

繰返し荷重による粒状体の構造変化

小西 純一*

(昭和46年5月31日受理)

1. 緒 言

鉄道軌道における道床は、普通、砂利、碎石などの粒状材料によって構成されており、まくらぎを支持して、荷重を路盤に広く伝達する機能を有している。このような道床は、列車通過に伴う衝撃的な繰返し荷重を受けて、塑性的な変形を重ね、その結果、まくらぎは次第に沈下してゆく。

まくらぎ沈下の実測例を図一1に示す。(a)は実際の線路における実測例、(b)は(a)の道床と同じ碎石とまくらぎを、室内での軌道振動試験に供した結果の一例である⁸⁾。いずれの場合も、まくらぎ沈下は初期に大きく、その後次第に小さくなって、時間一沈下曲線は、一定の傾きをもつ直線に近づいてゆくような傾向がある。

佐藤⁷⁾によれば、まくらぎ沈下量 y は、荷重繰返し数を x として

$$y = \gamma(1 - \exp(-\alpha x)) + \beta x \quad (1)$$

なる実験式で表わすことができる。ただし α 、 β 、 γ は実験定数である。この式の第1項は、道床粒間の空隙が、次第に小さくなり、かつ、平均化される過程を表わし、第2項は、まくらぎ下の粒子が側方に移動してゆく過程を表わしていると説明されている。

道床においては、一般に、まくらぎとまくらぎの間や肩の部分など、直接、荷重を受けない部分があり、まくらぎ直下の部分を考えて、横方向のひずみを許した、不完全拘束状態となっている。そのため、沈下はある一定値に落ち着くとは限らず、長期にわたり少しずつ進行することが多い。

ところで、いま述べた、まくらぎ沈下量というのは、目に見える、いわばマクロな量である。マクロな量を生ぜしめるマクロな挙動は、粒子1つ、1つの挙動、いわばミクロな挙動の集積として、現われてくるものである。

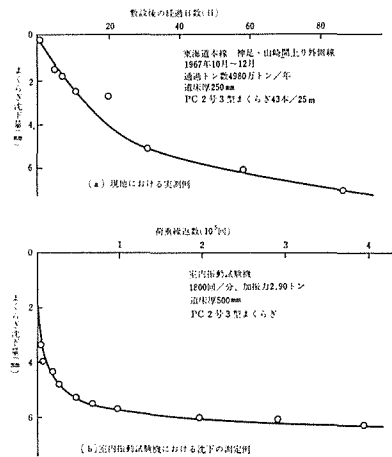


図1 まくら木沈下の実測例

* 土木工学教室 助手

ただし、道床の場合は、砂と構造物との関係と異なり、碎石の大きさと構造物であるまくらぎの大きさ、層の厚さなどとの比が比較的小さく、マイクロ量が統計量となりにくいのである。

粒状体の力学的性質は、粒子自身の性質（材質、粒度組成、形状、表面状態など）と粒子の集合状態すなわち構造とによって決定される考えられる。また後者はかなりの程度前者に支配される。粒状体が外力を受けて変形する場合に、粒子の破碎が生じなければ、粒子自身の諸性質はほとんど変化しない。変化するのは粒子の集合状態（構造）である。このような構造を表わすパラメーターとして重要なのは、粒子相互の接触角、間隙比および間隙比の分布などであろう。

粒状体の変形をマイクロな観察に基づいて論じる試みは、多くの研究者によってなされてきた。たとえば Rowe⁵⁾⁶⁾ は等大球の規則配列の変形を粒子相互のすべりの機構と最小エネルギー規準を仮定することによって、いわゆる応力・ダイレイタンスー式として表わし、これを一般の粒状体に拡張した。村山ら⁴⁾ は粒状体のせん断抵抗やダイレイタンスーを、せん断面付近の粒子相互間の接触角の変化から説明している。一方最上²⁾³⁾ は、粒状体の状態は間隙比と間隙比の場所的な偏差によって表わされるとし、統計的手法によって、粒状体の破壊を論じた。これらの諸研究はいずれも主として粒状体の破壊時の挙動に重点が置かれており、それに至るまでの、いわば過渡的な過程についてはあまり触れられていない。また繰返し荷重による変形過程についての研究は少ない。

この研究においては、先に述べたような、粒径に比して層厚があまり大きくない粒状体層に繰返し荷重が作用した場合の変形とその構造変化について、二次元模型実験によって把握しようと試みた。

