

AASHO による道路試験報告

“AASHO Road Test”, Highway Research Board Special Report 61 A, 61 B, 61 C, 61 D, 61 E, 61 F, Civil Engineering, June (1962), Engineering News Record, May 17 (1962)

この論文は 6 年間の歳月と 2700 万ドル (92 億 2000 万円) 余にもよる研究費の投入によりアラスカを除くすべての州の協力のもとに AASHO が行なった非常に大規模な道路および道路構造物に関する材料・設計各種実験の成果をとりまとめたものである。

本実験の直接の目的は交通荷重に対する道路の舗装構造の相違および舗装材料の相違によるその特性と反応状態、およびそれらの相互関係——すなわち、たわみ性舗装(歴青系舗装)と剛性舗装(コンクリート系舗装)との比較、表層厚基層厚と走行荷重、荷重載荷度数との関係(舗装厚指数)、効率の良い安定な交通の可能性を表わすサービス指数などの概念をふくむ——また種々の形式の橋梁における破壊荷重、くり返し走行荷重による反応・効果の決定などがそのおもなものとなっている。

(1) 試験地・試験施設・試験方法

この大がかりな実験はオッタワ近郊で 6 つの試験舗装路

図-1 試験地全図

試験走路 直線部分: 2073 m 曲線半径 60 m
ループ 2 は軽車両用

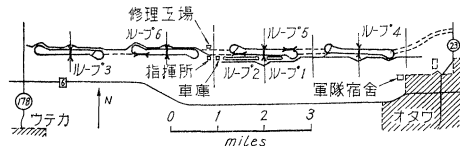
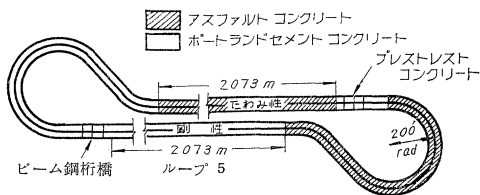
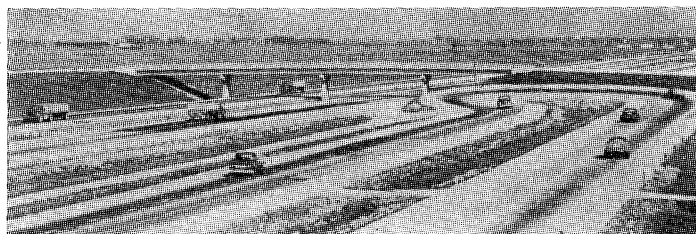


図-2 詳細図



ループ 2 とループ 5 の部分での試験状況写真



(ループ コース) をふくむ試験によって行なわれた(図-1, 2 参照)。

地形は平坦であり排水条件は地表・地中ともに良好でない。この地域の諸条件は表-1 のとおりである。

表-1		外力の載荷方法としては重
年間降水量	890 mm	車両による走行荷重を用い、
冬期平均気温	-2.8°C	ループ 2~6 においては各種
夏期平均気温	24.4°C	輪荷重の走行荷重をかけ原則
凍上深度	70 cm	として破壊するまでくり返し
岩盤深度	3~9 m	

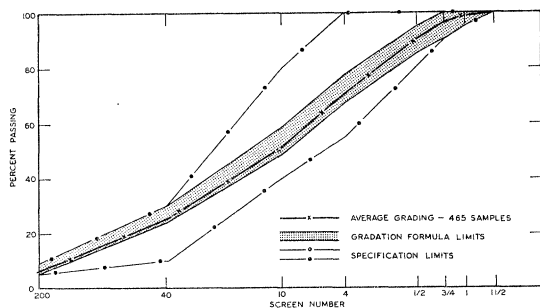
た(破壊しない場合は 1114000 回まで行なった)。ループ 1 においては無荷重状態で観察を行なった。橋梁の場合は 557000 台の走行荷重をかけ破壊しない場合にはさらに機械的に振動を加え状態を調査した。

舗装路面は 4 車線(盛土巾 13.2m×2)と中央分離帯(巾 14.4m)から成っており試験路の施工にあたっては各実験値が相互に比較できるように均一材料を用い同一施工法によって行なった。試験は各ループの直線部分のみについて行ない、各試験区間の中間には非試験区間を設けた(各区間の長さは 30~50m)。これら各試験区間は舗装材料の種類とか厚さ、走行車両重量などにより区別されている。

(2) 舗装材料および工法

路床土としては A-6, A-7 を用い盛土を行ない 10 cm 厚ごとに 9 層にわけて転圧を行なった。転圧の条件としては含水比が最適含水比(O・M・C)の ±2% 以内に収まり、AASHO T-99-49 の試験法による 90~100% の

図-3



密度が出るように転圧を行なった。路盤についてもたわみ性系舗装・剛性系舗装とも同一のものを用いた。粒度曲線は図-3 に示す。また歴青系基層はパッチャプラントにより混合した歴青混合物を用いセメント系基層は図-3 の粒度をもつ砂礫に重量百分率 4% のポルトランドセメントを混合したホワイトベースを用

