

第3章 K_0 圧密による K_0 値の挙動

3-1 目的

砂地盤の液状化対策の一つとして過圧密を利用した工法がある。地盤に過圧密履歴を与える工法として、載荷盛土工法と地下水位低下工法が挙げられる。載荷盛土工法とは、盛土を構築し地盤の圧密挙動が安定した後、盛土を取り除く工法であり、地下水位低下工法とは、地下水位を低下させた後にまた地下水位を元に戻す工法である。

これまで過圧密履歴を受けた砂の液状化強度およびその増加傾向を調べるために、室内試験が行われてきたが、その中でも繰返し三軸試験が最も多く行われてきた。この試験では等方圧密した供試体が用いられるが、地盤の初期応力状態が等方状態であるのはまれなことであり、繰返し載荷時に供試体に側方変位が生じるため、地震時における地盤内の応力状態を正確に再現することはできない。

そこで、本章では、二重セル型中空ねじり試験装置を用いて、最も効果的な過圧密工法の適用について検討するため、載荷盛土工法、地下水位低下工法およびこれら二つの工法を組み合わせた場合における過圧密時の応力履歴を軸圧制御および背圧制御で再現し、水平地盤内での応力状態を再現する K_0 応力条件下での K_0 値の挙動について調べた。

3-2 概要

本章では常陸那珂砂を用い、空中落下法により相対密度 45%になるように供試体を作製し、二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用いて、載荷盛土工法、地下水位低下工法および2つの工法を組み合わせた場合を想定し、軸圧制御および背圧制御により過圧密履歴を与えたときの K_0 値の挙動を調べた。

実験ケースを表 3-1, 3-2 に示す。ここで、 K_0 圧密の場合の過圧密比 $(OCR)_v$ は、過圧密時に与えた最大の鉛直有効応力 σ_v' と繰返し載荷直前の初期鉛直有効応力 σ_{v0}' の比で定義した。

なお、初期有効拘束圧 σ_o' は、初期鉛直有効応力 σ_{v0}' と初期水平有効応力 σ_{h0}' を用いて、 $(\sigma_{v0}' + 2\sigma_{h0}')/3$ で表される。また、これを K_0 値と初期有効拘束圧 σ_{v0}' で表すと $(1 + 2K_0)\sigma_{v0}'/3$ となるため、初期鉛直有効応力 σ_{v0}' の値が大きいほど初期有効拘束圧 σ_o' の値は大きくなる。

K_0 圧密試験では、初期状態を水平有効応力、鉛直有効応力共に 19.6kPa、つまり $K_0=1$ とし、その後、軸圧の載荷により水平地盤の応力状態と仮定した鉛直有効応力 $\sigma_v'=49$ kPa の状態にし、その点から軸圧の載荷、または背圧の減少により試験を開始した。

表 3 - 1 実験ケース

実験ケース	応力履歴	過圧密比 (OCR) _v	圧密終了 後のK ₀ 値
(A)	軸圧制御	2	1.018
(B)	軸圧制御	3	1.634
(C)	背圧制御	2	0.416
(D)	背圧制御	3	0.427
(E)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	3	1.072
(F)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒軸圧除荷⇒背圧増加	3	0.983
(G)	軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧減少⇒背圧増加	3	1.131
(H)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒背圧増加⇒軸圧除荷	3	1.001
(I)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	2	1.131
(J)	背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷	2	0.862

表 3 - 2 実験ケース

ケース	応力履歴	軸圧 制御	背圧 制御	圧密終了後のK ₀ 値
(a)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	1	1	1.072
(b)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	1	4	0.684
(c)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	2	3	0.637
(d)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	3	2	1.051
(e)	軸圧載荷⇒背圧減少⇒背圧増加⇒軸圧除荷	4	1	1.256
(f)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	1	1	0.862
(g)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	1	4	0.404
(h)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	2	3	0.676
(i)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	3	2	0.75
(j)	背圧減少⇒軸圧載荷⇒軸圧除荷⇒背圧増加	4	1	1.188

3-3 K_0 値の挙動

3-3-1 軸圧制御および背圧制御による K_0 圧密

図 3-1, 3-2 に軸圧制御で行ったケース(A),(B)の K_0 圧密試験における K_0 値と鉛直有効応力 σ_v' の関係を示す。軸圧制御では、初期状態から鉛直有効応力 σ_v' を 49 kPa まで載荷後、軸圧の載荷、除荷を行った。両図において、軸圧の載荷を始めると K_0 値は減少しているが、鉛直有効応力 σ_v' が 50 kPa を超えると 0.5~0.7 の間で増減している。その後軸圧を除荷すると、 K_0 値は除荷の進行と共に増加していることが確認できる。これは、鉛直有効応力 σ_v' が 49 kPa に増加するまでは体積変化により側方変位が供試体の膨張する方向に少しずつ生じようとするが、その変位が K_0 圧密の制御範囲内であるため K_0 値が減少するのに対し、 σ_v' が 50 kPa を超えると、側方変位が K_0 圧密の制御範囲を超えて生じようとするが、その変位は拘束されているため水平有効応力 σ_h' が増加し、 K_0 値が 0.5~0.7 の間で増減したものと推察される。また軸圧の除荷において K_0 値が増加したのは、正規圧密過程において粒子構造がある程度安定化し、軸圧除荷過程において水平方向の変位が生じなかったためであると推察される。この結果、繰返し載荷直前の K_0 値は増加し、初期有効拘束圧 σ_o' も増加する。よって、軸圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)_v が大きくなるにつれて K_0 値は増加し、それに伴い初期有効拘束圧 σ_o' も大きくなることが明らかとなった。

図 3-3, 3-4 は背圧制御で行ったケース(C),(D)の K_0 圧密試験における K_0 値と鉛直有効応力 σ_v' の関係を示したものである。軸圧制御と同様に、初期状態から鉛直有効応力 σ_v' を 49 kPa まで載荷し、その後背圧の減少、増加を行った。両図より、 K_0 値は背圧の減少において増加し、背圧の増加において減少している。これらの背圧の減少・増加における K_0 値の挙動はほぼ同一経路に沿っていることが確認できる。これは、背圧制御において鉛直有効応力と水平有効応力が等方的に作用したため側方変位がほとんど現れず、鉛直有効応力と水平有効応力が背圧の変化分と同等に変化した、すなわち、等方的に応力が変化したためと推察される。このことから、背圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)_v が変化しても最終的な K_0 値は変化せず、繰返し載荷直前の初期有効拘束圧 σ_o' も変化しないと考えられる。

