

乗心地の立場から見た軌道  
高低狂いの整備限度

佐藤吉彦

1. まえがき

鉄道において、レール頭部によって形成される車両走行路をどの程度滑らかに整正するかという問題は、車両走行の安全、乗心地および保守の経済性に関係する固有の重要な問題である。この滑らかさの程度は、レール頭部の軌道横断面および長手方向に関する相対位置からの偏差である軌道狂いによって表わし、これに整備限度を設けることによって規制する。この限度は従来経験的に定めていたが、近年、最近における計測器の進歩と各種理論の発展を背景に、これを科学的手法によりより合理的に定める試みがなされて来た。

軌道整備限度において、列車の走行安全はまれに発生する過大な軌道狂いの整備に 関係して 論ぜられるのに対し、乗心地は、旅客サービスの立場から保守の経済性ととも、軌道狂いの大勢を決定する整備目標値を定めるものである。一方、これら軌道狂いの整正作業において、その 70% を占めているのは高低、水準狂いを整正する軌道のむら直し、総突固め作業であった。

従来わが国において高低狂いという場合には、両側レールの各頭頂面に 10 m 以下の弦を張り、これに対する狂いをとるものとしていたが、これは余りにばく然としているので、実際には 10 m の弦に対するレール頭頂面の正矢をもって高低狂いとしていた。ここで、地上に設けた座標に対する両側レール頭頂面の形状を考えると、これは水準狂いと軌道中心における地上の座標に対する両側レール頭頂面の平均形状(平均絶対高低狂い)によって表わすことができる。これら狂いのうち、水準狂いによる車両の振動はローリングであり、平均絶対高低狂いによるものは上下振動である。経験的に、水準狂いについてはその形状の把握、整正が容易な点からこの論文では、まず、この平均絶対高低狂い(以後これを単に高低狂いと書き、正矢による高低狂いは正矢記録とする)と車両の上下振動の関係について論じ、さらに正矢記録における限度について検討した。

2. 高低狂いの特性と車両モデル

軌道に実在する高低狂いの波長成分については従来そ

の特性が不明であったが、正矢記録において限度  $a_h$  を設けて整正を行なって来た事実と、正矢法の波長別高低狂い検出性能が  $c(\lambda) = 1 - \cos(2\pi L/\lambda)$  ( $\lambda$ : 波長,  $L$ : 弦長の 1/2) である事実から、

$$g_1(\lambda) = \frac{aL}{c(\lambda)} \dots\dots\dots(1)$$

のものが実在可能である。 $L=5\text{m}$  の場合についてこれを図示したのが 図-1 である。さらにこのような波長成分の実在について、長波長領域まで測定できる測定装置を試作して実測し、解析した結果とあわせ考えると、20 m を越える波長領域に存在する 高低狂いの成分はせいぜい波長の 2 乗に比例する程度、実際には 1~1.5 乗に比例する程度であり、これ以下においてはレールの剛性によって漸減することが明らかにされた。

一方、車両のモデルに関しては、従来行なわれた各種研究の結果に加えて十分詳細に検討した結果、 図-2 のモデルをとれば十分であることが明らかにされた。このモデルが従来車両設計の際に考慮されていたモデルと異なる点は、従来のモデルが台車を単なる質量として 2 質量モデルを考えていたのに対し、台車を剛体として 1 質量 1 剛体モデルを考えた点にある。つまり、台車による前後輪軸に与えられた高低狂いの平均効果が、乗心地の

図-1 軌道に実在可能な高低狂い

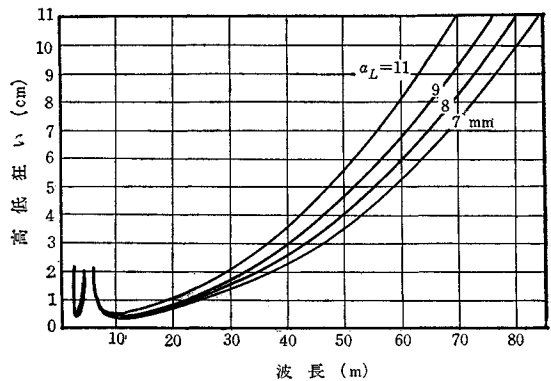
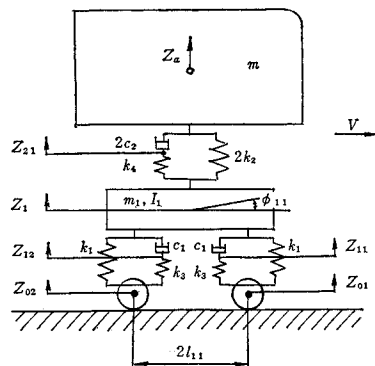