2. 実験方法

本研究においては、粒状体内部の観察を容易にするため、二次元モデルを採用した。粒子形状は、作製と解析上の制約から、円形断面とし、直径 9 mm および 3 mm、長さ 90 mm の鋼棒を用いた。これらのうち、直径 9 mm の鋼棒の断面には多少の凹凸がある。粒度としては直径 9 mm の鋼棒のみの場合と、直径 9 mm を 10 本に対し直径 3 mm を 20 本の

割合で混合した場合の 2 種類である。

このような鋼棒を積み上げて、二次元粒状体をつくるのであるが、このようなモデルによって、果してどの程度、実際の道床などの挙動を再現できるかが問題となろう。本実験で得られた沈下曲線と、図 1 に示した実測例がほぼ同様の傾向を示すことからみて、少なくとも定性的には粒状体としての挙動を表わし得ると考えている。

図一 2 に実験装置を示した。幅 500

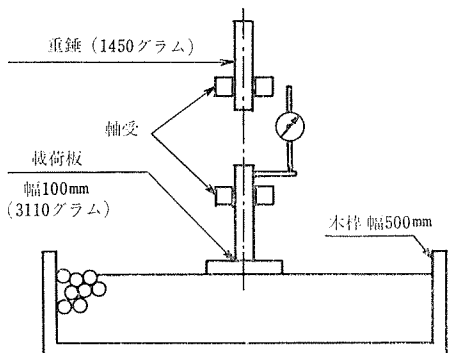


図 2 実験装置

mmの木枠の中に、上述の鋼棒を配列ができるだけ不規則になるように積み上げ、層厚が約95mmまたは約150mmとなるようにした。

その上に、幅100mm、厚さ19mm、重量3110g、の載荷板（これに取付けた軸により、上下方向にのみ可動）を置き、これに落錘

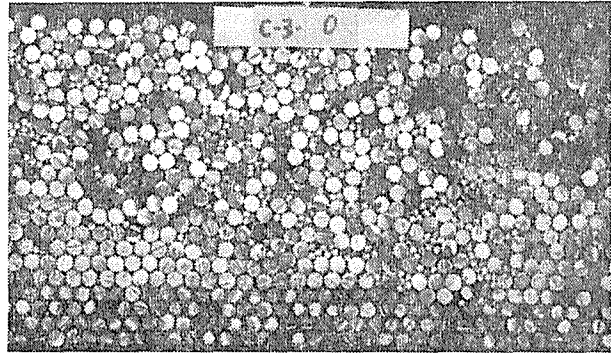


図3 鋼棒積層体(載荷前)

による衝撃荷重（重錘の重量1450g、落下高さ100mm）を加える。そのつど、載荷板の沈下量をダイヤルゲージによって測定し、同時に、正面から写真を撮っておく。図-3に初期状態における粒状体層の一例を示す。

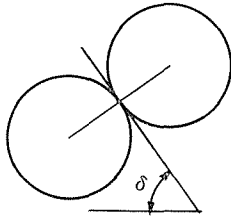


図4 粒子接触角

粒子の変位、各部の間隙比、粒子接触角などを求めるため、撮影した写真を大きく引伸す。各荷重段階の印画を重ね合わせることにより、粒子の変位がベクトルの的に求められる。図-4に示したように、粒子と粒子の接触点における接線が水平面となす角を粒子接触角と定義すれば、これは写真上で直ちに測定できる。また粒状体各部の間隙比は、層の中心部を図-5のように分割し、各分割区域内にある粒子部分と、間隙部分の面積を求めることにより計算される。

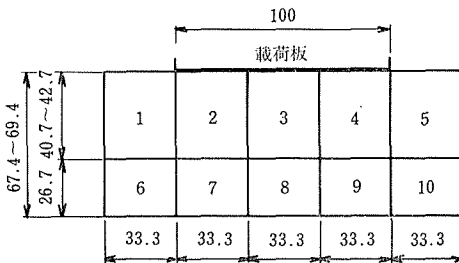


図5 間隙比を求めるための層の分割

3. 実験結果とその考察

1) 沈下曲線と粒子の動き

載荷回数-載荷板沈下量曲線を図-6に示す。単一粒径の場合と混合粒径の場合とでその傾向はかなり異なっている。単一粒径の場合にははじめの数回で大きく沈下してしまい、その後は少しずつ沈下してゆく。実験時の観察によれば、はじめの数回で、不規則な粒子配列から、規則的な六角形配列に近いものに、ほぼ再配列が行なわれてしまうようである。これに対して混合粒径の場合は、単一粒径の場合よりもなめらかな曲線を描いて沈下が進行してゆく。また、粒子の動きを矢印の連なりで示したのが図