いた。

たわみ性舗装についてはアスファルトコンクリートを用い厚さ 7.5 cm 以上の場合は binder course と surface course からなっている。表層は石灰岩系砂石、シリカ系砂、石灰岩ダスト、アスファルト（針入度 80~100）を 145°C で混合，レタデム ローラー，タイヤ ローラーにより締固めた。剛性舗装についてはスランプ 3.5~6 cm 程度，最大水セメント比 47% 程度，空気量 3~6%，最小圧縮強度 250 kg/cm² のコンクリートを用い無筋，有筋について打設した。

(3) 走行荷重と補修

図-4 に示すようにトラック 22 台，トレーラー 104 台を 1 日 14 時間，週 6 日の割合で試験コースを走行しその延長は約 2 800 万 km に達している。補修には 1 日 5 時間が当てられた。これらは陸軍の援助のもとに行なわれた。

図-4 各試験車両両車軸重量

ループ	重量 (kip 当り)	重量 (kip 当り)		全重量
		前車軸	後車軸	
②	①	2	2	4
	②	2	6	8
③	①	4	12	28
	②	6	24	54
④	①	6	18	42
	②	9	32	73
⑤	①	6	22.4	51
	②	9	40	89
⑥	①	9	30	69
	②	12	48	108

(4) 舗装のサービス指数 (serviceability) の概念の導入

舗装路面が交通の本来の目的に十分合致した状態であるかを判定する要素としてここにサービス指数なる因子を用いた。このサービス指数 (P.S.I.) はそれぞれ両輪の軌跡の傾斜程度の相違，クラック発生程度およびクラ

表-2

P.S.I.	評価
5~4	very good
4~3	good
3~2	fine
2~1	poor
1~0	very poor

ック自体の判定，わだちの深さなどの判定から表-2 に示すように区別されている。試験開始前は P.S.I. はたわみ性舗装の場合 P.S.I.=4.2，剛性舗装の場合 P.S.I.=4.5 であった。P.S.I.<2.5 の場合その舗装は本質的補修を必要とする。

(5) 試験結果

a) たわみ性舗装 全試験区間数 284 個からの成果はまず P.S.I.=2.5 なるまでのトラック走行回数と舗装

厚指数との関係が得られたことである。舗装厚指数は次の式で表わされ，これより表層はベースの 3 倍，路盤の 4 倍の効果をもつと考えられる。

$$\text{舗装厚指数} = 0.44 D_1 + 0.14 D_2 + 0.11 D_3$$

D_1 : 表層の厚さ (5 cm 以上)

D_2 : ベースの厚さ (7.5 cm 以上)

D_3 : 路盤の厚さ

そのほか数学的に関係を受けられたのは舗装の現象の相互の関係，設計の諸要素，荷重・載荷回数などに関するものである。詳細は本文によるとして基層については同一厚さでは処理路盤の方が良好で，32 cm 厚石灰岩砕石基層と 20 cm 厚セメント処理基層と 15 cm 歴青処理基層が 1 114 000 回の走行で P.S.I. が 2.5 となった。またタイヤのめり込みによる破損をみると，めり込み深さの 32% が表層の減少，14% が基層の減少，49% が路盤，9% が盛土の減少という分散を示している。速度が大だとめり込みの程度も大きい。これら層厚の減少はほとんどが側方移動でこれにも限界厚が存在している。たわみについては表面について行なうのが有効で走行速度とともに減少している。また温度が 25~50°C ではたわみに関係ないが 25°C 以下では減少するにつれ減っている。

図-5 たわみ性舗装における P.S.I.=2.5 になるまでの走行回数と舗装厚指数との関係

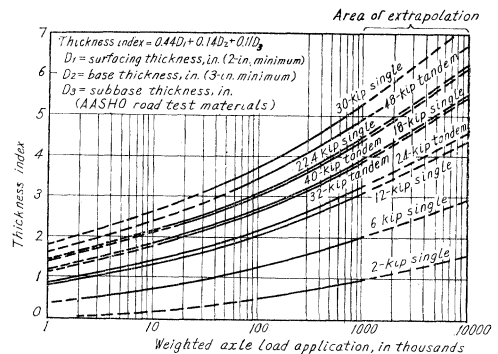
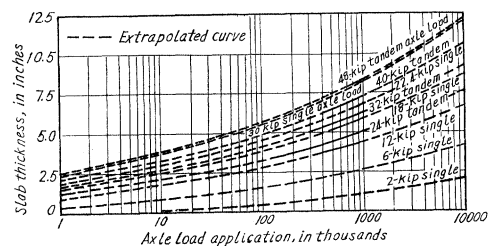


図-6 剛性舗装における P.S.I.=2.5 になるまでの走行回数と版厚との関係



b) 剛性舗装 全試験区間数 264 個からの成果は，a) と同様に P.S.I. と舗装厚指数との関係がえられている。舗装版のクラックは外的作用力によるものと推定され，剛性舗装の最大の害因はポンピングで薄い層厚のとき，