図-2 車両モデル



問題を論ずる際には重要なのである。

### 3. 乗心地から定まる波長別記録限度

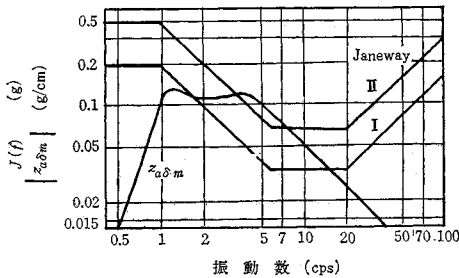
図-2 のモデルで車体に生ずる加速度  $\ddot{Z}_a$  は、ラプラス変換された形で

$$\ddot{z}_a = \ddot{z}_{adm} \cdot \zeta_1 \cdot z_{o1} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\ddot{z}_a - \ddot{Z}_a$  のラプラス変換、 $\ddot{z}_{adm} - 2$  質量モデルにおける高低狂いから車体加速度への伝達関数、 $\zeta_1$  - 台車の高低狂い平均効果、 $z_{o1}$  - ラプラス変換された高低狂い

と表わされる。ここで、ラプラス変換のパラメータ  $S$  を  $S = j\omega_1$  ( $j$  - 虚数単位、 $\omega = 2\pi f$  - 円振動数) とおけば、 $z_{adm}$  は周波数レスポンス関数として求められる。図-2 のモデルで、 $m_1/m = 0.3$ 、 $k_2/k_1 = 0.5$ 、 $\sqrt{2k_1/m} = 11.0$ 、 $2c_1/(m\nu_1) = 0$ 、 $2c_2/(m\nu_1) = 0.686$ 、 $k_3, k_4 \rightarrow \infty$ 、 $2L_{11} = 2.45$  m というよく整備された標準車両を考え、乗心地に関する Janeway の限界 I、II とともにこれを図示したのが 図-3 である。この図と式 (?) から明らかなよ

図-3 車両の特性と乗心地限界



うに、このように乗心地の限界  $J(f)$  が与えられると、軌道に残存が許容される高低狂いの振幅  $g_2(\lambda)$  は、

$$g_2(\lambda) = \frac{J(f)}{|\ddot{z}_{adm}(f)| \cdot |\zeta_1(\lambda)|} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $f = V/\lambda$ 、 $V$  - 走行速度、 $|\zeta_1(\lambda)| = 1/2 \cdot [1 + \cos(2\pi \cdot 2L_{11}/\lambda)]^2 + \sin^2(2\pi \cdot 2L_{11}/\lambda)]^{1/2}$

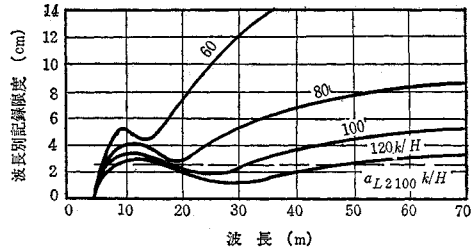
と求められ、正矢記録における波長別の限度として

$$g_3(\lambda) = \frac{C(\lambda) \cdot J(f)}{|\ddot{z}_{adm}(f)| \cdot |\zeta_1(\lambda)|} \dots\dots\dots (4)$$

が与えられることになる。これを波長別記録限度と称する。この限度値を上述の車両について、鉄道車両の乗心地の上限と考えられている限界に対して計算したのが 図-4 である。

この図から、波長別記録限度は波長 10 m 付近では正矢法の検知性能が長いのでかなり上昇して極大値を示すが、20~30 m 付近では検知性能の低下と 図-3 に示した  $\ddot{z}_{adm}$  の 1 cps 付近のピークに対応して低下し、極小点に達したのち、波長の増大とともに今度は  $\ddot{z}_{adm}$  の 1 cps 以下における減少に助けられて漸増し、やがて正矢法の検知性能と平衡して一定値に収れんする様子を見

図-4 正矢記録上における高低狂いの波長別記録限度



ることができる。またこの図から、これら限度は走行速度の上昇ともなつて全体としてきびしくなると同時に、漸次波長無限大における漸近値が低下し、全体としてこの限度は波長に関して漸増傾向から一様化することがわかる。

