

アスファルト混合物の締固め過程に関する一考察

室蘭工業大学 学生員 ○石川 徹
 室蘭工業大学 正員 新田 登
 室蘭工業大学 学生員 後藤 修

I はじめに

道路の建設及び維持修理にアスファルトを利用することによって得られる便益はいろいろ考えられるが、これらの便益はすべてアスファルト混合物が十分に締固められてはじめて得られるものである。特に最近のように交通量、交通荷重の増大が著しくなると、締固めは重要な要求の一つとして考えなければならない。

しかるに、現場におけるローラー転圧現象は種々の影響を受けて極めて複雑な挙動を示し、その機構の解明を困難にしている。このような状態の中で、配合設計に用いられる混合物の供試体はその機構が現場転圧とは全く異なる方法を作られ、締固め密度もこれを基準にして管理されており、極めて便宜的に取扱われている。

このような問題を解消し、合理的な締固め法を確立するためには、ローラー転圧による締固め過程を把握することが必要であり、その結果に基づいて締固めの管理基準が必要である。

このような事から本報告では、締固めの効果に関する内的条件であるアスファルト混合物の性質、換言すれば締固め抵抗を力学試験から求め、一先、外的条件としてローラー荷重、転圧速度ととりあげ、それが締固め挙動におよぼす影響を試作レク小型模型ローラーを用いて実験的に検討し、両者の関係を対比しはかりローラー転圧時の締固め過程に対する考察を試みるものである。

II アスファルト混合物の締固め抵抗

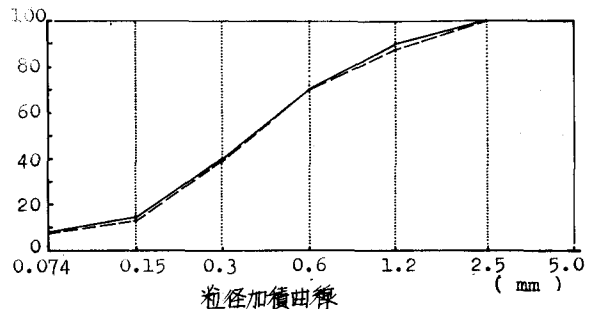
アスファルトペーパで敷ならされた混合物の空隙率はほぼ15%前後になるといわれ、締固め過程はこの空隙率を上げ時空隙率約3%前後まで低減する過程であり、これに密度低下によるアスファルト粘度の増大と相従って次第に締固め抵抗が増大することになる。このような施工時特に転圧時のようにクルーズかつ低粘度の状態にある混合物の力学試験は供試体の成型上普通

に用いられている試験法を用いて得ない為、試作レク目録円筒型のせん断試験装置を用いてその力学性状を評価した。

II-1 混合物配合と実験条件

締固め荷重による混合物の移動は基本的にアスファルトモルタル部分の移動に支配され、粗骨材はモルタル部分と共に動き、空隙率の減少によって粗骨材相互の干渉がはじまり締固め抵抗の増加に寄与するといふ考えから、まず次のごとく粘度配合のアスファルトモルタルを対象とした。

実験装置は外円筒を回転させる同軸2重円筒型のせん断装置であり、アスファルト粘度を $10^1 \sim 10^4$ ポアズの範囲で6段階に、供試体空隙率を6~18%の範囲で変化させ、角ひすみ速度は $0.012 \sim 0.065 \text{ sec}^{-1}$ の範囲で5段階に変化させて実験を行った。



II-2 せん断強度について

① せん断強度と空隙率の関係

図-1に示されているように、 $\gamma-\delta$ 曲線がピークがある場合にはピーク時のせん断応力、ピークが不明瞭な場合には曲線変化が小さくなる点のせん断応力をせん断強度としてこれと空隙率の関係をプロットしたのが図-2である。空隙率が減少するにつれて、せん断強度は増大するが空隙率11%付近でせん断強度が急激に増大する。これは混合物がLooseな状態からdenseな状態に移る過程において、骨材の噛み合