とくにひどかった。路盤厚 RC、非 RC との相関はみられないが荷重大だとはげしく、版厚大だと減少する。版の端部と角部でのひずみとたわみについては明白な傾向はないがともに走行速度の増加とともに減少している。

e) 橋梁構造 10 個の鋼桁橋、4 個の RC 橋、4 個の PC 桁橋についてこれらはすべてスパン 15 m、巾員 4.5 m、厚さ 16 m の PC 床版の単径間ばかりとなっている(鋼桁中 2 個は合成桁)。くり返し荷重による影響を調べた疲労によるクラックは、下部フランジに部分的にカバー プレートを溶接した構造の橋に生じ(死荷重により $410 \sim 1\,410 \text{ kg/cm}^2$ 、活荷重により $900 \sim 1\,250 \text{ kg/cm}^2$)、カバー プレートのない鋼桁橋では $1\,400 \text{ kg/cm}^2$ を生ずる車が 392 400 回通過してもクラックは起きなかった。RC 桁では鉄筋に疲労が現われ 730 000 回で破壊した。合成桁は一般に強い傾向を示し PC 桁ではくり返し荷重により PC の剛性が減少し鉄筋とコンクリートの付着強度も減少してくる。一般に設計荷重以上の重車両を通過させ試験したわけであるが、それによれば過重車両は 24 km/h 以下程度の速度でなければ破壊を生ずることが想定される。

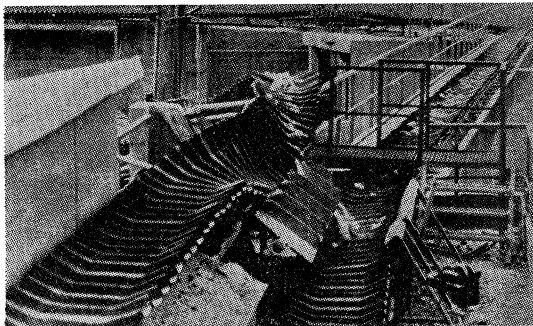
原報告書は非常にぼう大なものであり、ここでの抄訳の中心は Civil Engineering においたことを付記しておく。(藤井 治芳)

屈曲、傾斜が自由自在なコンベア

“Conveyor Belt Can Do the Twist”, Engineering News Record, March 8th (1962)

ドイツ製の屈曲自在でサイド ダンプも可能で往復ベルトにもなるコンベアが米国で紹介されたが、名前はサーペンティックスといい、単動カプラントと通常のコンベアだったら 何台分かに相当する一本のベルト コンベアから成りたっている。

写真一 屈曲自在でサイド ダンプも可能、かつ、往復とも荷を運ぶことができるコンベア



サーペンティックスの屈曲自在なのは、そのベルトのデザインとベルトの送り装置にあって、ベルトは繊維なしのゴムでつくられ、調節可能な断面をもち、20 cm お

きに垂直のひだがつき、このひだは運搬されるずりや砂利を急勾配なベルトで運ばれるときのすべり止めの役目をする事と水平方向で 2.90 m、垂直方向で 3.70 m の各半径の円で曲がりうる収縮と伸びを生ずることの二つの役目をもっている。

この 1 組のひだでつくられた皿部分の下には、やはりゴムで結合された鉄板がつき、これはまた全体のコンベアシステムを動かしているトルクを伝達する鎖どめつきのチェーンに密着している。

サーペンティックスがもっている変わった部分の一つとして、ベルトの若干の部分がこわれたり、完全に破壊されても仕事を継続することができることで、張力はベルト自身でなくてチェーンに働くのでこわれたベルトはいつでもすぐ修繕できる。すなわち、ベルトはこわれた部分とその修繕場に入ってきてその部分がとり除かれ、修繕工が若干のボルトを入れかえるに必要な時間内で新しい皿が入れられるまでかこっていることができる。ゆえに、修繕中にシステム全体のテンションをゆるめたり、破壊されない部分に手を触れたりする必要はない。

ローラー システムについても同じような長所をもち、通常のコンベアのごとくローラーがシステムに固定されているのではなく、ローラーはベルトも一緒に動くために、一生涯注油する時間というのがないので、コンベアに沿って適当なところにたっている作業員によって注油され、ローラーがその人のところにくるので人がせまい通路をのぼりおりする必要がない。

ローラーは直線、水平および垂直方向の曲線、らせん形、波形などあらゆる希望するルートをつくりうるようになったチャンネルわくの中を走る。もしコンベアが往復とも荷を運ぶときには、ベルトが水平また垂直面で回転してすぐつきか、かなりはなれたところ、あるいはその下においてあるチャンネルの上を正しい位置にもどって流れてゆく。

片方向運搬のみならば、ベルトは垂直曲線をなして送りわくの下にあるチャンネルの上を逆さになった位置でかえってゆく。この場合、ベルトはそのローラーによって吊り下げられ、ベルトの表面は今までのコンベンショナル式のようにローラーとの接触による摩耗や摩擦は生じない。

このシステムでの任意点でのサイド ダンプ法については、今までいろいろの会社が連続的あるいは断続的なダンピング装置を提案している。連続ダンピングのためにはチャンネルのわくにあらかじめ突起をつけておき、ベルトがとおればひっくりかえすという方法で、断続ダンピングに対してはチャンネルが水平に敷かれ、上下動をする装置をもったピボット区間がついているもので、上下動は機械式、水圧式または電気式でなされ、調整は

