

アスファルト混合物の施工性に関する一考察

東北工業大学 土木工学科 正員 ○ 新沼 正博
同上 正員 新田 登

1. 緒 言

アスファルト舗装の耐久性評価上、アスファルト混合物中に存在する空隙といふものが、重要なファクターとなことは各種の研究報告から明らかなである。この混合物中の空隙の量及び質を支配すると言われる、締固めに関する研究は、理論材料の進んでいる設計面の研究に比べ、立ち遅れの現状にある。特に現場ローラー車圧においては、定性的に空隙の減少が混合物中の骨材粒子の回転及び錯直、水平両方向の移動に原因するが、その締固めのメカニズムを確立させるまでにはいたっていない。

本報告は、この様に不明な点が多い締固め機構を解明すべく、現場ローラー車圧に類似させた複式ローラーによる車圧を行い、その際のアスファルト混合物の挙動をこうえいこうとするものである。

2. 実験要領

2-1 実験試料：使用したアスファルト混合物はポンドアスファルト配合に属する粒変と毎レ、バインダー含有量は9%である。

2-2 実験方法及び解析法：A型複式ローラーの型枠(10×14×120cm) K試料を詰め、その供試体側

実 験 条 件			
載正線荷重	2.8kg/cm, 2.2kg/cm	ローラー走行速度	4.2cm/sec
初期空隙率	17 ± 0.2 %	載正厚	72mm
締固め粘度	7 × 10 ³ CP	写真撮影速度	2コマ/sec

表1・実験条件

面に1cm間隔に縦6本×横45本、計270本のピンを打ち込んだ。直径26cmのローラドラムに回転力を与え、一方向車圧を行ない、その際のピンの動きをメモーションカメラで連続写真撮影し、そのフィルムを2K座標解析装置でピンの座標値を読み取り、混合物の挙動として追跡・測定する。この座標値をもとに、種々の変位量を算出していくものである。実験条件については表1K米を通りである。

3. 実験結果及び考察

3-1 載正におけるマクロ的挙動

3-1-1 載正挙動における一般のパターン

載正荷重下におけるアスファルト混合物の一般のパターンは写真1K示すものである。本報告ではそれを検討するため、ある条件におけるローラー荷重位置を3点述べ、各々の位置において写真1の枠内状態を録り取った。次に、3点の荷重位置をローラー中バと重ね合わせることによって1つの位置にまとめ、パターンが荷

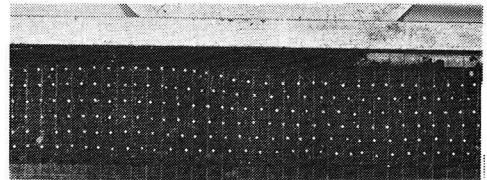


写真1. 載正挙動における一般のパターン

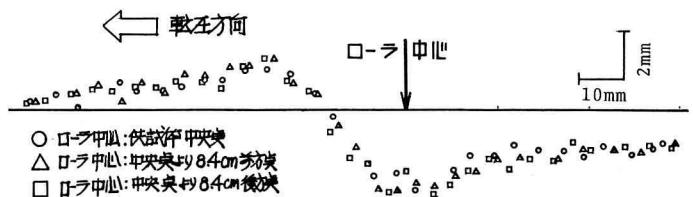


図1. 載正挙動における一般のパターンの重ね合わせ

重位置によって変化しない一定のものであることを確認した。この事は此条件においても確認され、以上の事は図1K示す通りであるが、3種の記号が重なり合い、一つの波形を示していることがわかる。ここにおいて、載正においてはローラー進行とともに、右方部の隆起と踏み込む枠内形が締固められ、あかたも波高の低い

波が、ある一定速度で伝播していくかの様であるという従来の仮説が、実験的にかつ明確に立証されたことになる。

3-1-2 軟圧等動における一般のパターンへの波動論的アプローチ

軟圧等動における一般のパターンを一種の波動とする考え方を具体的に考察してみる。ある特別な状態あるいは形態が媒質の中を移動する現象を波動とする波動論の根本理論が、前節で述べたパターンに適用される様に見える。すなわち、パターンはある一定状態を保ちローラ進行とともに、アスファルト混合物という媒質の中を、ローラ走行速度という一定速度で移動する一種の進行波と捉えることが可能に見えるのである。