のせん断抵抗が連続的に増大するのではなくて不連続に増大することを意味し、その境界が空隙率11%付近であると推測される。

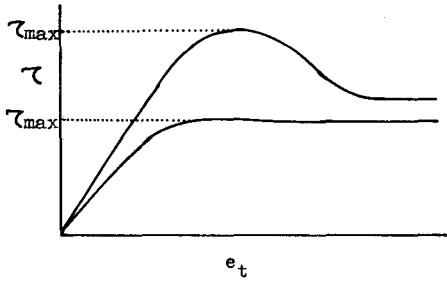


図-1 せん断強度とせん断ひずみの関係

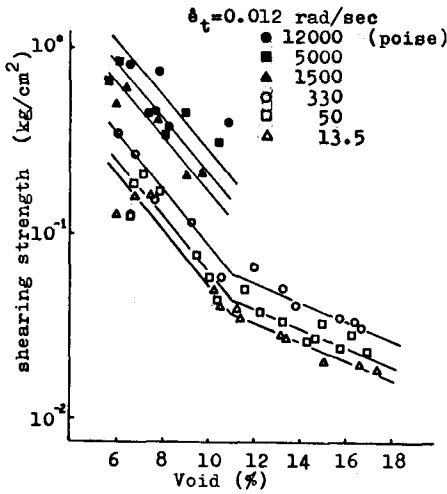


図-2 せん断強度と空隙率の関係

②せん断強度とアスファルト粘度の関係

図-3に示されているようにアスファルト粘度が増大するにつれて、せん断強度は増大するが、330~1500 Poiseの間で増加の割合に变化がみられる。

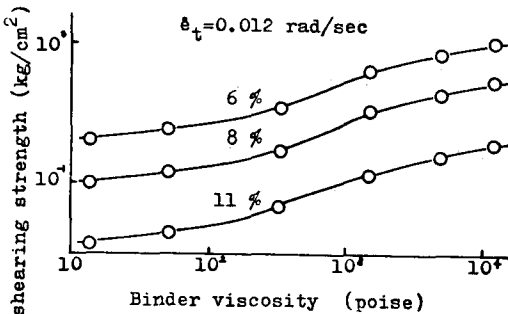


図-3 せん断強度とアスファルト粘度の関係

③せん断強度とひずみ速度の関係

図-4、図-5は γ_{max} とひずみ速度の関係とアスファルト粘度と空隙率をパラメータとして、ホレックスのひずみ速度が大きくなるにつれて γ_{max} は直線的に増大し、その割合はアスファルト粘度が高く空隙率が低くなるほど大きい。13.5, 50 poiseではひずみ速度の影響割合に变化はない。また試験温度20℃で密にサンドシート、アスコンを対象として三軸圧縮せん断試験において、 $\gamma - d\epsilon/dt$ は直線的関係があるとの報告があることから、この比例関係は、比較的広範囲な混合物の状態に対して言えると思われる。