3-3-2 二つの工法を組み合わせた場合の K_0 圧密

図 3-5~3-10 に軸圧制御と背圧制御を組み合わせで行ったケース(E)~(J)の K_0 圧密試験における K_0 値と鉛直有効応力 σ_v' の関係を示す。初期条件は軸圧制御のみ、背圧制御のみのケースと同様に鉛直・水平有効応力共に 19.6kPa とし、軸圧の載荷により鉛直有効応力 σ_v' を 49 kPa まで載荷し、その後軸圧制御および背圧制御を組み合わせ K_0 圧密試験を行った。

図 3-5 のケース(E)において、 K_0 値は、鉛直有効応力 σ_v' が 49kPa を超えたところで

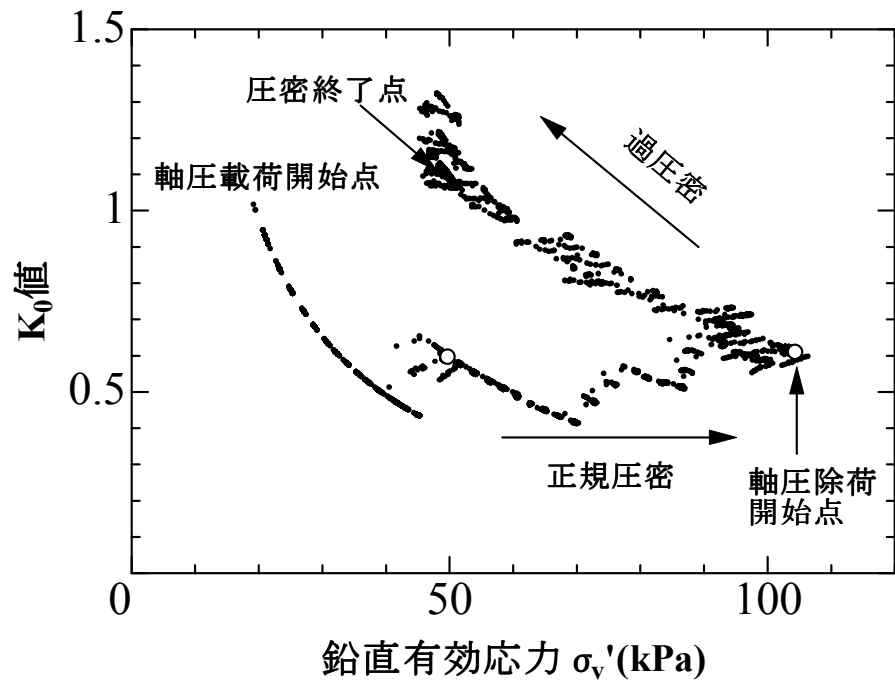


図 3-1 K_0 値の挙動(ケース (A))

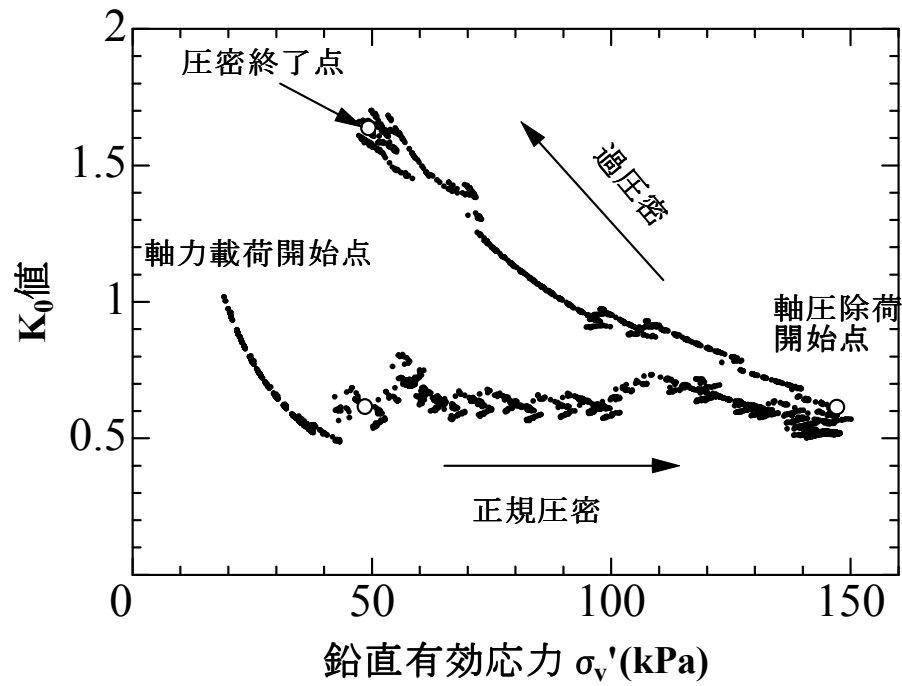


図 3-2 K_0 値の挙動(ケース (B))