ただパターンの場合には、周期性をもつことの多い1個の波が移動するという点で、波動論で取り扱われる一般的な波とは異なるものと思える。今、ローラ進行中と考えると、ローラ前方にローラ荷重の影響を受け、今までの波が始めようとする波(等動前始波)、又後方に荷重影響圏から外れ等動を終了したばかりの波(等動終了波)が存在する。この2波間の距離が、波動に

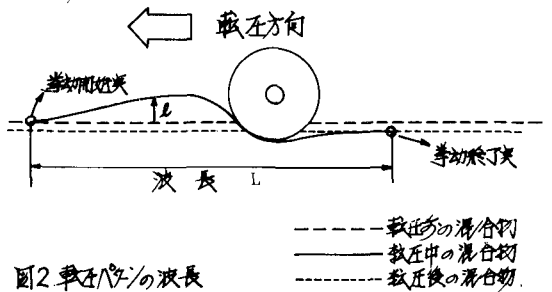


図2 軟圧パターンの波長

における波長に相当する。その点について図2に示すがあるが、等動前始波は軟圧前の混合物の線(図中破線)と軟圧中の混合物の線(図中実線)の交差点で、又等動終了波は軟圧後の混合物の線(図中点線)とパターンとの交差点と見なされる。図2に示す通りパターンは波と捉えれば余りに不規則な形態を呈しているが、これを定量的に表現しようと思ふ。定量化することにより、解明の目的に有効なアプローチが得られるのではあるからである。そこで、パターンの様子を複重の形態と見なす波は、一般に異なる周期をもついくつかの波の和と見なすから重ね合わせの原理を利用して表すことが可能であると言われ、潮汐の解析など色々な分野でその利用が見られる。軟圧等動の一般のパターンにおいても、波動の定義が成立するのであるから、その様子を手法が適用可能であると思われる。パターンにおいて、軟圧前の混合物の位置を基準軸にとり、軸よりパターンの曲線までの距離を l とする。パターンをある周期をもつ波の1波長と考えれば、 l は異なる周期をもつ正弦波が余弦波の和をもって、近似的に表すことができる様に見える。すなわち、フーリエ級数表すと、次式の様に示されるだろう。

$$l(\theta) = A_0 + A_1 \cos \theta + A_2 \cos 2\theta + \dots + A_m \cos m\theta + B_1 \sin \theta + B_2 \sin 2\theta + \dots + B_n \sin n\theta \quad \text{--- ①}$$

今、1波長を n 個に等分割すると、 $l_0, l_1, l_2, \dots, l_n$ は $\theta = 0, \frac{2\pi}{n}, \frac{4\pi}{n}, \frac{6\pi}{n}, \dots, \frac{20\pi - 12\pi}{n}$ における $l(\theta)$ の値と見なすことができる。そうするとあとは、 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_m, B_1, B_2, \dots, B_n$ の係数値を実際のパターンの曲線に一番よく近似する様に決定すればよい訳である。便宜的に $n = 2m + 1$ とすれば、未知数の数と同時の方程式がなから規準方程式が得られるので、各係数は n 個の連立一次方程式の根と見なすことになる。なおこの係数決定においては、和分解を利用することによれば有効である。なお①式は、三角関数の合成公式を使用して次式の様に整理できる。

$$l(\theta) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\theta - \beta_1) + \alpha_2 \sin(2\theta - \beta_2) + \dots + \alpha_m \sin(m\theta - \beta_m) \quad \text{--- ②}$$

ただし $\alpha_0 = A_0, \alpha_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2}, \beta_m = \tan^{-1} \frac{A_m}{B_m}$ である。

以上の様に基準軸からパターンの曲線までの距離 l をその1波長において、 θ の関数として近似的に表すことができる。ただしパターン曲線においては、 $0 \leq \theta < 2\pi$ という範囲に限定されることを、断りをおかす必要がある。