手または自動的になされる。

目下、4大陸で100個以上のサーペンティックスが利用されているといわれ、利用範囲はダム工事から石切場や工場での材料、生産品の扱いかいまでおよび、今までの最大長は300mであるが、会社にいわせるとこれが限界長ではないという。また、米国での販売価格は未定であるが国産品と十分太刀打できる値段になろうといわれている。(竹下 貞雄)

フォームド アスファルトによる 舗装の経済化

“Foamed Asphalt for Economical Road Construction”, *Csanyi, L.H.*, Civil Engineering, June (1962)

アイオワ州立大学 歴青研究室では、アスファルトセメントの骨材として、現場にある材料を粒度調整せず、そのまま道路の基層用に、あるいは地方の道路のような重量交通の通らない道路の表層用として使用できる工法を開発した。これはフォームド アスファルトとして知られているもので、アスファルトセメント中に気泡を混入することにより、その施工時の性能を良くし、材料の節約と工期の短縮を期すものである。気泡混入によりアスファルトセメントの性質で改善される点は、(1)容積が殖え粘性が低下し、低温でも柔らかさを保ちやすくなる、(2)泡の混入はアスファルト中にエネルギーを導入する結果、表面張力を和らげ粘着性を増すことになり、一方では気泡は骨材表面の水分の排除に役立つので、骨材表面を比較的薄い膜で被覆することができるようになる、(3)泡が潰れて、エネルギーが消散すれば、アスファルトは元の性質をとりもどし、その化学構造には変化を来さない、などである。これによって、温度の低い湿った骨材や土砂とアスファルトとの混合も可能になり、粘土質の湿った土の塊にもアスファルトをしみこませることができる。たとえば、現場にある自然のままの骨材のように、従来は骨材として不適當であったものをも使用可能にし舗装工事の工費低下に役立っている。気泡混入の方法はいろいろあるが、要は臨機に必要な量を均一に混入することである。これには気泡発生ノズルを用いる。これはポンプでノズルまで送られてきたアスファルト(温度138°C以上、圧力1.75 kg/cm²)の中へ圧力40 psi(約2.8 kg/cm²)の蒸気を導き、泡の発生を促す仕掛けになっており、泡の量その他はノズル先端部の形や、アスファルトおよび蒸気の圧力を加減することにより調節できる。ミキサも普通のものに気泡発生ノズルを取りつけばこと足り、このための特殊な機械を要しない。フォームド アスファルト工法は、比較的新しい方法であるが、米国を始めカナダ、オーストラリア、ア

ルゼンチンその他でかなり広く使われている。フォームド アスファルトを使うと、低温、荒天候時の施工も大した支障なく行なえるが、施工過程で特に注目されるのは、高い含水量の骨材をも使用することができるため、施工機械の運転によって路面を乱されることが少ないので、スタビライザーをとおしたのち、ごくわずかの仕上げ均らしをするだけでただちに転圧にかかれることである。

以上のようにフォームド アスファルト工法は、施工面に大きな進歩をもたらすものであるが、その利点を要約すると、(1)アスファルト量を25~30%節約できる、(2)高い含水量(10~20%)の骨材をも使用することが可能である、(3)施工後一時間で、すでに交通荷重に耐えうる能力がある、などである。(大野 善雄)

液体が入っている円筒シェルの振動

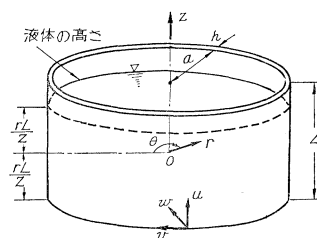
“Free Vibration of Fluid-Filled Cylindrical Shells”, *Baron, M.L., Skalak, R.*, Proc. of A.S.C.E., Vol. 88, EM 3 (1962)

石油貯蔵タンクなどが、地震荷重や、爆発荷重を受けたときには、タンクが空である場合よりも異なった運動をする。この論文はかかる問題に応用するための基礎的理論的研究である。まず、空のシェルの規準振動を一般座標として用い、シェルと液体との相互作用を議論している。そしてシェルの規準振動数を与える式を誘導し、同時に、液体表面の運動に言及して、その数値解を与えている。

空の円筒シェルの振動は、理論上数多くのモードから成り立っていると考えられるが、実用上、最小振動数のモードを、いくつか選んで近似的に取り扱おうことができる。今3個の常数をもつモードをえらぶと、次式がえられる。

$$\left. \begin{aligned} u(z, \theta, t) &= C_n \frac{U}{W} \frac{z}{a} \cos n\theta \cdot q_n(t) \\ v(z, \theta, t) &= C_n \frac{V}{W} \frac{z}{a} \sin n\theta \cdot q_n(t) \\ w(z, \theta, t) &= C_n \frac{z}{a} \cos n\theta \cdot q_n(t) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