### 4. 正矢記録における直接の限度

上述の波長別記録限度は、本来無限に連続する sine 形状高低狂いに対するものであるが、これが実用上有する意味を明らかにするために、まず sine 半波形で表わされる同一形状の高低狂いが 1~10 個連続して存在する軌道で、車体に生ずる加速度を過渡応答として計算し、この特性を詳細に検討した。その結果、各速度、各波長における独立波形、連続くり返し波形をもつ高低狂いに対する限度を算定できることとなったが、2 個以上、つまり 1 波長以上同一波長の高低狂いがくり返される場合には、無限に連続する場合とほぼ等しい車体加速度を発生することが明らかにされた。

さらに、乗心地のように統計的な現象を考える場合には、波長別記録限度にある程度の凹凸があつてもこれを一定値で置き換え\*、正矢記録における直接の限度を定めることが可能であると考えられたので、図-4 に示した波長別記録限度の極小点 ( $a_{L1}$ ) とこの波数頻度 (波長の逆数) に関する平均値 ( $a_{L2}$ ) から、種々の車両条件の場合について走行速度に対するこの限度を具体的に検討した。その結果、この限度は、(1) 速度に逆比例して減少し、(2) 固有振動数が増加すると減少し、(3) 軸ばね部と枕ばね部の両方にダンパを付けることにより緩和される、ことが明らかにされた。また、車両特性値の偏差、乗心地の限界および高低狂いの分散の程度を定めることにより、この限度をただちに具体的に定められるように図表を用意してある。

特に東海道新幹線については、その車種が均一であり、その車両特性値が明らかであった点から、その高低狂い整備限度、乗心地および走行速度の関係を具体的に説明し、高低狂いの整正に理論的根拠を与えることができた。

\* 高速における場合。低速では値が大きくなるので実用上問題がない。

## 5. そ の 他

以上のほか、折角を生じている場合のように、軌道に確定した高低狂いが存在することにより車体に生ずる加速度は、式(2)をラプラス逆変換して求めることができるが、前述の標準車両の場合、この加速度の最大値は

$$\dot{Z}_{amax} = \alpha(0.22V - 4.2) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $\dot{Z}_{amax} - (g)$ 、 $\alpha$ -折角(ラジアン)、 $V - (k/H)$ と与えられた。

また式(4)から逆算して、乗心地上必要とされる高低狂いの検知性能は

$$C_n(\lambda) = \frac{|z_{adm}(f)| \cdot |G_1(\lambda)|}{J(f)} \dots \dots \dots (6)$$

と与えられるが、これについて具体的に検討した結果、従来慣用して来た正矢法による高低狂いの測定は、実用上十分な程度に妥当なものであり、従来諸種の意見が述べられていたその弦長については、10m程度が適当であることが明らかにされた。

[筆者：正会員 工博 国鉄鉄道技術研究所]

## 長波のうちあげ高

首 藤 伸 夫

高潮、津波などのいわゆる長波が陸岸の近くに来てどのような振舞をしめすかは、海岸地方の防災上きわめて重要な事柄であるけれども、その説明は必ずしも十分に行なわれているとはいいがたい。対象を特定の地域の、特定の条件にしぼるならば、この問題を解決する方法がないわけではなく、模型実験や、電子計算機を駆使して行なう数値実験によって調べることができる。しかし、この方法によって一般的な性質を論ずるためには、無数の実験を必要とし、良い方法であるとはいえない。

従来、遠浅の湾における長波の変形は、有名なグリーンの定理にならって論じられることが多かったが、この方法の欠点は、汀線より陸側に海水が侵入して来た場合に関しては全く無力であることであった。現象をオイラー流に眺めている以上、水深と波長が同程度になっている場所の運動を一次近似の式で解くことに無理があるため、反射を考慮したとしても、やはり陸岸へのうちあげを解くことができなかつたのである。

この難点を、はじめて克服したのは、キャリヤーとグリーンズパンであった。彼らは、いわゆる非線型浅水波の式を解析的に論ずることに成功し、初期値問題の解を

えたのである。彼らの方法は、しかし、二次元的な問題に限られており、三次元的な問題への見通しは、現在のところ全くみられない。

筆者が試みた解析方法は、いままであまりかえりみられていなかったラグランジュ流の運動の記述を用いる点にその特徴がある。空間の一点に固定して、その点を通りすぎていく運動をのべるオイラー風の記述とはことなり、一つの水粒子とともに動きながら、その運動を調べるのがラグランジュ風な見方である。