載圧等効においては、パターンがある一定速度(=ロー走行速度)で、ロー進行方向に移動するのであるから、図3の枠K、等効開始点と原点とをX-Y座標軸と考えると、②式は、時刻tの関数として

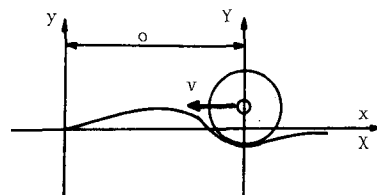


図3. 一般の1パターンの座標系

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \sin \{R(X + \theta t) - \beta_1\} + \alpha_2 \sin \{2(R(X + \theta t) - \beta_2)\} + \dots + \alpha_m \sin \{M(R(X + \theta t) - \beta_m)\} \quad (3)$$

の枠K表式できる。ただし $R = 2\pi/L$, $\theta = 2\pi v/L$

v = ロー走行速度, L = 波長, R = 角波数, θ = 角振動数である。

次にY軸を等効開始点からロー中心へ距離 θ だけ移動させた

新座標系X'-Y'座標軸と考えると、③式は X に $X + \theta$ を代入することにより次式の枠になる。

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \sin \{R(X + \theta) + \theta t - \beta_1\} + \alpha_2 \sin \{2(R(X + \theta) + \theta t) - \beta_2\} + \dots + \alpha_m \sin \{M(R(X + \theta) + \theta t) - \beta_m\} \quad \text{と} \quad \text{なる。これを整理して}$$

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \sin \{RX + \theta t - (\beta_1 - R\theta)\} + \alpha_2 \sin \{2(RX + \theta t) - (\beta_2 - 2R\theta)\} + \dots + \alpha_m \sin \{M(RX + \theta t) - (\beta_m - MR\theta)\} \quad (4) \quad \text{と} \quad \text{なる。}$$

次に実際の条件の場合として、載圧線荷重2.8 kg/cmにおけるパターンの曲線の近似式を求めてみる。実際の近似計算においては、1波長の分割数 N を24とするが、④式の枠の近似式が得られれば段階で $M = 6$ までとせば、充分近似値が得られるので、 $Y = \alpha_0 + \alpha_1 \sin \{RX + \theta t - (\beta_1 - R\theta)\} + \alpha_2 \sin \{2(RX + \theta t) - (\beta_2 - 2R\theta)\} + \dots + \alpha_6 \sin \{6(RX + \theta t) - (\beta_6 - 6R\theta)\}$ という形になる。

