

定体積・排気・非排水条件における不飽和土の挙動

清水 正喜・福田 尚弘・南部 啓太
鳥取大学工学部土木工学科

Behavior of unsaturated soil under constant volume, drained pore-air and undrained pore-water conditions

Masayoshi SHIMIZU, Naohiro FUKUDA and Keita NAMBU
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University
Koyama, Tottori, 680-8552 Japan

Abstract: The one-dimensional compression test was conducted in which air pressure was decreased and then increased with the specimen's volume held constant under the undrained condition on a partly saturated specimen of cohesive soil. The behavior of the suction and the net vertical stress was observed. The validity of Bishop's definition of the effective stress for unsaturated soil was discussed based on the results of the test. One of conclusions is that the parameter would not be constant even when the volume is held constant without the drainage of pore-water.

Key words: unsaturated soil, effective stress, one-dimensional compression test, suction, net vertical stress

1. 序論

我が国のような湿潤な気候の土地であっても、土木工学の対象となる土は不飽和土であることが少なくない。しかしながら、不飽和土の力学挙動は未だ十分に解明されていない。

飽和土の変形と強度は有効応力に支配される。不飽和土の場合には、有効応力が存在するかどうか、また、存在するとすれば有効応力をどのように定義すればよいか、が重要な研究課題である。Bishop は次の有効応力式を提案した[1]。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

ここに、 σ ：垂直全応力、 u_a ：間隙空気圧、 u_w ：間隙水圧、 $\sigma - u_a$ ：基底応力 (σ_{net})、 $u_a - u_w$ ：サクシオン (s)。さらに、 χ は飽和度に依存するパラメータ (飽和状態で 1, 乾燥状態で 0) である[2]。

不飽和土では、定体積・非排水条件において、有効応力は変化しないと考えられる。本研究の目的は、Bishop によって有効応力の因子とされた基底応力とサクシオンの、そのような条件下での挙動を明らかにすることである。

この目的のために、所定のサクシオンを作用させて不飽和状態にした供試体に対して、非排水状態でひずみ制御圧縮を行った後、定体積・非排水状態で間隙空気圧を変化させる試験を行った。本論文では、特に定体積・非排水状態で間隙空気圧を変化させた際の、サクシオンと基底応力の挙動

を詳細に検討し、同時に Bishop の有効応力式の妥当性についても考察する。

2. 試料および供試体作製方法

試料は藤の森粘土で 425 μ m ふるいを通過し、75 μ m ふるいに残留したものを (表 1 および図 1) を使用した。気乾状態でふるい分けを行ったため、細粒分が約 65% 含まれている。含水比約 105% で十分練り返した後、直径 6cm、高さ 14cm の一次元圧密モールドに入れ、最大圧密圧力 49kPa で予圧密した。予圧密後、高さ 2cm に成

表 1 試料の物理的性質

ρ_s (g/cm ³)	wL(%)	WP(%)	IP
2.697	52.4	37.2	15.2

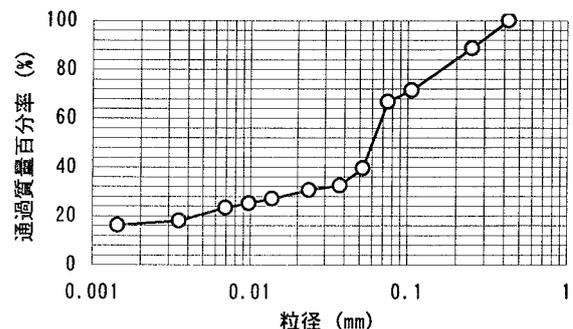


図 1 粒径加積曲線

形して供試体とした。尚、このとき供試体は飽和している。

3. 試験装置および方法

不飽和土一次元圧縮試験装置を三軸圧縮試験機に設置して、次の試験を実施した。前述の方法で準備した飽和供試体にサクシオンを作用させ不飽和にし、非排水状態でひずみ制御圧縮した後、定体積にして、間隙空気圧 u_a を所定の量だけ変化させた。一連の過程において、間隙水圧 u_w 、基底応力 σ_{net} 、サクシオン s を測定した。

3.1 試験装置

試験装置概略図を図2に示す。試験装置は圧密容器部分、圧力セル、圧力系統、計測装置から構成されている。

圧密容器底部にはセラミックディスク（直径54.5mm、厚さ7.7mm）、ポーラスストーン（直径10mm、厚さ8mm）を装着してある。セラミックディスクの空気侵入値は275kPaである。この値は従来方法[3]に従って決定した。