ラグランジュ型の式群をつかってといていくにしても、基本となる方程式群を完全な型で解くことはできず、やはり運動はあまり大きくはないと想定して、摂動を施し、こうしてえられた低次の方程式群を解きうるのみである。このとき、長波的な性質は、水粒子の鉛直方向の運動が、水平方向の運動にくらべて小さいということではめされる。静水時に汀線にあった水粒子は、常に海底から離れずに運動し、結局陸岸への最大うちあげ位置は、この水粒子によって実現されることになる。この水粒子に対しても、上記の長波性が保たれていると考えることができるから、一次近似の式においても、オイラー流にといた場合と異なり、汀線付近でも破綻をきたすことがないのである。

筆者の第一近似の式は、面倒な変数変換を経ずしてえられるのであるが、キャリヤー達のえた流速に対する線型の式と同等のものである。キャリヤー達の方法によると、非線型の式に、巧妙なしかし数学的に難解な変数変換を施してのち、解析的に扱いうる式(これが流速に対する線型な式としてえられるのである)をうるのである。後者等の取扱いは、二次元問題の場合にのみ有効な手法であったが、筆者の方法にはその制限はない。

現に、三次元問題の一般解については、42年度の土木学会年次学術講演会において発表したとおりである。

筆者の方法で、キャリヤー達が行なったと同じく、初期値問題をとくことができる。ある時刻に、長波の形状および流速の空間的な分布があたえられ、その後の変形を論ずるのが初期値問題であるが、現実の問題として、このような空間的形状を条件として与えることは非常にむずかしいことである。どこか空間の一点でとらえられた水位や流速の時間的変動の記録から、その後の長波の運動、最終的には陸地へのうちあげの高さを求めたいというのが普通であろう。筆者の導いた式によると、この境界値問題を扱うことが可能となる。ただし、現象をラグランジュ流にみているのだから、正確には、ある一つの水粒子の運動に対応して、他の水粒子の運動の記述ができるというなおす必要がある。このことは、空間のある固定された一点における記録をもとにしてうちあげ高をもとめるという問題と若干こととなるのであるが、この

差異を修正することは可能である。反射率が1.0であると仮定すると、最大のうちあげ高と、ある地点での波形記録の最大値を実現した水粒子との間に、かなり簡単な関係が良い近似で成立することがわかったのである。このため、水粒子の運動についての細かな記述が不必要となり、ある一点で観測された波形記録の最大値に対応する水粒子を取束のよいくり返し計算によって求めることができ、オイラー流に与えられた境界値問題を、ラグランジュ流に「ほん訳」しえたのである。この結果を、建設省土木研究所で行なわれた約50個の実験結果を比較したところ、きわめて良い一致をみたのであった。

しかし、いまのところ、この境界値問題への適用範囲は、

$$\frac{4\pi}{iT_0} \sqrt{\frac{h}{g}} \leq 1.5$$

の程度であるとしておきたい。ここで、 $i$ : 斜面の勾配、 $T_0$ : 波の周期、 $h$ : 記録のえられた場所の水深、 $g$ : 重力の加速度である。

初期値問題、境界値問題にかぎらず、波群が無限に続いている場合の解に対しても、もちろんその解をうることができる。しかし、この種の問題では、斜面からの反射をどのように評価するか、また汀線近くに来て碎波をおこした場合など、それによって生ずるエネルギーの損失をどう計算にくみいれていくかが大きな問題となる。数学的に解決しえたのは、反射率1.0または、反射率零の極端な場合であって、反射率が0~1.0のものに対しては、まだ解決されていない。反射率が1.0に近い急深の湾での高潮の問題（たとえば、6626号による駿河湾奥部での高潮の問題）に対しては、上のような方法は良い解決指針を与えるであろう。

[筆者：中央大学助教授 理工学部]

## FLOW AND STRESS RELAXATION OF CLAYS

柴 田 徹

現在、土質力学の分野における主要課題の一つに粘土のレオロジー的性質の究明がある。それは基礎工や土構造物の設計にさいして、支持力と沈下の経時変化の予測や精度の検討、あるいは現場でえられる長期観測データの定量解析を行なうためには、レオロジー的手法が有効であろうという理由による。しかし粘土には他の材料にみられない複雑さ——たとえばひずみにともなう骨格構造の変化——があり、しかもレオロジー的性質は粘土構造の変化に対してきわめて敏感な反応を示すから、この