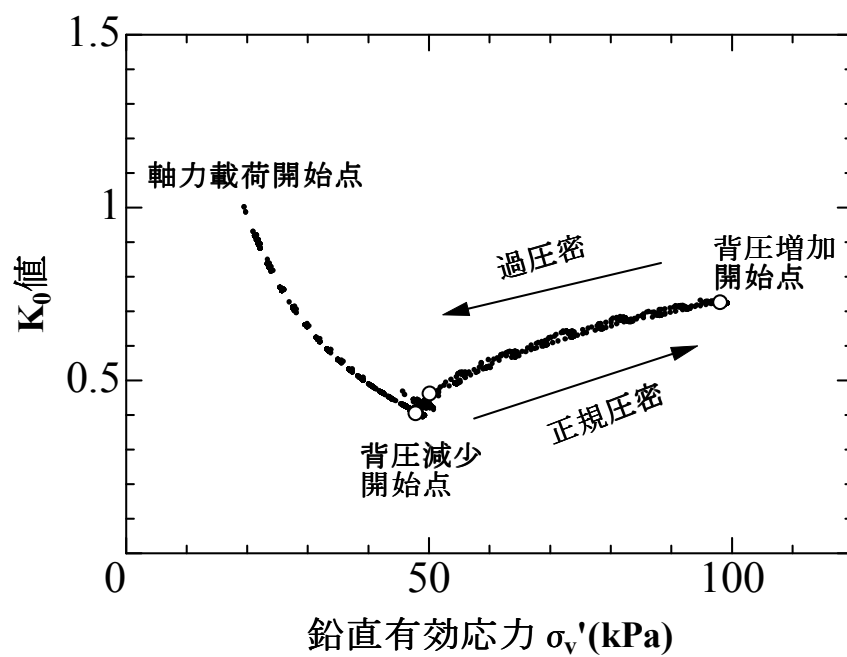


図 3-3 K_0 値の挙動(ケース (C))

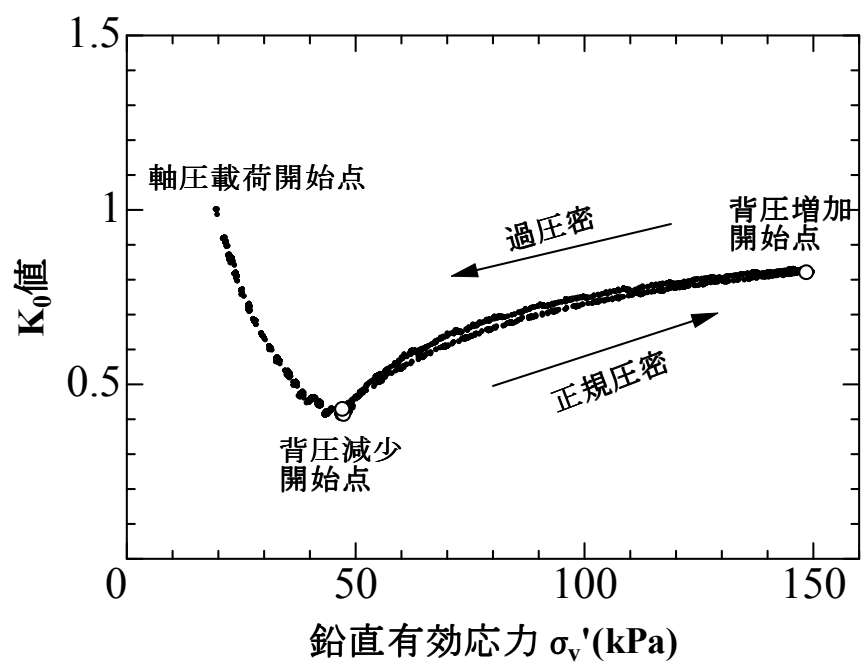


図 3-4 K_0 値の挙動(ケース (D))

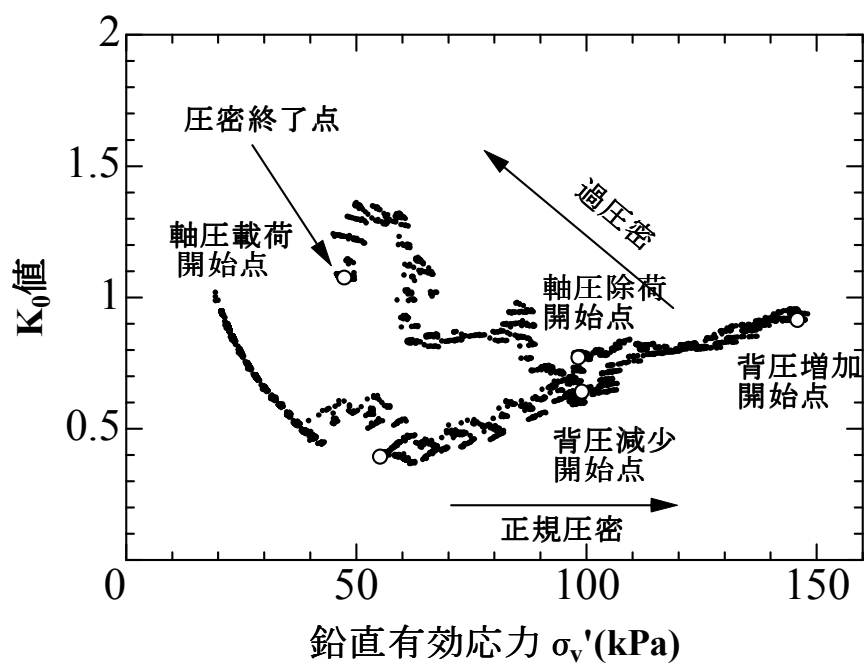


図 3-5 K_0 値の挙動(ケース (E))

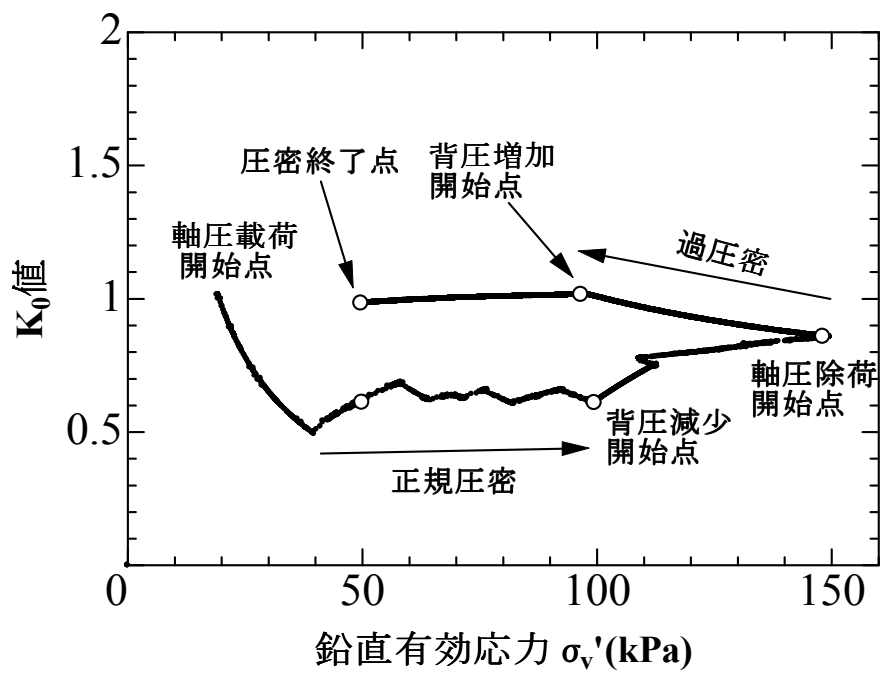


図 3-6 K_0 値の挙動(ケース (F))