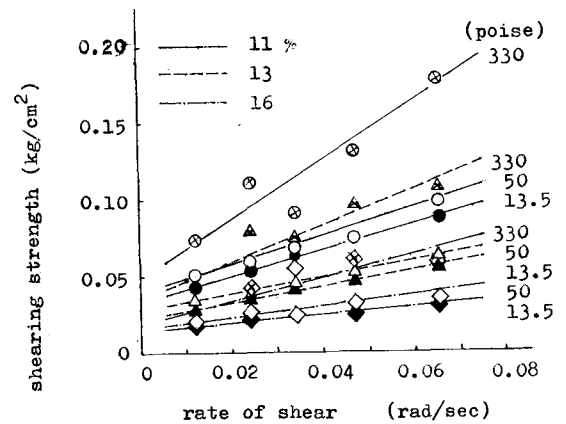


図-4 せん断強度とひずみ速度の関係

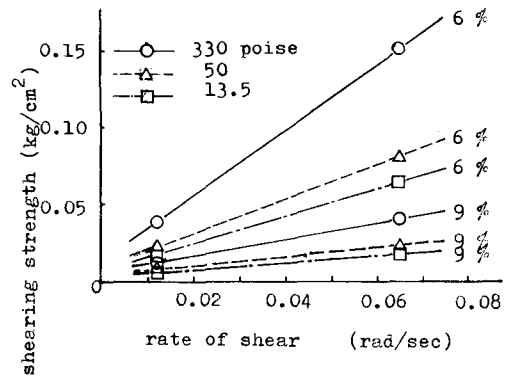


図-5 せん断強度とひずみ速度の関係

④ Mass Viscosityと初期抵抗について

軟圧時の如き高温でかつ高空隙率のアスファルト混合物の特性に mass viscosity (η_m) と初期抵抗 (τ_e) の概念を導入し、軟圧性状を解析する上で η_m , τ_e を定量的に得ることが必要である。 η_m とはアスファルト混合物とし

ての粘度を表わすものであり、Nijboerが三軸試験の結果より $\gamma = \eta_m \cdot \frac{d\dot{\epsilon}_t}{dt} + \eta_e$ の関係を示している。本実験においても図-4より γ_{max} と $\dot{\epsilon}_t$ とが直線的関係が得られることから differential viscosity of mass としての η_m を直線勾配で表わすことができる。図-5で示される γ_{max} と $\dot{\epsilon}_t$ の関係は空隙率6~10%でも直線的になると仮定した。 η_e は、混合物のもつ内部抵抗であり、ひずみ速度に影響されないものである。図-4, 5の $\dot{\epsilon}_t = 0$ のときのせん断強度が初期抵抗 η_e として得られる。 η_m , η_e ともにアスファルト粘度 (η_0), 空隙率及び骨材体積率 (C_v) によって決定されるものである。

i) Mass Viscosityに関する実験式

空隙率約3%の混合物に適用される Heukelom の式を参考にし、修正時の混合物についても適用できる実験式を得ようと試みた。空隙率の影響を加味するため骨材体積率 (C_v) を $C_v' = C_v / (1 + \text{Void})$ とし $K = C_v' / (1 - C_v')$ において $(\eta_m / \eta_0)^{1/n} = 1 + \alpha K / n$ から実験値を代入し n を算出した。 α は n を処理し易いように K 15と定めた。

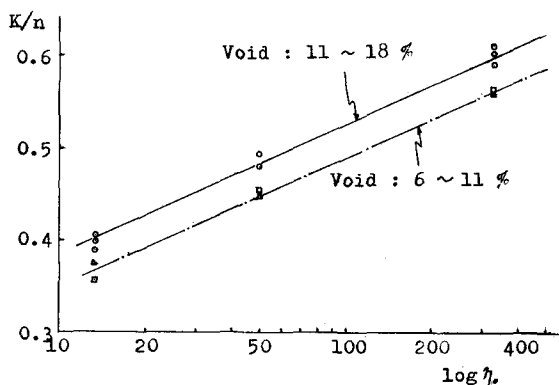


図-6 K/n とアスファルト粘度の関係

図-6は実験値から得た K/n とアスファルト粘度 (η_0) との関係に K をパラメータとして示したものであるが、空隙率6~11%と11~18%で2つの直線とはって表われている。これは図-2に示されるように、空隙率11%において骨材のかみ合い抵抗が増大するに起因するものと考えられ、 $C_v' = C_v / (1 + \beta(\text{Void}))$ とし6~11%では $\beta = 0.8$, 11~18%では $\beta = 1$ と空隙率の影響を変えらることで1つの直線として処理し得ると思われる。Heukelomの式は、空隙率約3%の状態に適用できるもので空隙率の影響はない。 β が低空隙率になる程、小さい値を

取るのはその K である。従って実験式は次のようになる。

$$\frac{\eta_m}{\eta_0} = (1 + 15 \cdot \frac{K}{n})^n, \quad n = \frac{7.14 K}{\log 51.8\%}$$

$$K = \frac{C_v'}{1 - C_v'} = \frac{C_v}{1 + \beta(\text{Void}) - C_v}$$

$$\begin{cases} (\text{Void}) \geq 11\% & \beta = 1.0 \\ (\text{Void}) < 11\% & \beta = 0.8 \end{cases}$$