課題の解決をさらに困難なものにしている。

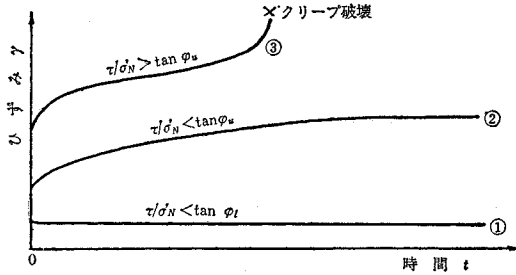
筆者がこのテーマを村山教授より与えられてからすでに12年になるが、その間にあげた成果のうちおもな事項——粘土のクリープと応力緩和に関する基本的性質の説明や、その応用として応力・ひずみ関係、降伏値、二次圧密等——はこの論文に要約されている。そしてこれらの中から今回受賞の対象になりうるものがありとすれば、それは粘土の力学に対して初めて rate process 的考察を導入して一応の理論を組み立て、かつその裏付けとなるべきデータを積み重ねてきたことであろうと思う。

このように rate process に立脚した理論を公けにした当初は、筆者自身、単なる空論に過ぎないのではないかという危惧があったが、幸いにもその後共鳴者が現われ、たとえば藤本、J.K. Mitchell, R.W. Christensen と T.H. Wu, E. Schultze と J. Krause らによってそれぞれ種々の観点から理論の拡張や裏付けがなされてきた。しかし一方では筆者らの考えに対する批判がなかったわけではなく、たとえば有効応力に基づく解析法の有用さを無視しているのではないかという問いがあった。この点に関しては村山教授と筆者の間にいまも意見の相違があるように思われ、その根本はクリープひずみ  $r$  はせん断応力  $\tau$  と時間  $t$  の関数として  $r=f(\tau, t)$  と表現できるのか、さらにせん断面上の有効垂直応力  $\sigma_N'$  の影響をも考慮して  $r=f(\tau, \sigma_N', t)$  と表現すべきかの違いにある。そこで論文の要旨とは若干はずれるかも知れないが、今後の研究を進めていくうえで大事なことであるから、筆者の考えを以下に述べたいと思う。

粘土に非排水状態のままを持続荷重を載荷するとき、その持続荷重が将来破壊を生じさせるほどの大きさであるかどうかを判定できる規準があれば有意義であるとして、上限降伏値  $\tau_u$  の存在とその求め方を提案した。さらに JIS で定められたせん断試験によって求まる強度パラメーターは載荷速さや方式によっても変動するので、これに対して  $\tau_u$  は載荷条件によって不変の客観的な強度規準を与えないかという期待があった。そして上述の  $r=f(\tau, t)$  の観点から、載荷されている  $\tau$  と  $\tau_u$  の大小関係によって  $\tau < \tau_u$  ではクリープは飽和するが、 $\tau > \tau_u$  では破壊を生じるものと推論してきた。なお  $\tau_u$  の求め方は定荷重式のせん断試験からえられる  $dr/dt \sim \tau$  関係、あるいは  $\log \tau \sim \log r$  関係を利用するもので、これは粘土地盤中の摩擦ぐいの降伏支持力にも応用されている。これらの現象を  $r=f(\tau, \sigma_N', t)$  の観点からみるとつぎのようになる。

いまわれわれが通常に扱う種類の粘土、すなわち余り高塑性でなくて Hvorslev の  $\kappa$  値がゼロに近似できる正規圧密粘土を対象とし、これに一定せん断応力  $\tau$  を加えたまま放置したときのひずみの経時変化は、 $\tau$  とせん