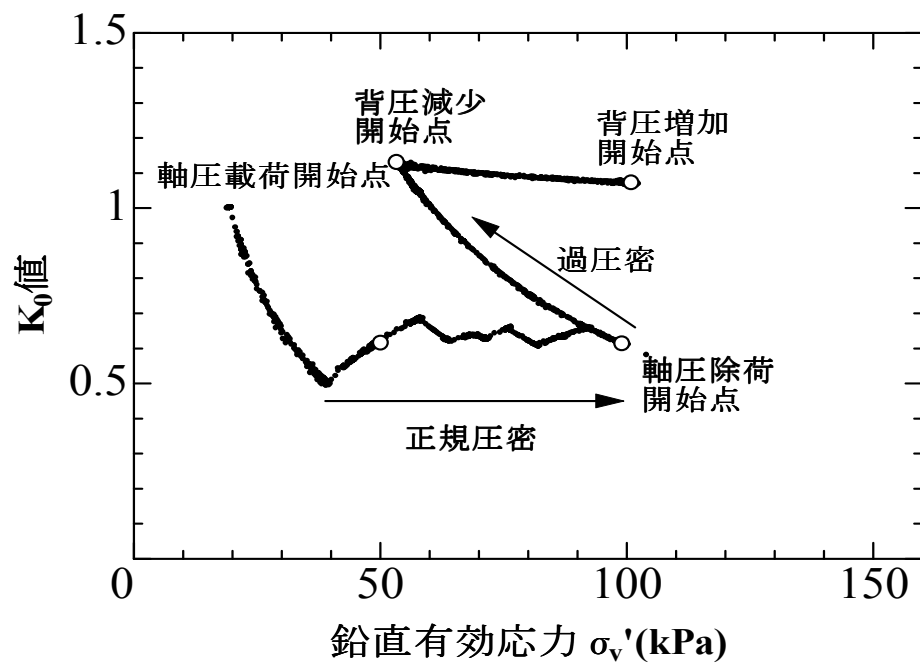


図 3-7 K_0 値の挙動(ケース (G))

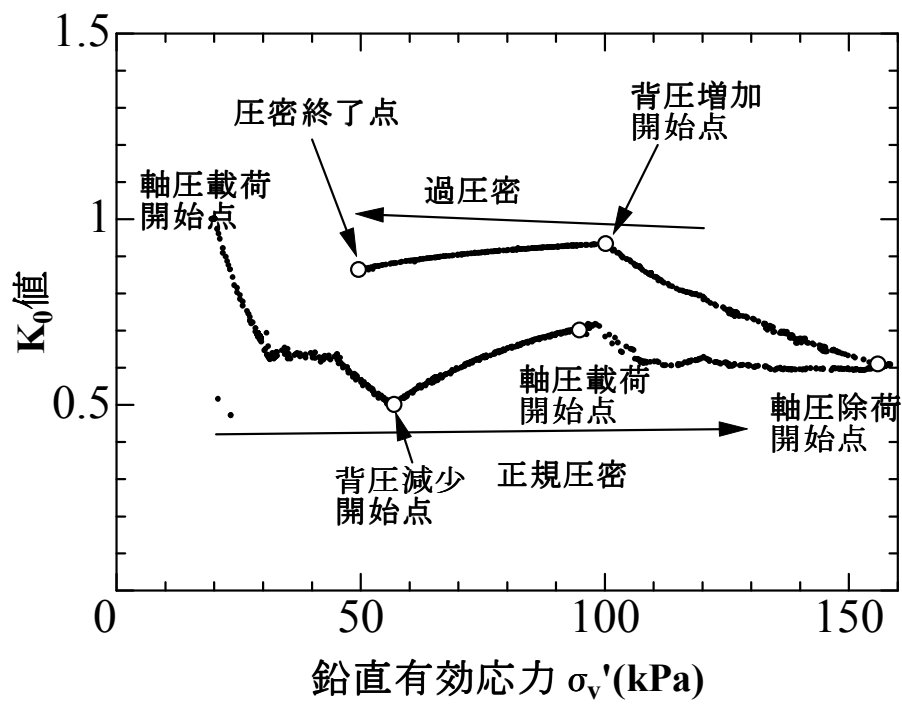


図 3-8 K_0 値の挙動(ケース (H))