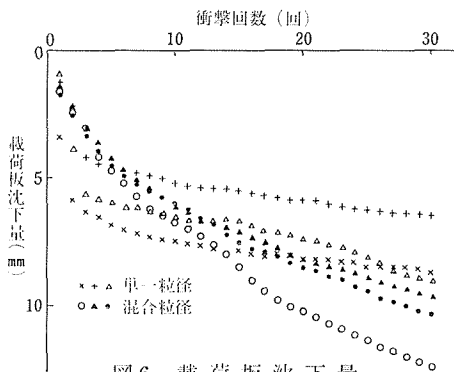


図6 載荷板沈下量

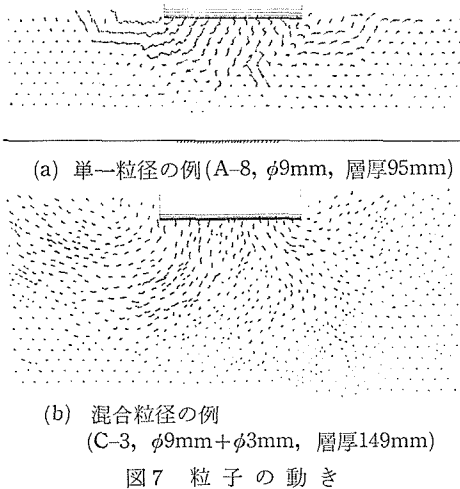


図7 粒子の動き

一7である。(a)が単一粒径の場合で、大きく動いた粒子とほとんど動かない粒子との別が比較的是っきりしており、両者の粒子群の間にすべり線が認められる。それは載荷板の両側において著しい。また骨格構造が基本的には六角形配列であるので、粒子の移動は鉛直軸に対して 30° の方向と水平方向が目立っており、大きい間隙を含んだ骨格が順次崩壊して、その上側にある粒子が急に大きく移動しているのがみられる。

(b)は、混合粒径の場合であるが、粒子の移動は、載荷板を中心にした放射状のなめらかな曲線に沿うようにして行なわれ、

すべり線とみなせるような境界は判然とはしていない。

単一粒径の場合よりは2種の混合粒径の場合の方が、実際の道床あるいは砂地盤の挙動に近いと考えられるので、以後の解析では、後者を中心に議論を進めることにしたい。

2) 粒子の移動方向について

荷重を加えると、図一7に示したように、粒子は移動するのであるが、その移動方向の分布が、荷重段階でどのように変化するかを知るため、図一8 (a) に示したような載荷板