図-1 液体が入っている円筒シェル



ここにおいて、 C_n は規準化係数、 U, V, W は常数である(図-1参照)。円筒内に入っている液体の運動のポテンシャルを $\phi(r, \theta, z, t)$ とおくと、 ϕ はLap-

lace の方程式を満足せねばならない。境界条件 としては、液体とシェルの壁の運動が一致すべきことより、

$$-\dot{w}(z, \theta, t) = -\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right]_{r=a} \dots\dots\dots (2)$$

また、シェルの底面で速度が0であるという条件から

$$V_z = -\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=-rL/2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

V_z は液体の鉛直方向の速度成分。さらに表面で圧力が0であるという条件から、

$$p = -\rho \left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=rL/2} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

などの3つの条件があげられる。

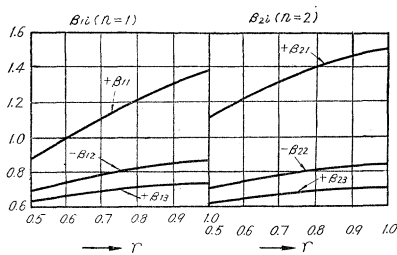
以上式 (2), (3), (4) を満足する ϕ の値は $\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ の形にわけて求めることができる。 ϕ_1 は式 (2) の条件より求め、 ϕ_2 は $\phi_1 + \phi_2$ が式 (3) を満足し、かつ $\dot{w} = 0$ であるように定める。 ϕ_3 は式 (4) の条件から定まるのであるが、これはシェルが剛体として、静止しており、液体のみが内部で運動する、いわゆる sloshing motion を表わす。したがってシェルの運動と直接関係のない解であるために、 ϕ_3 はシェルのモードの一般座標 $q_n(t)$ の関数としてただちに求めえない。そこで、内部の液体の sloshing motion の一般座標を $A_n(t)$ とすると、 $A_n(t)$ と $q_n(t)$ との関係の別な考え方から導く必要が生じてくる。そのためには、液体とシェルの全体系の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを計算し、それについての、Lagrange の方程式を作ればよい。その結果 $A_n(t)$ を $q_n(t)$ の関数として表現することができる。そして ϕ_3 を $q_n(t)$ の関数として表わせば $\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ が求まる。このような手続きをえて求めた結果の一つとして、表面における液体の運動の表示式を示す次のようになる。

$$V_z \Big]_{z=rL/2} = \sum_{i=1}^{\infty} C_n \frac{rL}{a} \beta_{ni} J_n \left(\alpha_{ni} \frac{r}{a} \right) \cos n \theta \cdot q_n(t) \dots\dots\dots (5)$$

α_{ni} は $J_n'(\alpha_{ni}) = 0$ の根である。

この式中の β_{ni} の値を数値計算したものが 図-2 に示してある。

図-2 γ の値に対する β_{ni} の図表



(石原 研而)

不飽和土に関する実験的研究

“The Experimental Study of Partly Saturated Soils in the Triaxial Apparatus”, Bishop, A.W., Proc. of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p. 13 (1961)

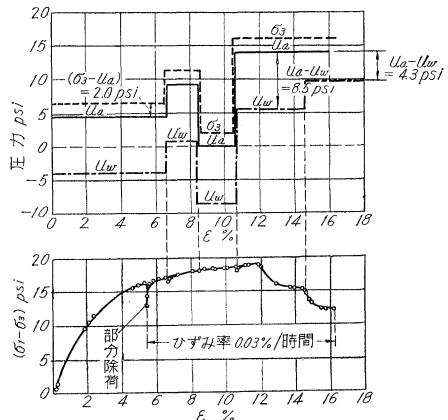
不飽和土の力学的挙動を調べるには、飽和土の場合よりいっそう精密な試験装置と技術が必要である。この論文はまず、不飽和土の三軸圧縮試験における間げき水圧、間げき空気圧の測定装置と方法について述べ、飽和土と不飽和土とはせん断強度と体積変化の特性に差異があり、不飽和土の有効応力は、間げき空気圧とパラメーター χ の項を入れた修正式によって説明できることを示したものである。試験は、Braehed シルトを用い三軸圧縮排水試験および定含水比試験によって、Bishop の提案した不飽和土の有効応力に関する式の妥当性を検証するために行なわれた。すなわち、有効応力 σ' は

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$$

で与えられる。ここで、 σ : 全応力、 u_a : 間げき空気圧、 u_w : 間げき水圧、 χ : 飽和度および湿乾のくり返し、応力の変化によって決まるパラメーター。飽和した土に対しては $\chi = 1$ となり、式は飽和土の有効応力の式と一致する。図-1 は $(\sigma_3 - u_a)$ および $(u_a - u_w)$ の値が一定になるように σ_3, u_a, u_w を変化させて、不飽和土の三軸圧縮試験を行なった結果である。これによって、せん断強度はこれらの応力の変化によって影響されないことがわかる。また平均の飽和度は試験中滑らかに変化するにすぎないので、 σ_3, u_a, u_w などの応力の変化にかかわらず、不飽和土の有効応力を表わす式 $\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$ は正しいと推論することができる。ただ、 $u_a - u_w$ の変化が、強度に影響をおよぼすにすぎない。