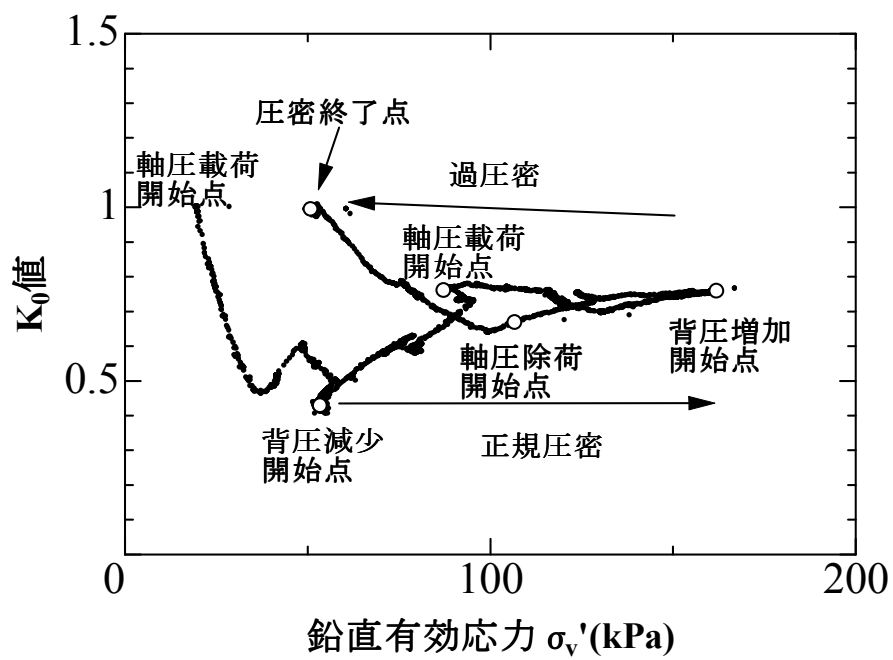


図 3-9 K_0 値の挙動(ケース (I))

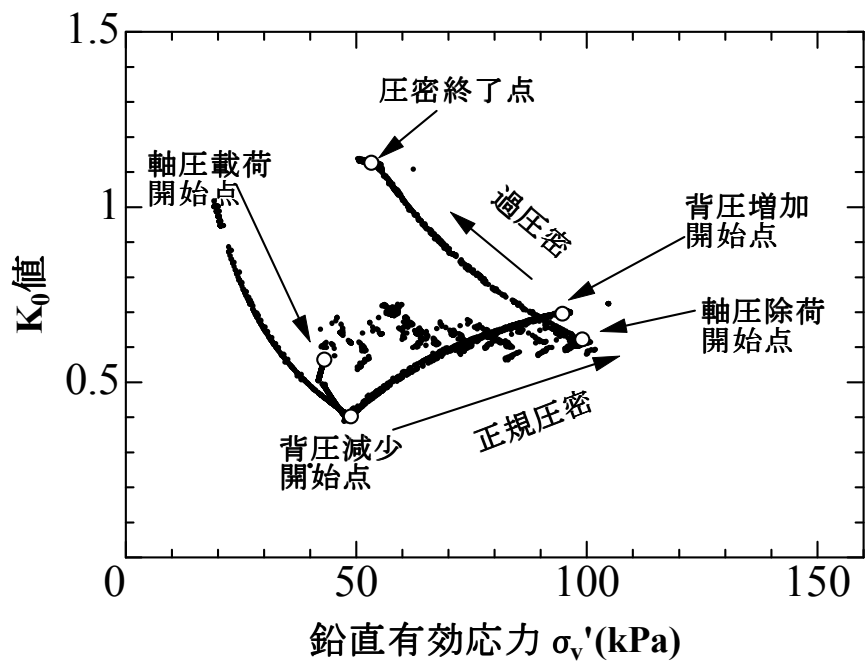


図 3-10 K_0 値の挙動(ケース (J))

0.5～0.7の間を変動し、その後背圧減少により増加し、背圧の増加時において減少し、背圧減少時と同じラインに戻るが、軸圧除荷で一転して増加を始める。このケースでは、98kPa 付近から軸圧除荷を行ったため、 K_0 値の増加が著しく生じることから、過圧密過程においては過圧密比が大きくなるほど、繰返し載荷直前の K_0 値は大きくなり、初期有効拘束圧 σ'_0 も大きくなると推察される。

一方、図 3-6 のケース(F) における K_0 値は、鉛直有効応力 σ'_v が 49kPa を超えた所で 0.5～0.7の間を変動し、背圧減少により増加し、軸圧除荷により更に増加するが、背圧の増加により減少を始める。ここで軸圧除荷において、軸圧制御のみの場合を見ても分かるように鉛直有効応力が高いところでは K_0 値の増加が小さい。またこの時、圧密終了時における K_0 値は軸圧除荷終了時における K_0 値から非常に緩い傾きで減少傾向にあり、背圧の除荷と載荷では傾きが変化していることが確認できる。これは、背圧の減少と増加の間に軸圧を除荷しているため、鉛直応力と水平応力がほぼ等しい状態にある中で、背圧増加による鉛直有効応力と水平有効応力の等方的な作用が起こったためと推察される。このことから、このケースでは過圧密過程において過圧密比が大きくなるほど繰返し載荷直前における K_0 値が大きくなるとは一概に言えず、それによって初期有効拘束圧 σ'_0 が大きくなるとは言えないと推察される。

また、図 3-7 のケース(G) での K_0 値は、鉛直有効応力 σ'_0 が 49kPa を超えると 0.5～0.7の間を変動している。その後、軸圧を除荷したことで増加し、背圧の減少によりわずかに減少、背圧の増加によりまたわずかに増加しているが、ここでもほぼ同一のラインを通過していることが確認できる。このため、軸圧除荷終了時と背圧増加終了時の K_0 値が変化していない。このケースでは、軸圧の除荷時に K_0 値の増加が大きく生じていることから、過圧密過程においては過圧密比が大きくなるほど繰返し載荷直前の K_0 値は大きくなり、初期有効拘束圧 σ'_0 も大きくなると推察される。

図 3-8 のケース(H) において、 K_0 値は、背圧の減少により増加し、軸圧載荷により 0.5～0.7の間を変動し、軸圧除荷により増加、背圧増加により減少している。この場合、背圧の減少と増加の間に軸圧を載荷・除荷しているため、ケース(F)と同様な現象により背圧の減少・増加で同一ラインを通らない。そのため、 K_0 値の減少も緩やかになったものと推察される。

さらに、図 3-9 のケース(I)での K_0 値は、背圧減少により増加し、軸圧載荷により 0.7～0.8の間を変動している。その後背圧増加により減少し、軸圧除荷により増加している。このケースでは、98kPa 付近から軸圧除荷を行ったため、 K_0 値の増加が著しく生じることから、過圧密過程において過圧密比が大きくなるほど繰返し載荷直前の K_0 値は大きくなり、初期有効拘束圧 σ'_0 も大きくなると考えられる。この組み合わせの場合、背圧制御により等方的な応力変化は起こるが、背圧制御の間にある軸圧載荷により鉛直方向の応力のみが増加したため、背圧の減少・増加開始時の応力レベルが異なるため、その減少と増加による K_0 値の変化、すなわちここでは曲線の傾きに違いが見られたものと推察される。