供試体からの蒸発を抑制するため、Yリング装着型載荷棒[4]を使用し、供試体上面（排気面）にガラス繊維布を敷いた。ガラス繊維布は上面排水軽減の効果も併せもつ。

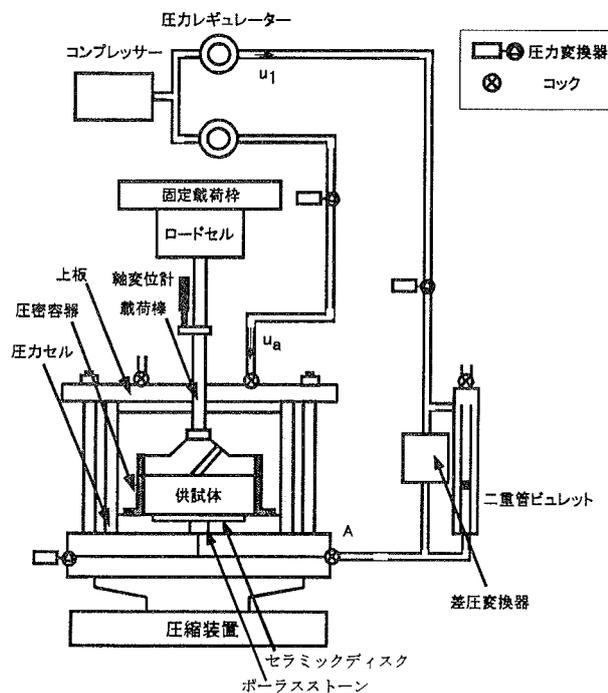


図2 装置概略図

供試体の体積変化量 ΔV は、 $\Delta V = \Delta d \times A$ で求めることができる。ここに、 Δd は軸変位計で測定した供試体軸変位量（圧縮を正とする）、 A は供試体断面積である。

排水過程（後述）における排水量 ΔV_w は二重管ビュレット内の水位の変動量を、差圧変換器によって測定した。

基底応力 σ_{net} はロードセルによる力の測定値から計算される。計算方法を付録に記した。

3.2 試験方法

(1) 手順

本研究で行った試験は、大別すると2つの過程に分けられる。第一の過程は排水コック（図2のA）を開いた状態でサクシオンを段階的に作用させ、供試体を不飽和化する排水過程であり、第二の過程は排水コックを閉じた非排水過程である。非排水過程はさらに軸方向圧縮過程と定体積過程に区分される。定体積過程はさらに応力緩和過程と間隙空気圧変化過程（間隙空気圧の減少および増加過程）に細分される。表2に試験過程を示す。

表2 試験過程

排水			
軸方向圧縮			
↓	非排水	定体積	応力緩和
			間隙空気圧変化
			減少 増加

排水過程において、サクシオンは加圧板法により作用させた。排水量の変化がなくなってから非排水過程に入った。サクシオンが平衡した後、軸方向圧縮を行った。圧縮台の上昇速度は、0.00229mm/min（供試体の高さが2cmのとき、0.0114%/minになるような速度）とした。軸方向圧縮は基底応力 σ_{net} が34kPaになるまで圧縮台を上昇させた。その後、定体積にして応力緩和の影響を調べた。

非排水・定体積・間隙空気圧変化過程においては、間隙空気圧を所定の値に変化させ、そのまま一定に保ち、基底応力とサクシオンの挙動を調べた。

(2) 試験条件

排水過程においてサクシオンは0→10→29→59→118→196→245(kPa)の順に段階的に作用さ

せた。各段階でサクシオンは排水量が平衡に達するまで作用させた。ただし高サクシオンの段階（196kPa および 245kPa）においては、排水量の平衡には 10000min 程度要すると考えられたが、空気侵入を避けるため約 2000min しか作用させてない。

図 3 は非排水過程における間隙空気圧の時間的変化を模式的に示したものである。図 3 において、(a)は非排水・定体積・応力緩和過程である。(b)は間隙空気圧減少過程、(c)は増加過程である。後の考察において期間(b)と期間(c)をさらに、室温変化が小さい期間（それぞれ期間(b1), (c1)）と、室温変化が大きい期間（それぞれ期間(b2), (c2)）に細分する。