これをグラフに示したのが図-7, 8であり実験値とかなり一致している。

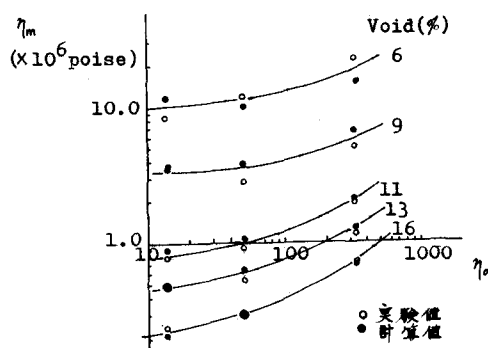


図-7 η_m と η_0 との関係

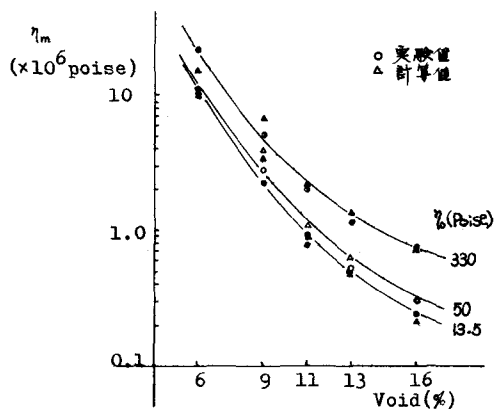


図-8 η_m と Void の関係

図-7より η_m は高空隙率程アスファルト粘度の影響を大きくうける空隙率になるに従いそれほど依存しなくなる。また図-8より低空隙率程空隙率の依存性が大きい。ここで $\gamma_{max} = \eta_m \cdot \dot{\epsilon}_t + \eta_e$ の関係と考慮すると、図-2, 図-3の γ_{max} - Void の関係, γ_{max} - $\dot{\epsilon}_t$ の関係の特徴をそのまま η_m で表わすことができる。

ii) 初期抵抗に関する実験式

図-4, 5より得られる η_e とアスファルト粘度 (η_0)