図-2 は、排水試験と定含水比試験における全応力か
図-1 不飽和のゆるいシルトの排水試験

$(\sigma_3 - u_a)$ および $(u_a - u_w)$ が一定になるよう σ_3, u_a, u_w を変化させる



ら間げき水圧を引いた値でプロットした結果を示す。飽和土と不飽和土とは、破壊の包絡線がずれていることがわかる。したがって不飽和土の有効応力には修正を要することが明らかである。図-3 は、図-2 によって α を求め、各種の飽和土に対してプロットしたものを示す。

図-2 シルトの排水試験および定含水比試験の結果

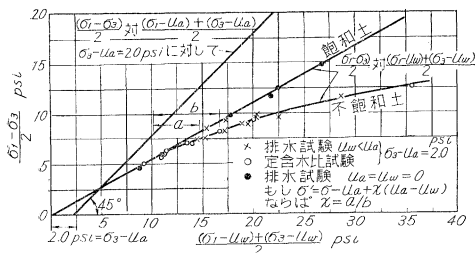
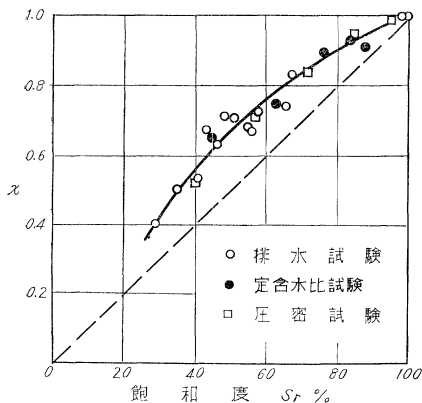


図-3 α と飽和度の関係 (Braehed シルト)



また、図-3 には三軸圧縮試験のせん断強度特性から求めた α と圧密試験の体積変化特性から求めた α とが併記されているが、この両者にはほとんど差がなかった。(駒田 敬一)

セメント モルタルのクリープ機構について

“Creep Mechanism in Cement Mortar”, *Glücklich, J. and Ishai, O.*, Jour. of A.C.I., Vol. 59, No. 7, July (1962)

コンクリートのクリープに関して、従来2つの要因が考えられてきた。すなわち、セメントゲルが粘性をもつため外力によってフローを起こすのが原因であるという説と、コンクリート中の水分の浸出がクリープの原因であるという二説である。この論文では、モルタル供試体中にふくまれる非結合水 (evaporable water) の量とモルタル供試体の乾燥収縮、弾性ひずみ、およびクリープとの関係を実験によって求め、クリープの機構をコンクリート中にふくまれる非結合水の量によって説明している。実験に用いた供試体は、直径 5 cm、高さ 55 cm の円柱形で、供試体モルタルの配合は、C : S : W = 1 : 0.6 : 0.32 である。供試体は製造後 16°C の水中で 20

日間養生したのち、105°C の乾燥炉中で所定の値まで乾燥させ、ポリエチレンの袋に入れて図-1 に示す載荷装置に固定した。この載荷装置は供試体にねじりを加えて、弾性ひずみおよびクリープひずみによって生ずる角変化を測定したのであるが、これは供試体の乾燥収縮、温度変化などによる容積変化がクリープひずみ測定結果に影響を与えないようにするためのものである。

図-1

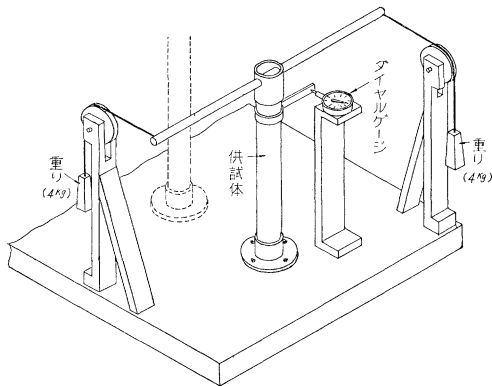
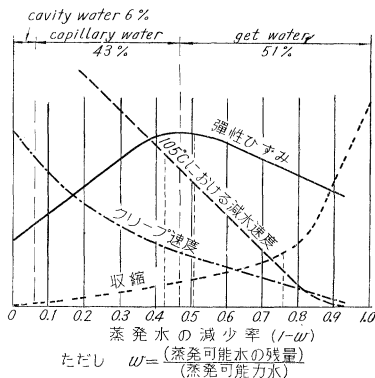


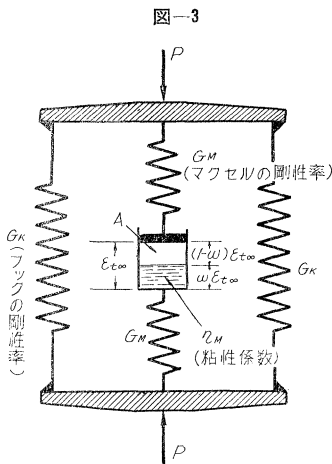
図-2



実験結果の総括は図-2 に示すとおりである。図-2 の横軸はモルタル供試体中にふくまれる非結合水の減少率で、 $(1-w)=0$ は飽和状態、 $(1-w)=1.0$ は非結合水=0、すなわち蒸発可能水がすべて蒸発した状態である。ここに $w = \frac{\text{供試体に残っている非結合水}}{\text{供試体中の全非結合水}}$ である。