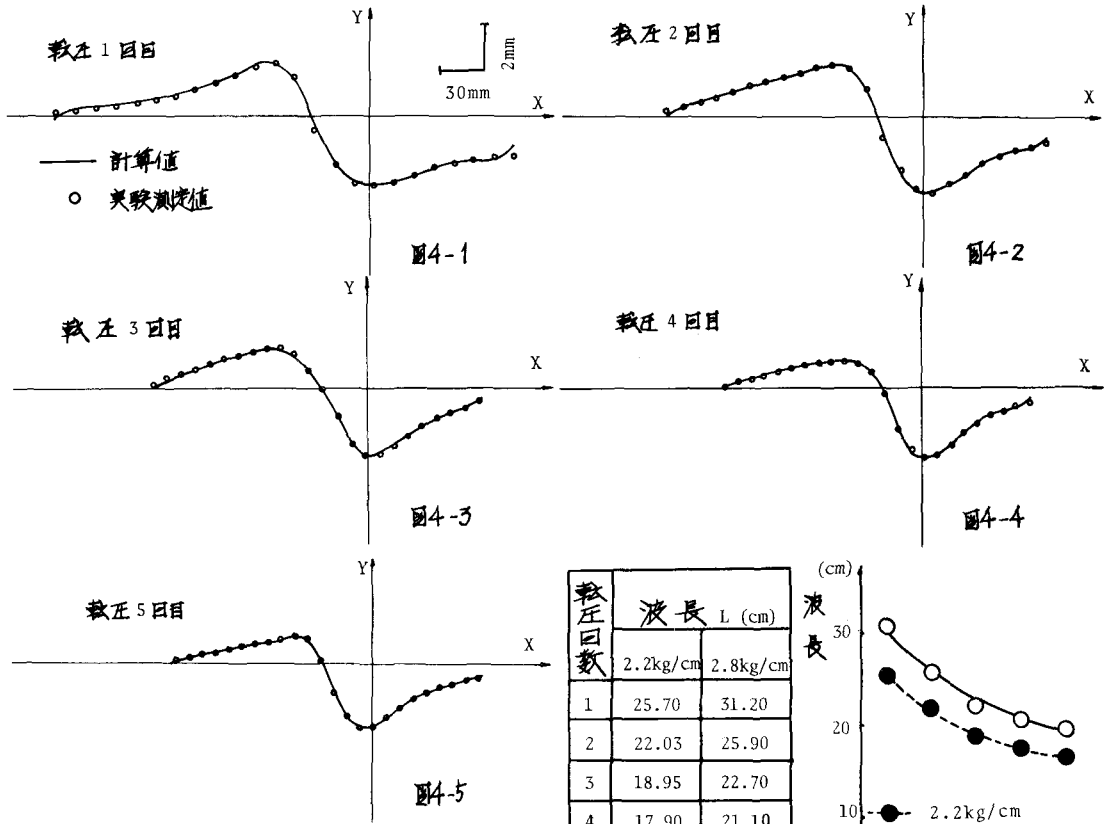
2.8 kg/cmのときの載圧回数ごとに近似式は次の通り。

- ・載圧1回目 $Y = -3.9 + 21.8 \sin \{1.2X + 48.5t + 223.2\} - 8.4 \sin \{2(1.2X + 48.5t) + 426.0\} + 6.3 \sin \{3(1.2X + 48.5t) + 677.2\} - 2.8 \sin \{4(1.2X + 48.5t) + 856.8\} + 1.7 \sin \{5(1.2X + 48.5t) + 1163.2\} + 1.5 \sin \{6(1.2X + 48.5t) + 1499.6\}$
- ・載圧2回目 $Y = -2.5 + 23.6 \sin \{1.4X + 58.4t + 226.4\} - 8.6 \sin \{2(1.4X + 58.4t) + 431.8\} + 5.4 \sin \{3(1.4X + 58.4t) + 658.7\} - 2.9 \sin \{4(1.4X + 58.4t) + 840.2\} + 1.1 \sin \{5(1.4X + 58.4t) + 1040.2\} + 0.9 \sin \{6(1.4X + 58.4t) + 1465.2\}$
- ・載圧3回目 $Y = -3.2 + 20.9 \sin \{1.6X + 66.6t + 236.4\} - 6.6 \sin \{2(1.6X + 66.6t) + 451.1\} + 3.2 \sin \{3(1.6X + 66.6t) + 672.1\} - \sin \{4(1.6X + 66.6t) + 838.7\} + 0.2 \sin \{5(1.6X + 66.6t) + 1145.8\} + 0.6 \sin \{6(1.6X + 66.6t) + 1415.5\}$
- ・載圧4回目 $Y = -4.7 + 18.1 \sin \{1.7X + 71.7t + 234.4\} - 6.8 \sin \{2(1.7X + 71.7t) + 428.2\} + 3.9 \sin \{3(1.7X + 71.7t) + 650.0\} - 1.5 \sin \{4(1.7X + 71.7t) + 826.5\} + 0.7 \sin \{5(1.7X + 71.7t) + 1112.8\} - 0.5 \sin \{6(1.7X + 71.7t) + 1266.4\}$
- ・載圧5回目 $Y = -4.6 + 16.2 \sin \{1.8X + 75.6t + 234.5\} - 6.6 \sin \{2(1.8X + 75.6t) + 445.7\} + 4.3 \sin \{3(1.8X + 75.6t) + 659.5\} - 1.2 \sin \{4(1.8X + 75.6t) + 870.5\} + 1.3 \sin \{5(1.8X + 75.6t) + 1116.7\} + 0.1 \sin \{6(1.8X + 75.6t) + 1260.7\}$