との関係を空隙率をパラメータとしてグラフに示すと図-9のようになる。

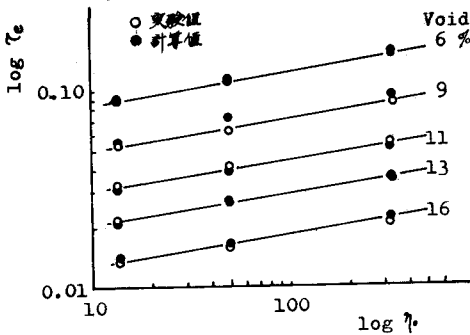


図-9 初期抵抗とアスファルト粘度の関係

このグラフより空隙率一定の場合 η_e と η_0 の増加率は等しく、その比は空隙率には無関係であることから次の実験式が得られ、

$$\log \eta_e = 0.136 \log \eta_0 - a$$

a は空隙率と骨材体積率とで決定されると考えられるから η_m の実験式で述べた K との関係はグラフに示すと図-10のようになる。

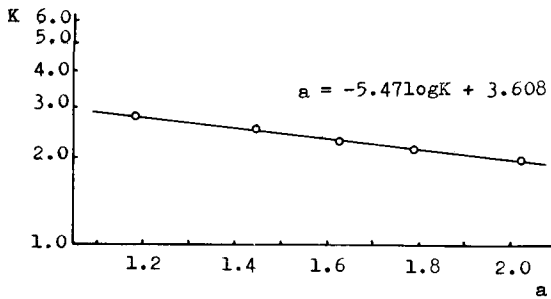


図-10 K と a との関係

従って K と a には、一定の関係があり次の式が得られ、

$$a = -5.47 \log K + 3.608$$

以上の結果から初期抵抗 η_0 は次の式のようなになる。

$$\eta_0 = \frac{K^{5.47} \cdot \eta_e^{0.136}}{4.06 \times 10^3}$$

これをグラフに示して実験値と比較したのが図-9である。

III 小型模型ローラによる室内実験

車動荷重下での締固め過程において、転圧線荷重と転圧速度の締固め効果 K 及び影響を成すべく小型模型ローラコンパクターを用いて検討した。

II-1 実験要領

実験試料として、骨材粒度配合はせん断試験のものと同じでバインダー含有量 9%。実験方法は小型模型ローラの型枠に試料を詰め、直径 26 cm のローラドラムに回転を与え、一方向転圧を行ない各転圧毎の沈下量を測定した。実験条件は敷きほなし厚さ 7.0 cm 初期空隙率 15%、締固めの粘度 110 poise、転圧線荷重 2.2~4.24 kg/cm、転圧速度を 4.2~12.0 の範囲で 3 段階変化させた。

III-2 締固め効果について

正常の締固め K に対して、転圧層の厚さの変化と空隙率の変化は図-11に示されるように直線的関係があることから各転圧後の空隙率 (A.V.) を次式から算定した。

$$A.V. = I.V. - \frac{I.V. - F.V.}{I.H. - F.H.} (I.H. - A.H.)$$

I.V.: 初期空隙率
F.V.: 最終空隙率
I.H.: 初期厚さ
F.H.: 最終厚さ
A.H.: 各転圧後の厚さ

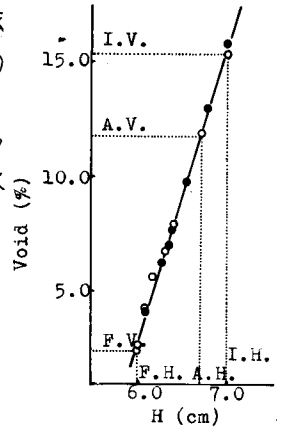


図-11 Void と H の関係

① 転圧線荷重、転圧速度と締固め効果

図-12は転圧速度を一定とし、転圧回数をパラメータとして、空隙率と転圧線荷重の関係を示したものである。同じ転圧回数で転圧線荷重が大きいほど低い空隙率が得られることからこの実験範囲では転圧線荷重が大きい方が締固め効果が大きいと言える。また図-13は転圧線荷重を一定とし、転圧回数をパラメータとして空隙率と転圧速度の関係を示したものである。同じ転圧回数で転圧速度が小さい方が若干低い空隙率が得られるが、あまり速度の影響は顕著に現れてはいない。以上のことから締固め効果に影響を与える要因としては、転圧線荷重が主であり転圧速度は二次的のものであると考えられる。

IV 締固め過程に関する考察

IV-1 締固め過程における締固め抵抗と外力の関係

IIのせん断試験結果から、この種のアスファルト混合物の締固め抵抗は、 η_m と η_e に基づいて $\tau_{max} = \eta_m \dot{\epsilon} + \tau_e$ で表わされ、アスファルト混合物を締固めるには、混合物中

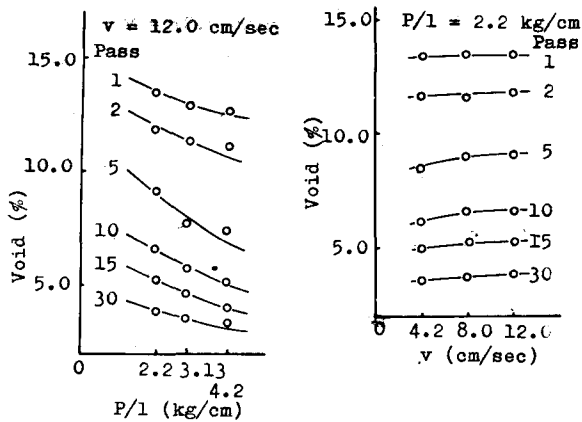


図-12 Void と空疎率の関係 図-13 Void と v の関係

の骨材のかみ合わせ抵抗と骨材間のアスルトラーの粘着力からなる締固め抵抗 (γ_{max}) に打ち勝つだけの力を加えなければ締固めまらばいと考えると、混合物が締固まる条件は混合物に作用する外力 f とすると、 $f \geq \gamma_{max}$ であり $\gamma_{max} = \eta_m \dot{\epsilon}_t + \gamma_e$ から