図-2 より次のようなことが認められる。 $(1-w)=0.4 \sim 0.5$ の範囲で弾性ひずみは最大値を示し、クリープ速度はこの範囲まで急激に減少し、 $(1-w) > 0.5$ では直線的に減少して $(1-w)=0$ でクリープ速度は0になる。すなわち非結合水が全部蒸発すればクリープは0である。 $(1-w)=0.75 \sim 0.85$ の範囲を越えると乾燥収縮は急激に増加し、供試体中の水分の減少速度はいちじるしく低下する。

これらの現象は図-3 に示すモデルによって説明される。図-3 は、同程度の大きさの空げきをもつ多孔質の



弾性体が持続荷重を受ける場合の機構を示したものである。モデルの空げきがすべて水で満たされた場合の終局のひずみ{(弾性ひずみ)+(クリープひずみ)}は空げきに水が全くない場合の弾性ひずみと等しい。

コンクリート内の毛管水 (capillary water) が蒸発すると、図-3 のダッシュポットAの部分 が空洞になって、粘性係数が低下する。したがって弾性ひずみは増加し、毛管水の減少速度に比してクリープ速度の低下は大きくなる。ゲル内の非結合水 (gel water) は毛管水に比して蒸発しにくく、したがってゲル水が減少する段階に入ると、コンクリートは密度を増して弾性ひずみは小さくなり、クリープ速度も低下し、収縮は急激に増加する。なお、図-3 のモデルによって以上の関係を数学的に取り扱う方法がこの論文に示されている。(青柳 征夫)

水面上の風に対する波の抵抗

“The Wave Drag of Wind over Water”, Stewart, R.W., Jour. Fluid Mech., Vol. 10, Part 2, March (1961)

風と水面との相互作用は従来2つの観点より考察されている。一つは水面を地表面と同様な特性を有し、風にせん断力をおよぼす一種の境界面と見なす立場で、この観点よりすれば水面の粗度定数 z_0 を決定することが重要な問題である。他方には、風の特性は与えられたものとして風による波の発生を取り扱ったおびただしい研究がある。しかし筆者はこれまで見落されていた重要は点として、水面との相互作用によって風より失なわれる運動量のかなり多くの部分が波の運動量に入っていくことを見出した。さらにこの事実をもとにして水面上の乱流境界層の性質が固定壁上のそれとはかなり異なったものなることを推論している。

(1) 波に対する運動量の流入

非回転性の波では、単位面積あたりの波の運動量 M と単位面積あたりの波のエネルギー E との間には次のような関係がある。

$$M = E/C = \frac{2\pi}{g} \frac{E}{T} \dots\dots\dots (1)$$

(C : 波速 m/sec T : 周期 sec)

風波を近似的に非回転性の波と見なし式(1)の関係を

利用して Groen & Dorresteinが 集約した 風波のデータを分析すると、風の継続時間 t が短い間では次のような興味ある関係が導かれた。

$$M/tU^2 = 2.4 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \dots\dots\dots (2)$$

(U : 風速 m/sec)

ところで、 $M/tU^2\rho$ (ρ : 空気密度) は一種の抵抗係数の性質を有するのでこれを C_{dw} と表せば式(2)より

$$C_{dw} = 2 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (3)$$

一方 Ellison によると風速 15 m/sec 付近における全抵抗係数 C_d はほぼ次のような値をとる。

$$C_d = \tau/\rho U^2 = 10 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (4)$$

式(3)、(4)を比較すると全抵抗に対する波による抵抗の割合が相当な量であることがわかる。

(2) 空気流と水面との相互作用の生ずる高さ

空気との相互作用で波に対しエネルギーや運動量が移行するならば与えられた運動量について、空気が失なうエネルギーは少なくとも波が得るエネルギーに等しい。したがって波の抵抗の影響をいちじるしく受けるような高さにおける風速を U_i とすれば式(1)の関係をを利用して次の関係をうる。

$$d\left(\frac{1}{2}\rho U_i^2\right) > C_d(\rho U_i) \text{ または } U_i > C \dots (5)$$

これは風の運動量が失なわれるのは水面ではなく、風速が波速 C より小さくないようなある高さであることを意味する。

(3) エネルギーおよび運動量の伝達

乱流境界層において境界面に向うエネルギーは Reynolds stress τ による τU 、圧力変動 p と鉛直方向の速度変動 v との相関による $-\overline{pv}$ および乱流エネルギーの拡散による $-1/2\rho\overline{q^2v}$ とよりなり、次のごとくなる。 q は速度変動のある場所における瞬間値。

$$\tau U - \left(\overline{pv} + \frac{1}{2}\rho\overline{q^2v}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ところが風のエネルギーは前述のごとく $U < C$ なる層を減衰しないで通過して波に入っていくので τU の減少とともにこれをおぎなう $-\left(\overline{pv} + 1/2\rho\overline{q^2v}\right)$ は増大しなければならない。このような運動は乱れと呼ぶにはあまりに規則的すぎる。