図 3-10 のケース(J)における K_0 値は、背圧の減少で増加し、背圧の増加で減少し、同一ラインを通っている。その後、軸圧載荷により 0.5～0.7の間を変動し、軸圧除荷により

増加している。このケースでは、ケース(G)と同様に軸圧制御のみ、背圧制御のみの圧密における K_0 値の挙動が非常に反映された結果を示している。また、この場合も過圧密過程においては過圧密比が大きくなるほど、繰返し載荷直前の K_0 値は大きくなり、初期有効拘束圧 σ_o' も大きくなると推察される。

このように、ほとんどのケースでケース(A)～(D)の軸圧制御のみ、背圧制御のみの K_0 値の挙動を大きく反映した結果を示していることが確認できる。しかし、図 3-6, 3-8 のように軸圧制御のみ、背圧制御のみの場合とは異なった K_0 値の挙動を示したことも確認できる。

図 3-6, 3-8 においては、圧密終了後の K_0 値が若干小さい値を示していることが確認できる。これは、軸圧除荷時において鉛直有効応力が高い値を示している場合、軸圧除荷による K_0 値の増加が緩やかになるためであると推察される。また、図 3-6, 3-8 において、背圧増加により K_0 値は減少傾向にあるが、図 3-7 のように背圧増加時に K_0 値が増加傾向にある場合も見られる。これは背圧制御の場合、鉛直・水平有効応力が等方的に作用することで K_0 値は増加・減少するため、背圧増加開始点の K_0 値が 1 よりも大きい場合 K_0 値は増加し、それが 1 よりも小さい場合減少するものと考えられる。

このように、軸圧制御と背圧制御を組み合わせた場合において K_0 圧密試験における K_0 値の挙動を確認したが、表 3-1 に示すように圧密終了後の K_0 値には違いが見られる。その中でも軸圧制御による K_0 圧密が K_0 値の挙動に大きく影響を与えていることが確認できる。つまり、載荷盛土工法と地下水位低下工法を組み合わせで適用した場合、適用する順序によって K_0 値の挙動は異なり、過圧密後の K_0 値には違いが生じるものと考えられる。また、 K_0 値が大きいということは初期有効拘束圧 σ_o' も大きくなるということであり、これは繰返し応力比が増加する傾向にあるため、ケース(E), (G), (I), (J)では特に液状化強度の増加が期待できるものと考えられる。

3-3-3 応力比を変えて組み合わせた場合の K_0 値の挙動

本試験は、3-3-2 で K_0 値の増加に効果的であったケース (E) とケース(G)において、軸圧制御と背圧制御での鉛直有効応力の変化割合を変えて行ったものである。

図 3-11～図 3-15 はケース(E)の適用順序で行った K_0 圧密試験における K_0 値と鉛直有効応力 σ_v' の関係を示したものである。基本的な K_0 値の挙動は図 3-5 に示したケース(E)の結果と同様である。すなわち、鉛直有効応力 σ_v' が 49kPa に達する時点より軸圧の載荷を行うと、鉛直有効応力 σ_v' が 98kPa に達するまで K_0 値には大きな変化はない。これは、鉛直有効応力 σ_v' が増加することで側面が膨張して体積変化を起こそうとしているが、水平変位を拘束しているために水平有効応力 σ_h' も増加したためと考えられる。次に、背圧の減少過程においては K_0 値が増加し、背圧の増加過程においては K_0 値が減少している。この過程において K_0 値の挙動はほぼ同一経路に沿っていることがわかる。この理由としては水平変位がほとんど現れず、鉛直有効応力 σ_v' 、水平有効応力 σ_h' が共に背圧の変化分だけ等方的に変化したためであると考えられる。次の段階の軸圧除荷においては、 K_0 値が

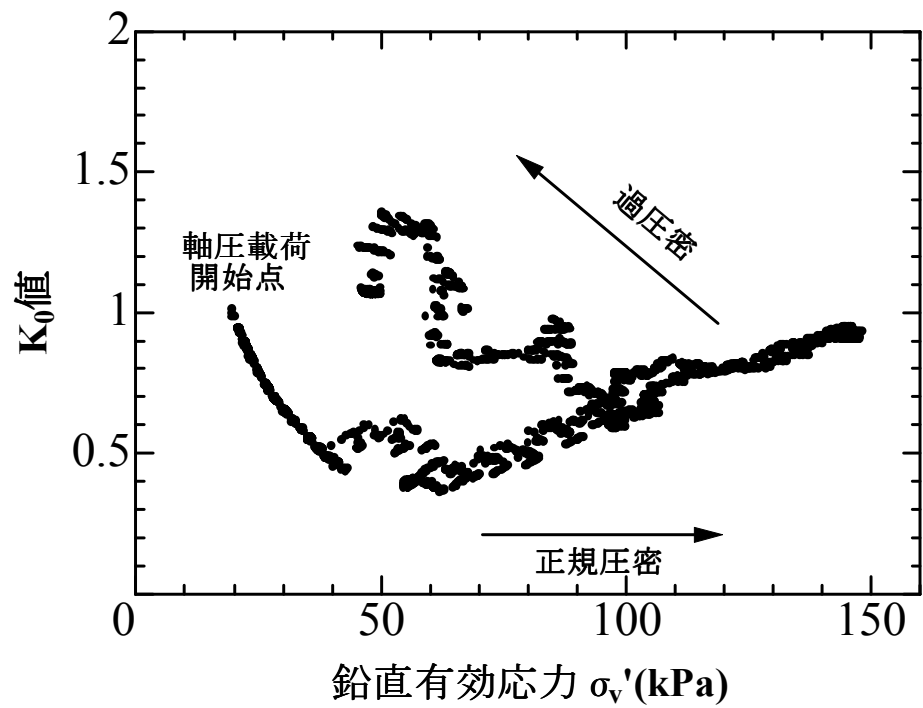


図 3-11 K_0 値の挙動 (ケース (a))