$$F = \frac{f - \gamma_e}{\eta_m} \cdot \frac{1}{\dot{\epsilon}_t} \geq 1$$

である。 η_m , γ_e は混合物の固有値であると考えられ II より, C_r , η_e , Void から決定される。

混合物を締固めるときに転圧 1 回目で空疎率が $A_0\%$ から $A_1\%$ に変化したとすると、空疎率 $A_0\%$ における締固め抵抗と f の関係は

$$\frac{f - \gamma_{e0}}{\eta_{m0}} \cdot \frac{1}{\dot{\epsilon}_{t0}} \geq 1$$

でありこの時の空疎率 $A_1\%$ における締固め抵抗と f の関係は

$$\frac{f - \gamma_{e1}}{\eta_{m1}} \cdot \frac{1}{\dot{\epsilon}_{t1}} < 1$$

である。次に転圧 2 回目で空疎率 $A_1\%$ から $A_2\%$ に変化したとすると、空疎率 $A_1\%$ における締固め抵抗と f の関係は

$$\frac{f - \gamma_{e1}}{\eta_{m1}} \cdot \frac{1}{\dot{\epsilon}_{t1}} \geq 1$$

であり、この時の空疎率 $A_2\%$ における締固め抵抗と f の関係は

$$\frac{f - \gamma_{e2}}{\eta_{m2}} \cdot \frac{1}{\dot{\epsilon}_{t2}} < 1$$

である。以下同様この関係は混合物の締固めが終了

するまで続いていくことから転圧 i 回目において

$$\frac{f - \gamma_{ei}}{\eta_{mi}} < \dot{\epsilon}_{ti} \leq \frac{f - \gamma_{ei-1}}{\eta_{mi-1}}$$

転圧 $i+1$ 回目において

$$\frac{f - \gamma_{ei+1}}{\eta_{mi+1}} < \dot{\epsilon}_{ti+1} \leq \frac{f - \gamma_{ei}}{\eta_{mi}}$$

...

となり $\dot{\epsilon}_t$ は

$$\dot{\epsilon}_{t0} > \dot{\epsilon}_{t1} > \dots > \dot{\epsilon}_{ti-1} > \dot{\epsilon}_{ti} > \dot{\epsilon}_{ti+1} > \dots$$

で、転圧回数が増大するにつれて減少する。今、転圧 i 回目以降の転圧において空疎率に変化がなくなるとするならば、 $\dot{\epsilon}_t$ は

$$\underbrace{\dot{\epsilon}_{t0} > \dot{\epsilon}_{t1} > \dots > \dot{\epsilon}_{ti-1} > \dot{\epsilon}_{ti}}_{\text{締固めの過程}} = \underbrace{\dot{\epsilon}_{ti+1} > \dots}_{\text{締固めの終了}}$$

となり転圧 i 回目以降の $\dot{\epsilon}_t$ は一定となる。

IV-2

模型ローラ実験によって得られた転圧回数と空疎率の関係を示したものが図-14 である。このデータにおける各転圧回数の混合物の空疎率に対応する η_m , γ_e を II で確立された実験式から求め $f = P/l$ として $\dot{\epsilon}_t$ と n の関係を求める。図-15 は転圧速度、12 cm/sec で転圧標準荷重 2.2 kg/cm, 3.13 kg/cm, 4.24 kg/cm に対する $\dot{\epsilon}_{ti}$ と n の関係を両対数グラフに示したものである。

$\dot{\epsilon}_{ti}$ は $\frac{P/l - \gamma_{ei}}{\eta_m} < \dot{\epsilon}_{ti} \leq \frac{P/l - \gamma_{ei-1}}{\eta_{mi-1}}$ の幅 (図-15

