 = 0$$

より求められる。 v_e が求められれば

$$p_e = \frac{P_e}{EA/r} = \frac{q}{2v_e} + \frac{v_e^2}{2} - \frac{v_0^2}{2}$$

ここに、 P_e は下限座屈値である。

ばねは、座屈しない板部分 μ_1 と、荷重計およびジャッキ μ_2 であり、合成したばね定数 μ は、

$$\mu = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

ただし、 $\mu_1 = EA/l_1$ 、 EA は板の断面剛性、 l_1 は板の長さである。

計算結果を図-6、図-7に示してある。これによれば、初期変形が下限座屈値を低下させることは明らかであるが、注意すべきことは、ブロック長が大きくなれば、下限座屈値が大きくなることである。これは、従来の理論と全く異なる点である。図-7によれば、板のヤング率は、座屈荷重にあまり影響していない。これも、

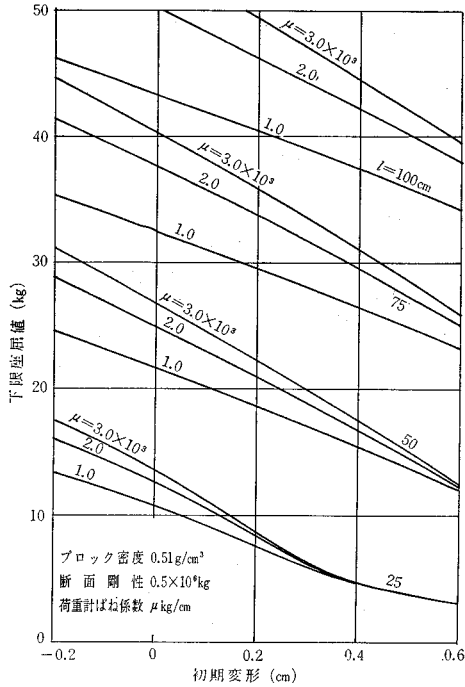


図-6 下限座屈値に与える初期変形の影響

いわゆるオイラー座屈などと全く違った結果である。

5. 考 察

(1) 座屈荷重のバラツキはきわめて大きい。この座屈荷重のバラツキはブロックを並べる順序をかえた結果生じたものであり、これは、ブロック端面のかみ合いの様子が座屈荷重に大きい影響があることを示している。

(2) R2, R4 では、板の並べ方に、対称のものと非対称のものがある。したがって、座屈には対称モードと非対称モードがいろいろまじっている。板の組合せ方によって、板が互いに接している部分での境界条件が異なり、そのために座屈荷重は変動して、最も座屈しやすいところで座屈したわけである。非対称と対称のどちらが座屈モードとして可能性あるかは、境界条件との関係があるから簡単には決められない。しかし、ブロックが一様に並べられていれば、座屈は対称モードのみしかみられなかった。

(3) 飛移座屈を生ずるには、座屈過程で越えなければならないエネルギーの山があることが理論的に明らかになっている²⁾。R2, R4 でみられるような 300 kg 以上の座屈荷重は、この山を越えずにいる いわば過圧縮（過飽和、過冷却などの物理現象と類似）の状態ではないかと考えてみる必要がある。このような場合に生ずる座屈はきわめて激しいもので、写真-2 のように大きな音とともに板がはじける。すなわち、この場合には、圧

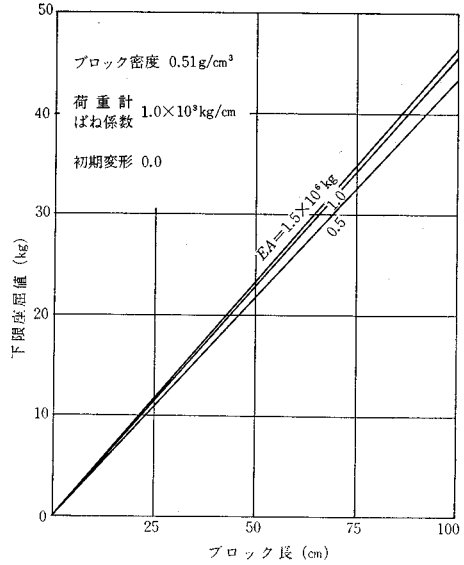


図-7 リンクの飛移座屈理論による模型ブロックの下限座屈値

縮ひずみエネルギーを静的に適合条件を満足するような形で、位置のエネルギーとして吸収できないほど、ひずみエネルギーが過剰になってしまっているのではないかと考えられる。

過圧縮を生ずる境界は、各ブロックの圧縮状態が一様になっていて、あたかも連続しているごとくなるような場合であると考えられる。これはすなわち、ブロックの端面が広い範囲にわたって確実に接触している場合である。

(4) ブロック長が短くなれば、座屈荷重は低下する傾向にある。これはオイラー座屈などの柱の座屈理論では全く説明できない。

(5) E1, F'1, F'3 は上側偏心圧縮, E2, F1, F2, F3 は下側偏心圧縮である。この両者を比較すれば、下側偏心の方が座屈荷重は大きい。この傾向は板の曲げが重要になるにつれて、さらに強くなるであろう。

(6) E1 および E2 を比較すれば、E2 がすべて E1 より大きいというわけではない。このことから、ブロックの上側かあるいは下側かのどちらを圧縮するかということ以上に、ブロック間の接触状態が影響すると考えられる。これを考えてみると、図-8 のように、ブロック相互間の圧縮点のずれにより、みかけの初期変形が生じていることが原因ではないかと考えられる。計算によれば、図-6 に示すように、初期変形の影響が予想で

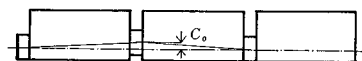


図-8 ブロック間の圧縮位置の違いによる初期変形

きる。

(7) ブロックの場合(実験番号R)に比して、切り離されていないFの場合は、いずれも座屈荷重が大きい。この点については、実際の舗装の場合にも、十分配慮する必要がある。

(8) 切り離されていない場合、目地部の曲げ剛性が座屈荷重の大きさに影響する。目地の残り厚さは F1: 5 mm, F2: 3 mm, F3: 2 mm であるが、座屈荷重は F3 で激減していることからみると、残り厚さの剛性の働きは微妙である。

6. 結 語

このかなり定性的な実験から、目地のある舗装の座屈を研究するにあたっては、つぎのことを考慮する必要があると考えられる。

(1) ブロック同志が互いに押合う位置は一様ではない。このブロック間の相対的ずれは、初期変形と考えられ、大きい影響を持つ可能性がある。

(2) 偏心圧縮の影響がある。

(3) 座屈前の押し合いの位置ばかりでなく、持上る途中での各ブロックの端面の接触位置をはっきりさせる必要がある。

(4) 座屈モードとしては、規則的に敷かれたブロックならば、非対称モードの可能性は少ないと考えられる。

(5) 目地部が完全に切れていない場合は、座屈に対して有利であるが、座屈時の目地の剛性と破壊を考える必要がある。

なお数値計算は、東京大学大型計算機センターを利用した。

参 考 文 献

- 1) 川口昌宏：“連続舗装の熱膨張座屈”，土木学会論文報告集，No. 170，1969-10，pp. 37-52.
- 2) 川口昌宏：“剛床上で圧縮されるリンクの飛移座屈理論”，土木学会論文報告集，No. 176，1970-5，pp. 59-62.

(1970. 2. 2・受付)