以上の式中、正弦面の中は度単位で表されている。

これらの近似式を用いて計算した曲線と実験測定により得られたパターンの曲線の値とを図面上で比較すると、図4-1から図4-5までに示す様に、計算値(実線)と実験測定値(○印)はよく一致している。両端部において若干のズレは見えるが、よい近似と言えるだろう。

載圧線荷重2.2 kg/cmの場合においても、同様の近似式が得られ、載圧等効の一般のパターンに対する波の端部のアプローチの妥当性が確認された。



載圧回数	波長 L (cm)	
	2.2kg/cm	2.8kg/cm
1	25.70	31.20
2	22.03	25.90
3	18.95	22.70
4	17.90	21.10
5	16.80	20.0

表2. 波長の長さ

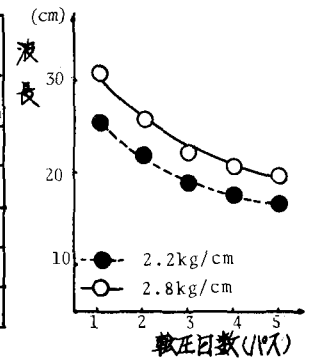
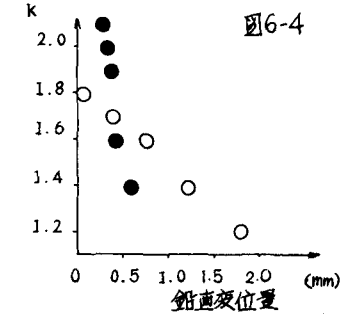
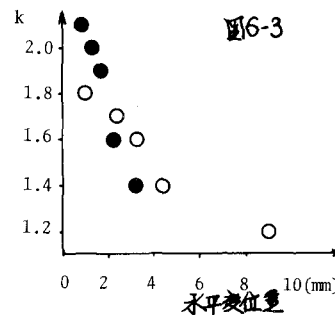
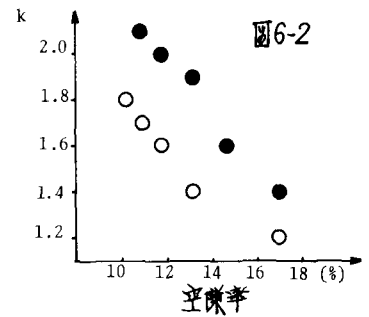
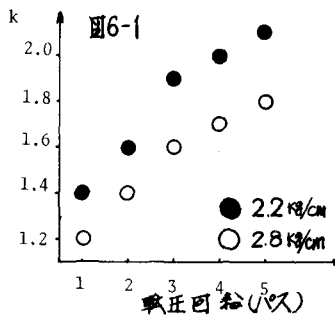