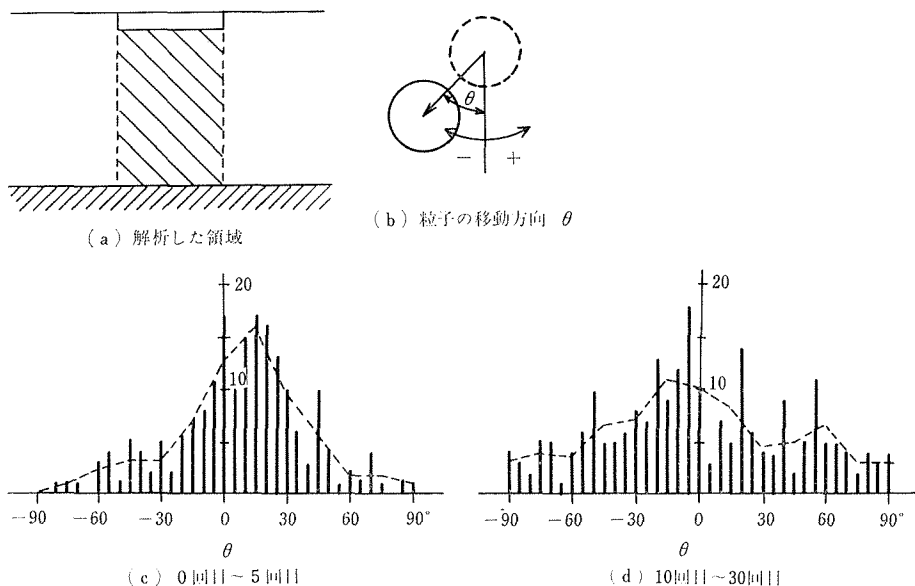


図8 粒子の移動方向の頻度分布

下方の領域内の粒子の移動方向 θ (同図(b)参照) の分布を求めた。(c)は荷重0回から5回の間、(d)は10回から30回間の移動方向の分布である。なお 90° 以上(上向き)の角度で動く粒子も数個あったが、この図には表わさなかった。これらの頻度曲線は、0~5回では $+15^\circ$ 付近を中心に比較的小さい角度に集中しており、10~30回ではピークが低くなって、ゆるやかである。このことは、初期段階では、粒子が下方へ移動し、粒状体は圧縮され、その後は側方への移動が相対的に多くなって、せん断ないしは流動過程に入ることを示している。

a) 粒子接触角

図-9は、図-4で定義した粒子接触角 δ の頻度分布を、載荷前、5回目、10回目、30回目について示したものである。これらの図の上半分は接触角がある角度を中心にした 5° の範囲 (たとえば 0° の場合 $-2.5^\circ < \delta \leq 2.5^\circ$)、下半分は 15° の範囲に入っている接点の数を半径としてとり、順次直線でつないだものであり、 0° の軸または 90° の軸に関して対称性を仮定し、 $0^\circ \sim 90^\circ$ と $0^\circ \sim -90^\circ$ の各角度の値を加えて、サンプル数を増した。Wiendieck⁸⁾ になって、下半分の7点を用い、最小二乗法によって、非等方性を示す楕円を描いたものをあわせて示してある。

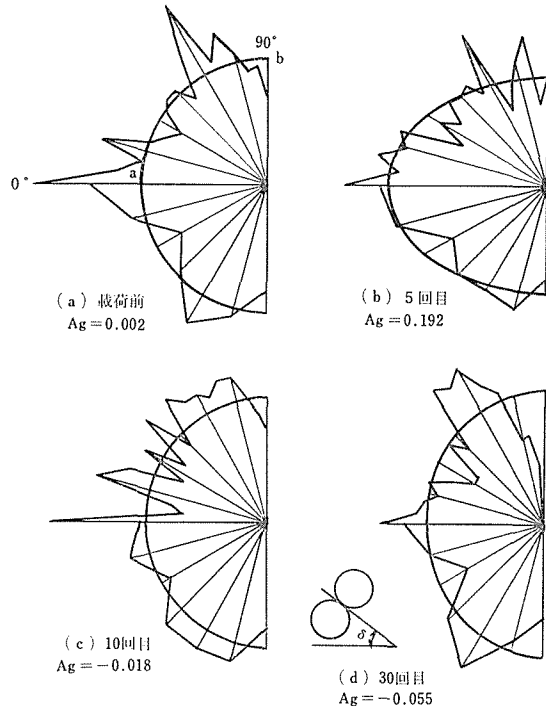


図9 粒子接触角の頻度分布

Wiendieck によれば、粒状体の幾何学的非等方性は、粒子接触角の頻度分布から作図した楕円の 0° の軸 (横軸) 方向の半径を a 、 90° の軸 (縦軸) 方向の半径を b とすると。

$$A_g = \frac{a - b}{a + b} \quad (2)$$

で表わされる。

図-9には、図の下半分の7点を用い、最小二乗法によって、楕円を描いたものを、あわせて示した。また(2)式の A_g の値も記した。

載荷前の頻度分布は 0° と 60° に高いピークがある。5回目では著しいピークは 0° のみとなり、10回目では 0° 付近のピークは弱くなって 60° 付近が高くなり、さらに30回目ではその傾向が強くなる。これは初期段階においては、粒子の下方への移動が卓越しており、水平に近い接触面が増加するが、圧縮が進むと次第に横方向の接触が増し、粒子の横方向

の移動もふえてくるものと考えられ、上述の移動方向の分布と対応している。

本実験で得られた頻度分布は、粒子形状が円形であり、粒径が2種のみの混合であるため、 0° と 60° に規則性のなごりが、かなり強く現われている。しかし、多種類の径の粒子を混ぜることにより、また、粒子形状を不規則にすればするほど凹凸が減って、楕円に近くなることは、Wiendieck が述べているとおりであろう。本実験の場合、図のような楕円で置きかえることには問題が多いが、 A_g の値が、載荷前に正で、繰返し載荷後に負に変化する点は Wiendieck の実験と一致している。

b) 間隙比

図-10は、2で述べたように、粒状体層を図-5に示すように10部分に分割し、その各部の間隙比を、載荷回数に対してプロットしたものの代表例であって、沈下量をもあわせて示した。(a)は単一粒径の場合、(b)は混合の場合である。間隙比は最初の数回で急に減少して最小値に達した後、平均的には、むしろ少し大きくなるか、一定の値を保つ。この傾向は、いずれの粒度の場合にも現われる。また、場所的な布についてみると、最初はかなりの幅をもって分布しているが、一旦分布の幅は小さくなり、平均値が一定値となる