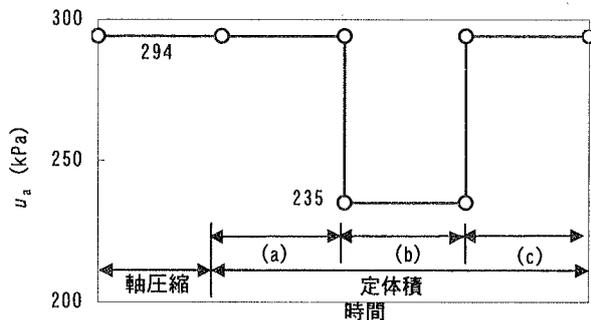


図 3 非排水過程における間隙空気圧の時間的変化（模式図）

4. 結果および考察

4.1 水分特性曲線

図 4 は排水過程の結果に基づく水分特性曲線である。同図より、サクシオンを 245kPa 作用させた時、供試体飽和度が約 72%まで下がっていることがわかる。

4.2 非排水過程の軸方向圧縮および定体積・応力緩和時の挙動

図 5 は非排水・軸方向圧縮過程および非排水・定体積・応力緩和過程の u_w , s , σ_{net} および ΔV と t の関係を示したものである。初期に圧縮台を上昇させているにもかかわらず、体積変化が起っていない。これは載荷棒と加圧板の間に隙間があったため、供試体が圧縮しなかったことを意味している。圧縮時において、 σ_{net} が上昇し u_w も上昇 (s は減少) した。このときの σ_{net} の増加

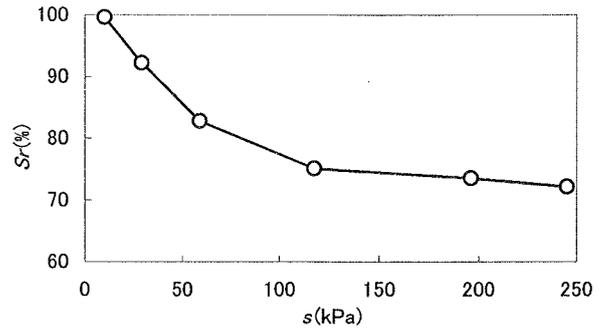


図 4 水分特性曲線

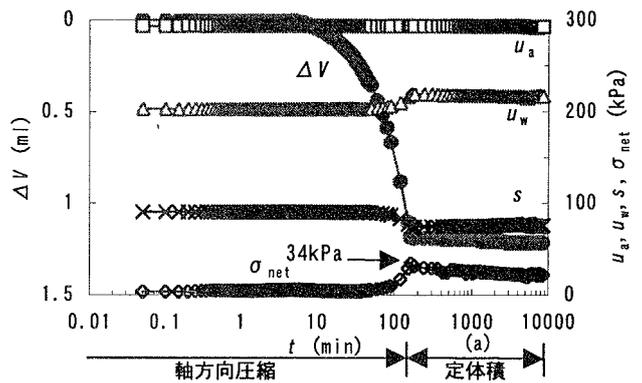


図 5 非排水・軸方向圧縮過程および非排水・定体積・応力緩和過程の挙動

量は 30kPa であり、 u_w の増加量は 17kPa (s の減少量は 17kPa) である。この結果は、Bishop の有効応力式において、 $0 < \chi < 1$ であることを考慮に入れると、有効応力が増加していることを意味する。圧縮後の定体積の状態（図 5 の(a)の期間)で応力緩和のため σ_{net} は減少し、 s は増加した。尚、定体積過程の有効応力については、4.5 で吟味する。

4.3 非排水・定体積・間隙空気圧変化過程の挙動

(1) 間隙空気圧減少時の挙動

図 6 に非排水・定体積・間隙空気圧減少過程の u_w , s , σ_{net} および ΔV と t の関係を示す。 u_a の減少により u_w も減少した。しかし、 u_w は u_a に比べて時間的に遅れて変化したので s は一時減少した。その後、 u_w の減少に伴って s は上昇し、一定になった。その結果、図 6 の b1 の期間において、 s は減少し σ_{net} は増加した。約 1 日経過した後（期間 b2）、 u_w と σ_{net} は徐々に減少 (s は増