(4) 粗面上の空気流と波の発生

空気流の方に注目すればある風速以上では一般に水面は空気力学的に粗面と見なされるので運動量は水面局部の勾配と気圧との相関によって水に伝達される。水の方よりみれば圧力によって空気流より運動量をうる。一方均一な流体においては圧力によって生ずる運動は非回転性であり、水面よりはるか下方の水が定常な場合には波動運動の形式をとらないで運動量を伝達するような非回転性の運動を考えることは困難である。したがってこのことよりも運動量の大部分は波の運動形式をとって水に

入っていくことが推論される。

(5) せん断力、風速分布および交換係数

波速 C の波に入っていく運動量やエネルギーは $U < C$ なる空気層を減衰しないで通過する。このような運動は乱れとしては記述できない。一方 $U > C$ ではせん断力は乱れによって運搬される。したがって乱れによって運搬されるせん断力は水面より上方に向かって増大するに違いない。簡単な二次的考察より次の関係が導かれる

$$\tau/\rho z^2 \propto \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 \dots\dots\dots(7)$$

速度勾配はせん断力の平方根に比例して減少することになる。乱流せん断力が水面上の高さとともに増大することより、水面上では空気流に対して同一の全せん断力をおよぼす固定壁にくらべて境界面近くで $\partial U/\partial z$ の減少が予測される。したがって平均流の速度分布を普通に解釈すると特に下の方で小さすぎるせん断力の値をうることになるし、粗度常数 z_0 はそれを決定した測定点の高さとともに増大するというようなことになる。

水面のきわめて近くでは運動量やエネルギーを伝達する運動は乱れに比較して非常に規則的であるので、これは熱や水蒸気の運搬にはほとんど寄与しないであろう。したがって水面のごく近くでは熱や水蒸気の交換係数は運動量のそれより推定される値よりはるかに小さくなり、温度や湿度の鉛直方向の勾配は普通考えられるよりも非常に大きいことになるであろう。(光 易 恒)

コンクリート構造物(下水管きよ)への硫化水素の影響

“Effects of Hydrogen Sulfide on Concrete Structures”, Swab, B.H., Proc. of A.S.C.E., Vol. 87, SA 5, Sep. (1961)

硫化水素から生ずる酸によって各地でコンクリート構造物が破壊されている。下水施設の設計にあたっては、硫化水素の生ずる要素を十分考えなければならない。硫化水素によって生ずるコンクリートの風化は、流水面より上部におこり、流水との接触面に生ずる強酸性の工場廃水による腐食とは性質を異にする。

下水施設のコンクリートの腐食はバクテリアの新陳代謝に基因する。下

写真一

水中に存在するバクテリア、菌類の大部分は、硫黄や硫化物を酸化するが、硫黄や硫化物を還元して硫化水素を発生させるものがある。硫酸塩を還元して硫化水



素を生じさせるものとも重要なバクテリアは Desulfovibrio 属である。硫酸塩還元バクテリアは嫌気性であって、水素供給者としてはアルコール、アミノ酸、

写真二



炭水化物などの有機酸である。バクテリアがまず溶存酸素を消費し、ついですべての窒素化合物を還元するまでは下水中に硫化水素は生ぜず、これらより酸素の供給がなくなると、バクテリアは硫酸塩を還元して硫化水素を発生させるようになる。硫化水素を生じさせる原因としては、高 BOD、家庭および工場下水にふくまれる硫酸塩、高温度の下水、下水の流れの緩慢あるいはよどんだ場合の 4 点がいわれている。設計にあたって、硫化水素に関して考慮すべきことを列挙すればつぎのとおりである。

(1) 日最大 BOD は日平均 BOD の 50~100% 増である。また、デスポーザーの普及や新設工場についても検討し BOD の増加を考慮する。

(2) 将来の下水の温度は、家庭における温水器具の増加により、上昇することが考えられこれを考慮する。

(3) 下水流速は最低を 2 ft/sec (0.9 m/sec) としているが、最低流速については、デスポーザー使用増大による下水中の固形物の増加が考えられるので、固形物の堆積が生じないように考慮する。

(4) 下水管やポンプ井内は十分換気をすれば、生成された硫化水素は外部に放出され、下水に酸素を供給し、壁体を湿気から守り、硫化水素による被害を少なくする。将来のために施設に余裕をもたせる場合は、流速が低下し硫化水素の発生を助長するから、なお十分な換気施設を必要とする。圧力管については、管内は満流であるので腐食は生じないが、自由水面を有する所に流れ出た時にガスが放出されその箇所を腐食する。この場合も、このような場所は十分換気に気をつける。

(5) 硫化水素は流れに乱れが生ずると急速にガスを放出する。このような箇所は圧力管の出口、勾配急変部、急曲部、マンホールである。これらの箇所では乱れを少なくするようにする。

(6) 硫化水素の発生を防ぐことのできない箇所には耐食性材料の使用を必要とする。小口径管は陶管や耐酸性管を用いればよい。しかし、大口径管その他構造物は不透水性のものを塗布したり、コンクリートの厚みを厚くする。材料については今後研究の必要が多々ある。

(松崎 茂樹)