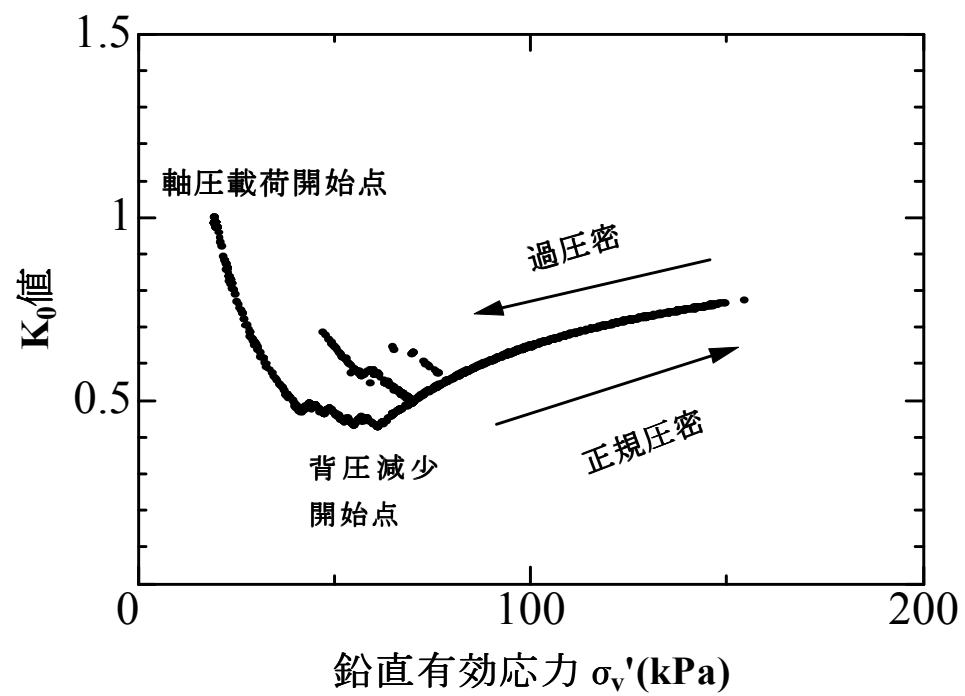


図 3-12 K_0 値の挙動 (ケース (b))

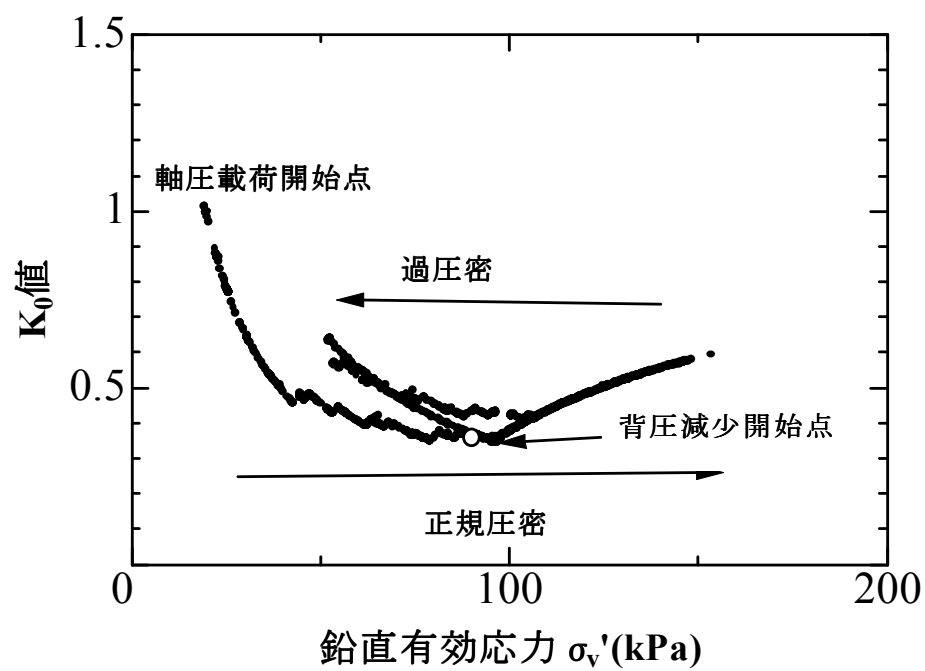


図 3-13 K_0 値の挙動 (ケース (c))

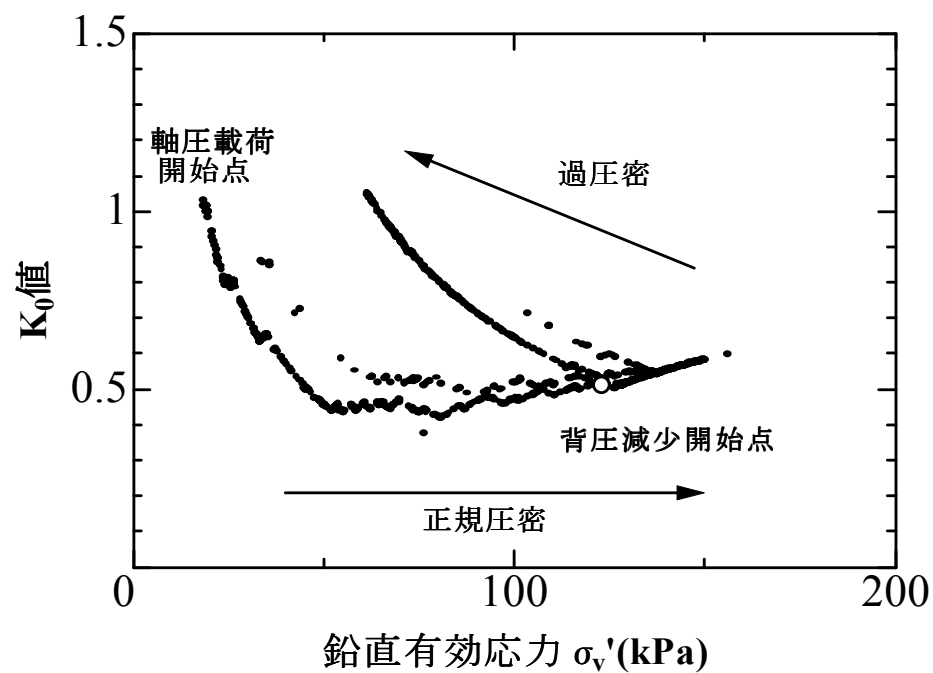


図 3-14 K_0 値の挙動 (ケース (d))