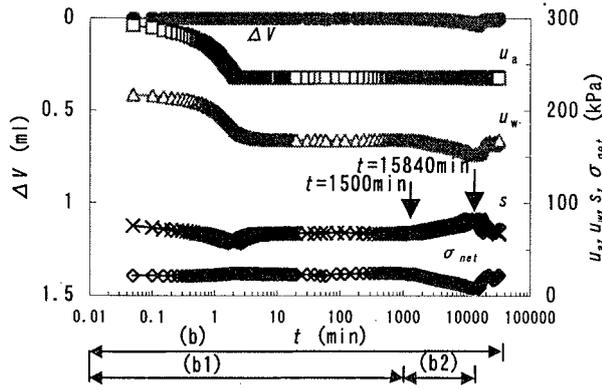


図6 非排水・定体積・間隙空気圧減少過程の挙動

加)した。これはエアコンの不調により室温が低下したためである。 $t=1500\text{min}$ のとき室温は 20.5°C であったが、 $t=15840\text{min}$ では 13.8°C まで下がっていた。その後、エアコンの回復によって室温は上昇し、 u_w と σ_{net} は徐々に増加 (s は減少)した。尚、この間、室温は連続的に測定していない。室温変化が大きいとき(b2)の挙動については、4.4 で詳しく述べる。

(2) 間隙空気圧増加時の挙動

図7に非排水・定体積・間隙空気圧増加過程の u_w , s , σ_{net} および ΔV と t の関係を示す。室温 T の変化も併せて示した。室温の変化が 0.1°C であった期間 c1 の挙動を見ると、 u_a の上昇により u_w は上昇した。しかし、 u_w は u_a に比べて時間的に遅れて変化したので s は一時増加したが、その後 80kPa で一定になった。その結果、期間 c1 においては s は上昇し σ_{net} は減少した。

以上の結果より、非排水・定体積状態で u_a を減少させると s が減少し σ_{net} は増加すること、反対に、 u_a を増加させると s が増加し、 σ_{net} は減少することがわかった。この結果に対する Bishop の有効応力式の適用性について 4.5 で考察する。また、 u_a は $294\text{kPa} \rightarrow 235\text{kPa} \rightarrow 294\text{kPa}$ と減少および増加させて、元の値に戻したにも関わらず、 s と σ_{net} の変化にはヒステリシスが生じた。即ち、 u_a の変化サイクル後、 s は元の値より大きくなり、 σ_{net} は小さくなった。

4.4 室温変化時の挙動

図7の $t=1000\text{min}$ あたりから 3500min まで(期間 c2)室温 T が低下し、それに伴って σ_{net} は減少し s は上昇した。その後も $\pm 1^\circ\text{C}$ 程度の範

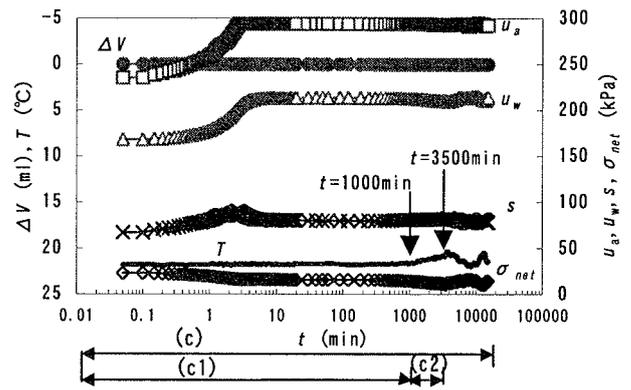


図7 非排水・定体積・間隙空気圧増加過程の挙動

囲で T は変化し、 σ_{net} と s が変化している。つまり、 s および σ_{net} は T の変化と関連性があることがわかる。具体的には、 T が上昇すると σ_{net} と u_w は増加 (s は減少)し、 T が低下すると σ_{net} と u_w は減少 (s は増加)すると考えられる。

しかしながら、計測機器が室温変化による影響を受けている可能性があるためその影響を調べた。 σ_{net} を計測するロードセルは無負荷状態で室温が 4°C 低下しても出力値は変化せず、間隙水圧計および間隙空気圧計は 0.5kPa だけ増加した。したがって、図7に示したような室温変化量に対して、使用した計測機器が受ける室温変化の影響は無視してもよいほど小さいといえる。また、室温が変化した場合、三軸圧縮試験機の载荷枠の支柱 (86cm) の長さが増えるため供試体の体積は変化する。支柱は鉄製であり、鉄の線膨張率 ($1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$) を用いると 1°C 低下した場合支柱は 0.001cm 縮むことになるので供試体も 0.001cm (0.028cm^3) 程度圧縮することになり、厳密には定体積を保てないことがわかる。