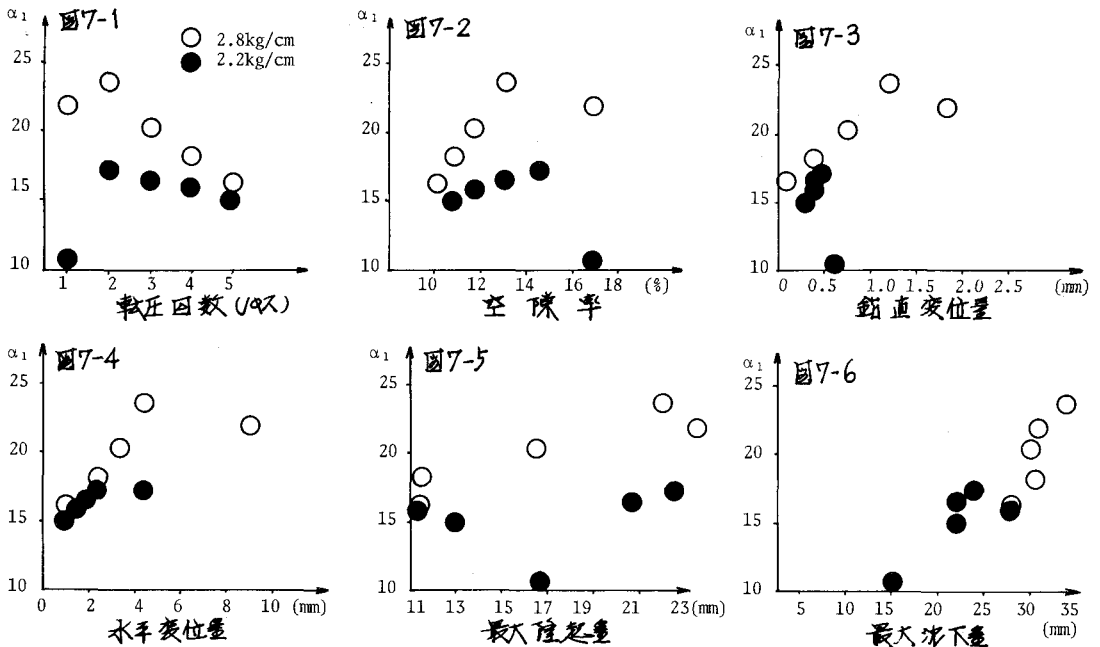
図5. 波長と載圧回数

これから近似式において、波長 L 、角波数 k 、角振動数 ω 等の数値について載圧線荷重、主梁率、鉛直及び水平変位量との関連性を検討してみる。尤 k 、波長 L は表2及び図5に示す様に、載圧線荷重大きる程長く載圧回数とともに短くなる。混合物の締固め抵抗の増加を意味するのだろう。尤 k についてみると載圧線荷重大きる程小さく、載圧回数とともに単調増加の傾向にある。図6-1より図6-4に示す通りであるが、 k は他の要素とも相関関係にあるが特に水平変位量 k に関しては、載圧線荷重に強い関係を一般的な関係が見られる。尤 k においても長と同様な関係にあることがわかっている。この様に、 k の値が、載圧等効に關係した各々の要素とある相関関係を示す



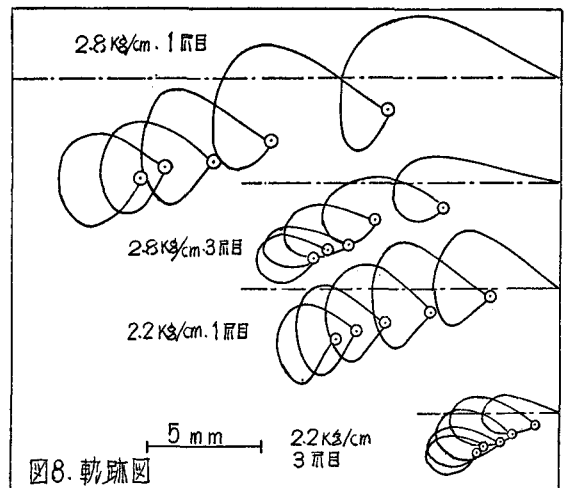
ことは、軟圧挙動の一般的パターンへの波動論的アプローチとしてみられ、近似式の有意義性を示すものであろう。

次に、近似式中の係数について検討してみる。係数は波動における振幅に関係した値であり、パターンにおいては最大隆起量、最大沈下量などから求まる波高に関係した値となるだろう。近似式において、量的の大きさから見て、オーソ交項の係数(④式中の α_1 に相当する。)の値が大きく、それだけ波形に及ぼす影響大と思われる。そこで α_1 と軟圧回数、主隙率、鉛直変位量、水平変位量、最大隆起量、最大沈下量との関係を図7-1から図7-6までの図面上で検討してみる。係数値は、軟圧回数とともに減少傾向にあり、軟圧が進むにつれ波高が低くなり、混合物の締め固め度が増加することと意味するのだろう。係数値は他の要素とも図に示す様に正の相関関係にあり、特に最大沈下量においてはその傾向が顕著である。以上の様に α_1 は、 δ とは逆の関係にあるが、軟圧挙動の評価上、大切な因子となる様に考えられる。