中の各転圧回数の●印と○印の範囲) で与えられる。

グラフより転圧回数 2-10 回の範囲で、転圧標準荷重 2.2 kg/cm, 3.13 kg/cm, 4.24 kg/cm の 3 条件を満足

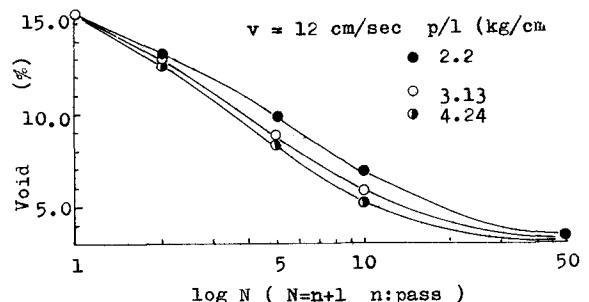


図-14 転圧回数と空疎率の関係

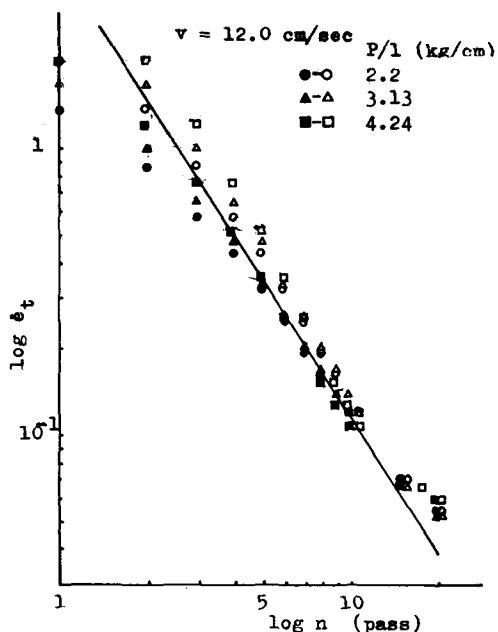


図-15 $\dot{\epsilon}_t$ と n の関係

させるようは $\dot{\epsilon}_t$ と n の関係を直線関係で示すと、

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{4.5}{n^{1.58}}$$

が得られる。しかし、締固めが終了するにつれて

$$\frac{Pl - \gamma_{ci}}{\eta_{mi}} \text{ は } \dot{\epsilon}_0 = \frac{4.5}{n^{1.58}} \text{ の直線から次第に逸脱}$$

していく。次に

$$F_i = \frac{Pl - \gamma_{ci}}{\eta_{mi}} \cdot \frac{n^{1.58}}{4.5}$$

に各転圧後の η_m , γ_c を代入して F_i を求め F_i と i の関係とグラフに示すと図-16になる。

このグラフから $i=16$ 以上で F_i が急増する。その時

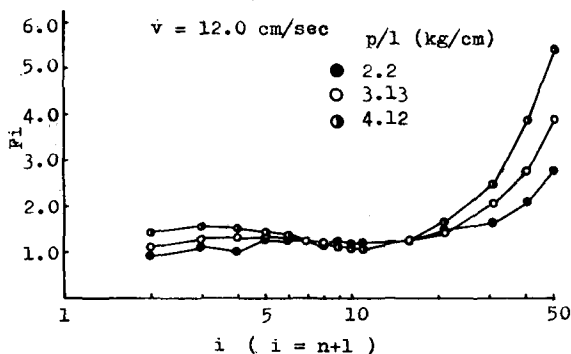


図-16 F_i と i の関係

$F_i=1.2$ となり F_i 値は固定化される。従って F_i を捉えることにより締固め抵抗とローラ荷重、転圧回数との関連性を見出すことができそうである。

V あとがき

アスファルト舗装の締固め研究の一環として、アスファルト粘度、空隙率等を広範囲に変化させた場合のせん断試験の結果からアスファルト混合物の固有値である、 η_m , γ_c を定量化し、締固めの過程における混合物の挙動を知る一手段とすることが可能と思われる。

すなわち、締固めによる空隙率の減少に伴う、 η_m , γ_c の変化を知るによりローラ荷重や転圧回数等を、加味して考えることで締固め抵抗に関する解析が可能であると思われる。今後せん断及び転圧試験条件を広範囲に取ることにより、締固め過程の解析を確立していくと考えている。