4.5 Bishop の有効応力式の検討

含水比および間隙比が一定であると有効応力は変化しないと仮定すると、定体積・非排水条件では有効応力は一定 ($\Delta\sigma' = 0$) である。Bishop の有効応力式では

$$\Delta\sigma_{\text{net}} + \chi\Delta s = 0 \quad (2)$$

となる。このとき χ は $-\Delta\sigma_{\text{net}}/\Delta s$ となる。表3に各段階における $\Delta\sigma_{\text{net}}$, Δs および $-\Delta\sigma_{\text{net}}/\Delta s$ を示す。室温変化が 1°C 未満の場合は定体積であると仮定すると $-\Delta\sigma_{\text{net}}/\Delta s$ は χ となるが、 1°C 以上(表の()で囲った部分)では χ とはいえない。したがって、以下の考察においては χ とは呼ばな

表 3 非排水・定体積過程の各段階における
 $\Delta\sigma_{net}$, Δs および $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$

期間	Δu_a (kPa)	$\Delta\sigma_{net}$ (kPa)	Δs (kPa)	ΔT (°C)	$-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$
a	0	-13	2	0.3	6.5
b	-59	1	-8	1.3	(0.13)
b1	-59	2	-8	0.1	0.25
b2	0	-12	10	-6.7	(1.2)
c	59	-9	11	-0.4	0.82
c1	59	-8	14	-0.1	0.57
c2	0	-4	1	-1.1	(4)

いことにする。

表のすべての結果において $\Delta\sigma_{net}$ と Δs の関係は、一方が増加すると他方が減少する（あるいはその逆の）傾向がある。これは式 (2) から予想されるとおり、Bishop の有効応力式に反していない。しかしながら、 $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ の大きさはすべて異なっている。これには、室温、間隙空気圧の増減および応力緩和が影響しているものと考えられる。

まず、室温変化の影響について考察する。図 8 は各期間における $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ と ΔT の関係を示したものである。図 8 より、期間 b1 に比べて b2 では室温は低下し、 $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は大きくなり、b1 に比べて b では室温変化量が大きく、 $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は小さくなっている。期間 c1 と c2 および c1 と c においても同様である。これらの結果より、 $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は室温が上昇すると小さくなり、室温が低下すると大きくなる傾向にあることがわかる。

室温変化量が 1°C 未満であった場合の結果に対して、 u_a の増減の影響について考える。表 3 において期間 b1 と c1 を比較すると、符号が異なっているが u_a の変化量は同じである。 $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は u_a の変化量が同じであるにもかかわらず異なっている。したがって、 u_a の増減の影響も受けていることがわかる。

期間 a に関して $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は大きな値となっているが、これは応力緩和により σ_{net} が大きく減少したことが影響していると考えられる。

先に考察したように室温変化が大きい場合には体積が一定になっていないと推察できる。実際、表 3 では室温変化が大きい時には $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ が 1 より大きくなるか極端に小さい値となっている。室温変化が小さく定体積条件が満たされるような場合には $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ ($=\chi$) は u_a の増減によって大きくは変化しないが、一定と見なすことはできない。したがって、定体積・非排水条件下で u_a が変化した場合や応力緩和時には、Bishop が提

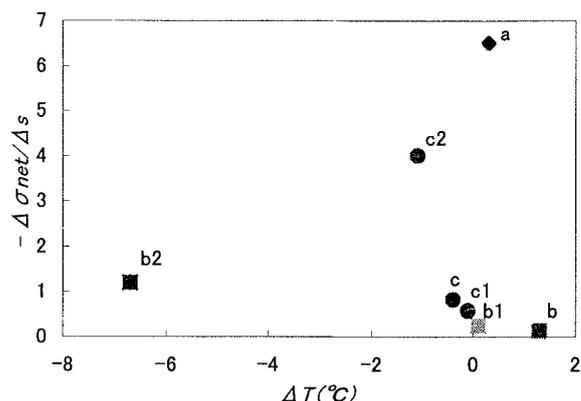


図 8 各期間における $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ と ΔT の関係

案した有効応力は適切でないと言える。しかし、室温変化が小さい場合、即ち、土質試験において通常許容される室温変化時においても、微小な体積変化が起こっている可能性があるため、より厳密な議論をするためには、室温変化が起こらない条件下で試験を行う必要がある。

5. 結論

本研究では、不飽和土の変形挙動に有効な応力の因子として、Bishop 同様基底応力とサクシオンを取り上げた。

不飽和土の排気・非排水試験を行い、軸方向圧縮時および定体積状態で間隙空気圧を変化させた際の、サクシオンと基底応力の挙動について調べた。

以下に本研究により得られた結論を要約する。

軸方向圧縮過程において、基底応力は増加しサクシオンは減少した。このとき、基底応力の上昇量はサクシオンの減少量に比べ大きくなった。これは、Bishop の有効応力式において、 $0 < \chi < 1$ であることを考慮すると、有効応力が増加したことを意味する。よって、Bishop の有効応力式はこの現象を説明できる。