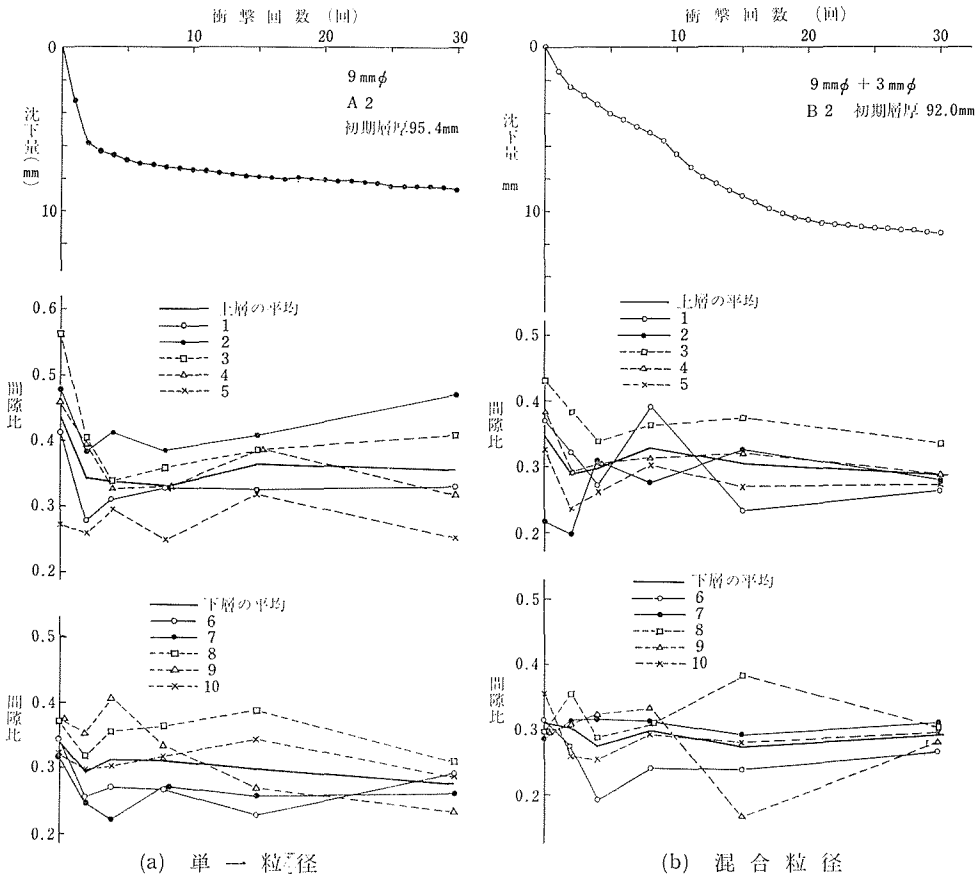


図10 間隙比の変化

あたりでは、再び幅が大きくなる傾向がみられる。これは a), b) で述べた、粒子の移動方向分布や粒子接触角分布とある程度対応している。

しかし、ここで行なった間隙比の求め方については、粒径、層厚と分割部分の大きさの兼ね合い、分割数が少ないことなど、今後の問題を残している。

c) 粒状体の変形の進み方について

これまで、繰返し荷重によって、粒子接触角の分布、粒子移動方向の分布、間隙比などがどのように変化するかをみてきたが、ここでマクロな量である載荷板の沈下量との関連性について考えてみる。

図一六の載荷板沈下曲線を見ると、初期に大きく沈下し、その後ゆるやかになって定常状態に達することがわかる。初期においては、粒子の移動方向の分布は、小さい I に集中しており、下方への移動が多く、粒子接触角の分布は、水平方向が多くなる。また間隙比は減少しかつ平均化される傾向にある。すなわち初期の段階では粒状体は、まず圧縮される。次いで、沈下曲線の傾きは小さくなるが、この段階においては、粒子の移動方向はかなり平均化され、側方へ移動しようとする粒子も増大し、接触角の分布は水平方向よりもたて方向に近い角度が多くなってくる。また間隙比は最小値よりも多少大きくなり、その偏差も大きくなる傾向にある。また載荷板の両側の表面は盛り上ってくる。