3-2 軟圧におけるミクロ的挙動

軟圧挙動における一般的パターンとマクロ的挙動とを比較検討してきたが、アスファルト混合物の微小要素としてみられる供試体側面に打ち込んだピン挙動をミクロ的挙動としてみ検討してみる。ローラ進行とともに微小要素は図8の様に、変形したスパイラルのごとき軌跡を描いて移動し、その位置は斜め方向に直線的に変化していく。この軌跡が締め固め度と関係した要素と見て、量的な面から軌跡によって与えられる面積値と、質的な面から軌跡の偏平度値ととり、面々の値が空隙率などの値とある相関関係を示すことから、締め固め効果を表わす特性値として採用できよう。



ることがわかった。

次にミクロ的要素のひとつとして、転圧に伴う材料の回転運動について考えみる。従来より、転圧効果の要素として、鉛直及び水平面方向の変位として回転ということば述べられてきたが、回転運動を確認する様子が図9報告は木片発表されていらい様に見える。本報告では、その回転運動を確認すべく、次の様子を解析を試みた。

供試体側面上、任意の点のピンによって構成される直角二等辺三角形の要素を考え、その長辺と水平面とのなす角度を転圧行程におい測定した。図9に木片の横軸にローラーと三角形要素の距離と、縦軸に長辺と水平面のなす角度をとると、ローラー進行とともに角度は増加し最大値にいたる。さらにローラーが接近すると角度は減少し始め、ローラーが三角形の直上付近にきたると最小値をとり、さらにローラーが通過すると角度は再び増加する傾向を示すのである。この角度は転圧回数に従い、減少の傾向があり、増加・減少・増加の程度も徐々に減衰する様である。この様に三角形の微小要素が角度変化をすることは、完全なものではないが、アスファルト混合物の転圧効果として回転運動を確認でき天候に考えられる。転圧効果をミクロ的にみると、スパイラルの如き軌跡と不完全な回転運動とが、一度地球の自転と公転の関係の様に組み合わさった形で行なわれることがわかった。

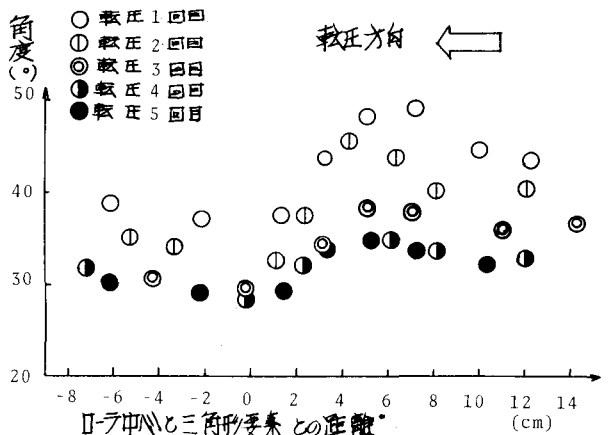


図9. 回転運動

4. 結 語

転圧時のアスファルト混合物の効果をマクロ的及びミクロ的観点から考察し、次の事を結論づけられると考える。

1. 転圧効果をマクロ的に見ると、1種の進行波としてみることができ、そのパターンは正弦波と乗波の組み合わせとして、その複雑な形状を表現できる様である。
2. ミクロ的にみると、混合物は転圧荷重の効果により変形状スパイラルの如き軌跡に沿って移動すると考えられる。
3. 更にこの混合物は、移動において回転を伴うことが認められる。
4. 結局め効果は上記3種の運動の組み合わせによって表現でき、これらの複雑な運動が、併に言われるところの *Kneading Action* とする要因と考えられる。

なお、本報告は、結局め効果を概念的に把握したものであり、各種条件下の測定を通じて、各種の数値をもつ物理的意義について、更に検討を加える予定である。

(参考文献)

1. 「アスファルト混合物の転圧性状について」 新田 登 (石油学会誌才に巻六号に発表)
2. 「瀝青学」 中野 義人
3. 「転圧荷重下におけるアスファルト混合物の変形」 新沼正博、新田登 (土木学会才30周年次講演会発表)