定体積・排気・非排水状態で間隙空気圧を変化させた結果、サクシオンと基底応力は相対的に変化した。具体的には、間隙空気圧が減少（増加）するとサクシオンは減少（増加）し、基底応力は増加（減少）した。このことから、サクシオンと基底応力の間には負の相関性があることがわかる。また、このような負の相関性は、室温変化時にも現れた。つまり、室温が上昇（低下）するとサクシオンは減少（増加）し、基底応力は増加（減少）した。

各段階での $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s$ は室温変化，応力緩和および間隙空気圧の増減の影響を受ける．また，室温変化，応力緩和が起こらない時においても，定体積・非排水状態での $-\Delta\sigma_{net}/\Delta s (= \chi)$ は飽和度が一定であるにもかかわらず，一定の値にはならなかった．

以上のことから，定体積・非排水条件下で間隙空気圧が変化した場合や応力緩和について，Bishop が提案した有効応力が適用できないといえる．

今回行った試験においては供試体飽和度が約 70% と比較的高い．今後は低い飽和度の供試体を用いた試験を行い，さらなる検討をしていきたいと考えている．

参考文献

- [1] Bishop, A. W. et al : Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils, ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp.503-532, 1960
- [2] 土質工学会：ジオテクノート 5 不飽和土，pp.9-13, 1993.
- [3] 地盤工学会：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，p.532, 2000.
- [4] 清水正喜・今村乗仁・小川博史：第 52 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.361-362, 2000.

付録 基底応力 σ_{net} の算出方法

図 9 に载荷棒および加圧板に作用する鉛直方向の力を図示した．各記号の意味は以下の通りである：

F_L ：载荷棒がロードセルを押す力の反力（ロードセルによって測定される力）

W_1 ：载荷棒の自重

U_1 ：载荷棒下面に作用する空気圧の合力
($=u_a \times A_p$ ． A_p は载荷棒断面積)

F_1 ：加圧板が载荷棒を押す力

F_2 ：载荷棒が加圧板を押す力 ($=F_1$)

U_2 ：加圧板上面に作用する空気圧の合力 ($=u_a$

$\times A$ ． A は供試体断面積)

U_a ：加圧板下面に作用する間隙空気圧の合力
($=U_2$)

W_2 ：加圧板の自重

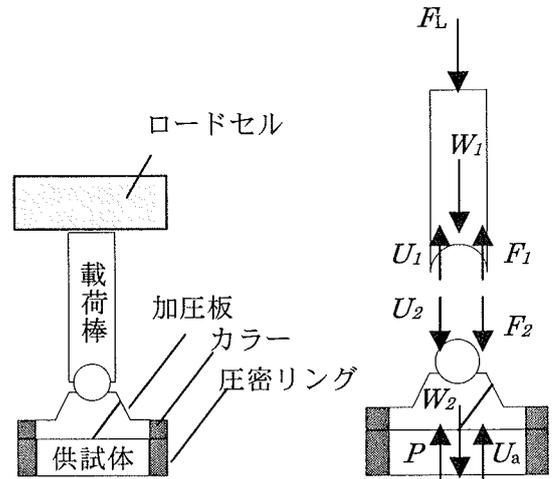


図 9 载荷棒および加圧板に作用する力

P ：加圧板が供試体を押す力の反力

P を供試体断面積 A で除したものが基底応力 σ_{net} である．

加圧板に作用する鉛直方向の力のつりあい式は

$$F_2 + U_2 + W_2 - U_a - P = 0 \quad (3)$$

したがって， $U_2 = U_a$ であることを考慮すると

$$F_2 = P - W_2 \quad (4)$$

载荷棒に作用する鉛直方向の力のつりあい式は

$$F_L + W_1 - U_1 - F_1 = 0 \quad (5)$$

したがって，

$$F_1 = F_L + W_1 - U_1 \quad (6)$$

$F_1 = F_2$ であるから，(4)，(6) 式より

$$P = F_L + W_1 + W_2 - U_1 \quad (7)$$

となる．したがって

$$\sigma_{net} = \frac{P}{A} = \frac{F_L + W_1 + W_2 - U_1}{A} \quad (8)$$

となる．

(受理 平成 15 年 9 月 30 日)