このような過程を砂の三軸試験と対応させてみると、初期の圧縮に対応するのは図一11において、ダイレイタンスが負の①の区間でありその後の過程が②に対応すると考えることができる。初期の圧縮過程は、粒子のつまり方によってはほとんど現れない場合も考えられる。

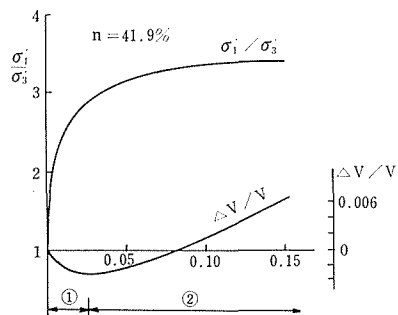


図11 砂の三軸試験結果
(Rowe による⁵⁾)

4. 結 言

この研究では、道床のような粒状体に繰返し荷重が作用した場合の変形について、2次元模型実験を用いて、微視的な観点からの考察を試みた。

粒状体の構造を表わす基本要素として、粒子接触角と間隙比をとり上げ、粒状体の変形が、構造の変化と密接なつながりを持ち、2つの様相の異なる過程に分けて考えることができることを明かにした。すなわち初期の過程においては、粒子は下方へ移動するものが多く、それら相互の接触面は水平に近いものがふえ、間隙比は平均化されつつ減少する。このときの載荷板沈下量は大きい。このようにして、ある程度密度が増大すると、側方の粒子との接触が次第に多くなり、側方への移動が増し、移動方向の分布は平均化される。間隙比は最小値よりもやや大きくなり、沈下は定常的にゆるやかに進行する。

なお、この研究では、変形のみを取り扱って、力学的な面からのアプローチが欠けてい

る。力と変形との関係をとらえるため、光弾性材料で作製した粒子を用いて、2軸圧縮試験を行なう予定であり、また粒度、粒子形状についての検討も行なって、次の機会に発表したい。

なお、この研究の実験は、筆者が京都大学大学院在学中に、交通土木工学教室後藤尚男教授のご指導のもとに行なったものである。終始、暖かいご指導、ご鞭達をいただいた後藤教授ならびに実験に協力していただいた、京阪神急行電鉄（当時京都大学学生）角道正士君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 後藤尚男・小西純一 (1969). 衝撃荷重による粒状体の沈下について, 土木学会第24回年次学術講演会講演集 3, 59-62.
- 2) Mogami, T. (1965). A statistical approach to the mechanics of granular materials. *Soil and Foundation*, 5, no.2, 26-36.
- 3) 最上武雄 (1969). 粒状体の力学, 最上武雄編: 土質力学, 第8章, 893-1036.
- 4) 村山朔郎・松岡元 (1970) 粒状土のせん断抵抗と粒子構造について, 土木学会第25回年次学術講演会講演集 3, 105-108.
- 5) Rowe, P. W. (1962). The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proc. Roy. Soc. London, A*, 269, 500-527.
- 6) Rowe, P. W., L. Barden, I. K. Lee (1964) Energy components during the triaxial cell and direct shear tests. *Géotechnique*, 14, 247-261.
- 7) 佐藤 裕 (1964). 軌道力学, 鉄道現業社, 41-50.
- 8) 鉄道施設協会 (1968). 道床碎石の品質改良に関する研究報告書.
- 8) Wiendieck, K. (1967). Zur Struktur körniger Medien. *Die Bautechnik*, 44, 196-199.

Summary

The Change of the Structure of Granular Materials under Repeated Loadings

Junichi KONISHI

(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

The deformation of an assembly of individual particles mutually in contact when subjected to repeated loading was studied with respect to the change of the structure of the mass.

The two-dimensional model experiment was performed and the particle movement, the angle between interparticle contact plane and horizontal plane and the void ratio were investigated. As the deformation increases under repeated loadings, frequency distributions of the direction of particle movements and of the direction of interparticle contact plane change their shape.

It was found that the deformation process of the granular materials consists of two different stages, i. e. initial compaction process and succeeding flow process.