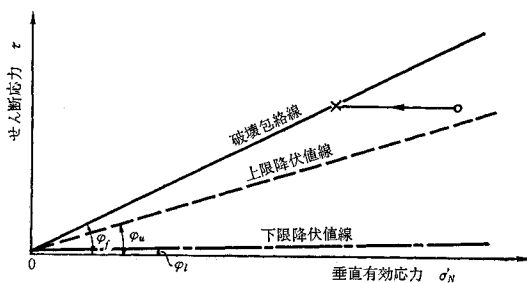
図一 三種類のクリープ曲線



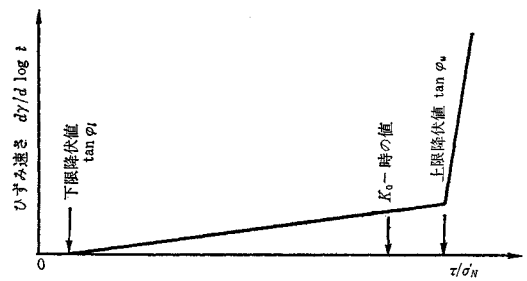
断面上の有効垂直応力  $\sigma_N'$  の比  $\tau/\sigma_N'$  の大きさによって少なくとも三種類に類別できると考える。すなわち図一において i) 載荷時の  $\tau/\sigma_N'$  が  $\tan \phi_l$  (ここに  $\phi_l$  は下限降伏値に対応してモビライズされた内部摩擦角) より小さければ曲線 ① に示すように、即時変位を生じるのみでそれ以後は変位量の増減がない。ii) 載荷時の  $\tau/\sigma_N'$  が  $\tan \phi_l$  と  $\tan \phi_u$  (ここに  $\phi_u$  は上限降伏値に対応してモビライズされた内部摩擦角) の間にあれば、曲線 ② に示すように即時変位を生じたあと変位量は徐々に増加するが、ある程度時間がたてば有限の変位量に落ち着く。iii)  $\tau/\sigma_N'$  が  $\tan \phi_u$  より大きければ曲線 ③ に示すように変位量は時間とともにふえ、変位増加率がいったんは減少するが再び増加して破壊にいたる。ただし図一の曲線は非排水状態におけるクリープ挙動を示したものであるから、 $\tau$  は一定でも有効応力  $\sigma_N'$  は刻々に変化している。 $\tau$ ,  $\sigma_N'$  とともに一定に保つ試験は、たとえばくり返し載荷などによってダイレイタンスがないような粘土構造に変えれば可能である。

以上の説明は  $\tau/\sigma_N'$  すなわち内部摩擦がモビライズされる度合いに応じて粘土のクリープ挙動が支配されると考えるものであって、 $\tau$  を載荷した時の有効応力状態が図二の  $\tau \sim \sigma_N'$  座標系にプロットされる位置が重要な意味をもってくる。仮りに図中の上限降伏値線より上側にプロットされると矢印の方向に  $\sigma_N'$  が減少し、やがて破壊包絡線に達する。これがいわゆるクリープ破壊であって、 $r=f(\tau, t)$  の観点ではクリープ破壊を生じさせる応力は時間の関数として処理されていた現象である。ま

図二 降伏値と破壊包絡線



図三 ひずみ速さと  $\tau/\sigma_N'$  の関係



た上限降伏値線より下側にプロットされると  $\sigma_N'$  の増減はあるが、破壊線に達せずに平衡する。なお  $\tan \phi_u$  と破壊時の  $\tan \phi_f$  の比は  $0.7 \sim 0.8$  の範囲に入ることも判明している。

以上の考察をクリープ速度についてみると、有効応力に変動がない段階でのクリープは Buisman の secular law にしたがうから、 $r \sim \log t$  直線の傾斜  $dr/d \log t$  と  $\tau/\sigma_N'$  の関係を示すと図三に要約され、両者間に一義的な関係があると同時に  $\tan \phi_u$  を境界として変位速度に顕著な差が現われることがわかる。

さて一次圧密が土中の過剰間げき水圧の消散という動水力学的な時間の遅れをとまうのに対し、二次圧密はせん断クリープによるものと解釈されている。かかるせん断クリープが間げき水の逸脱による土の体積減少よりも遅れて発生する時に、二次圧密の影響が強く現われて圧密～時間曲線の上に反映されることになる。筆者(ならびに他の研究者達)は  $K_0$ -圧密試験の結果、正規圧密粘土では載荷応力とは無関係に二次圧密速度  $dr/d \log t$  が一定値となることをみた。また一次元圧密平衡時の  $K_0$  値(すなわちその時の  $\tau/\sigma_N'$ ) も載荷段階とは無関係に一定値をとることが判明している。これら二つの事実は二次圧密すなわちクリープ速度が  $\tau/\sigma_N'$  によってきまることを示しており、上述した図三の説明に包含される。そして図三中に記入したように、一次元圧密平衡時の  $\tau/\sigma_N'$  は  $\tan \phi_u$  より少し左値に位置することになる。

筆者が粘土のクリープ試験に初めて着手した頃にくらべると、今日では土質物性に関する測定精度が格段の向上を示しており、信頼できる方法によって粘土のレオロジーに関する新しい事実が明らかにされつつある。しかし施工の種類は多種であり、その性質は構造依存性がきわめて鋭敏であるから、さらにデータの集積をまたなければ一般法則を定義することは困難な現状であると思う。今後は種々の物理・化学的条件のもとにおけるレオロジー的特性の究明と並行して、室内研究の成果を実構造物の設計や解析に応用するための努力を払いたい。

[筆者：正会員 工博 京都大学助教授]