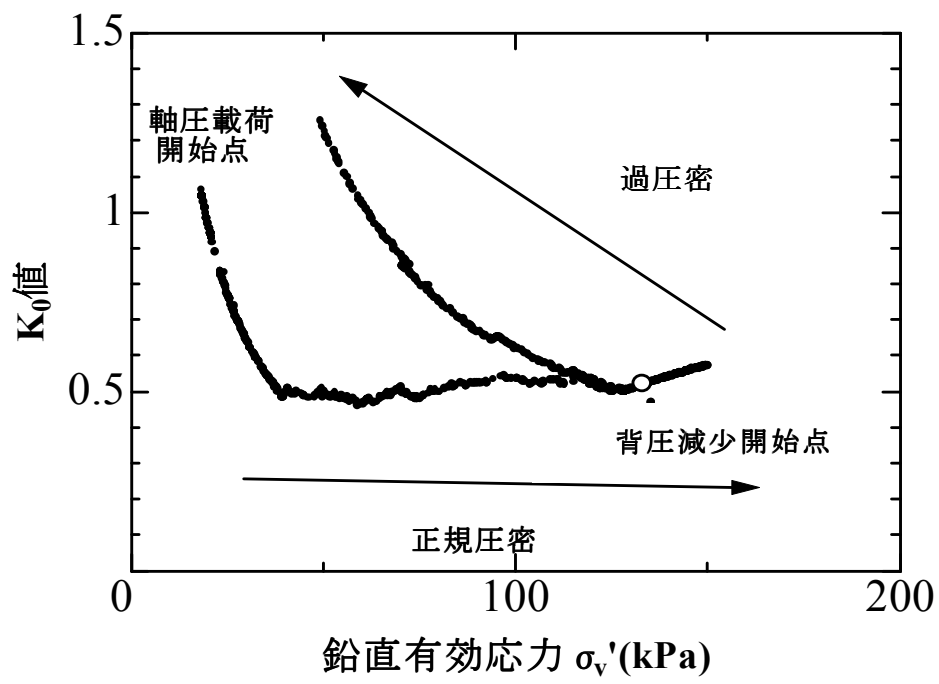


図 3-15 K_0 値の挙動 (ケース (e))

が増加している。これは、軸圧の載荷過程で体積変化が生じないために水平有効応力 σ_h' が増加し、軸圧の除荷課程で鉛直有効応力は減少するが、 σ_h' はあまり変化せず、 K_0 値の分子の割合が増加したためであると考えられる。よって、過圧密比を増加させると K_0 値が増加することが確認できる。

図 3-16～図 3-20 は、ケース(G)の K_0 圧密試験における K_0 値と鉛直有効応力 σ_v' の関係を示したものである。この場合も、図 3-7 に示したケース(G)の結果と基本的に同様の K_0 値の挙動を示している。すなわち、鉛直有効応力 σ_v' が 49kPa を超えたところで背圧の減少を行うと、鉛直有効応力 σ_v' を 98kPa まで増加させた間に、 K_0 値が多少増加している。これは、背圧を減少し始めてから供試体に等方的に有効応力が作用することで鉛直有効応力 σ_v' に対する水平有効応力 σ_h' の割合が上昇したためであると考えられる。次に、軸圧の載荷過程においては、 K_0 値が減少している。これは、ケース(E)の K_0 圧密試験の場合と同様に、鉛直有効応力 σ_v' が増加することで側面が膨張して体積変化を起こそうとする、水平変位を拘束しているために水平有効応力 σ_h' も増加し、その際に K_0 値の分母である鉛直有効応力 σ_v' の増加分に比べて、分子である水平有効応力 σ_h' 増加分が小さかったために K_0 値が減少したと考えられる。そして、軸圧を除荷すると K_0 値が増加している。これは、軸圧の載荷の際に増加した水平有効応力 σ_h' がそのまま、軸圧だけを減少させたからであると推察される。さらに、次の段階の背圧載荷においては、ケース(G)で応力の比が 4 : 1 のケース(j)を除いては、 K_0 が減少している。これは、背圧の増加を始めてから供試体に等方的に有効応力が減少し、鉛直有効応力 σ_v' に対する水平有効応力 σ_h' の割合が減少したためであると考えられる。背圧増加と背圧減少で異なる傾きで K_0 値が減少しているのは、初期の軸圧載荷の前と軸圧除荷の後で K_0 値の分子である水平有効応力 σ_h' が異なった値であるためであると推察される。また、応力の比 4 : 1 のケース(j)については、軸圧除荷を終えた時点で K_0 値が 1.0 を超えていたために K_0 値の分子にあたる水平有効応力 σ_h' の割合が増加することになり、それによって K_0 値が増加することとなった。これについては、3-3-2 においても考察を行っている。以上のことから、過圧密履歴を与えることにより K_0 値が増加することが確認できた。

ケース(E)とケース(G)での K_0 値の挙動を比較すると、最終的な K_0 値はケース(E)の方が大きくなる傾向を示した。これは、ケース(G)の場合、軸圧を除荷して K_0 値が増加しているところから背圧を載荷することで、等方的に応力が変化して K_0 値の分子にあたる水平有効応力 σ_h' の割合が減少することになり、 K_0 値が減少したものと推察される。ケース(G)で応力比が 4 : 1 のケース(j)については、軸圧の除荷を終えた時点で K_0 値が 1.0 を超えていたため、 K_0 値の分子にあたる水平有効応力 σ_h' の割合が増加することになり、最終的な K_0 値が増加することになった。しかし、ケース(E)で応力比が 4 : 1 のケース(e)の結果と比べると、最終的な K_0 値はケース(j)で 1.2 に対し、ケース(e)では 1.3 であるため、ケース(E)の適用順序の方が K_0 値は大きいという結果が出ている。また、いずれの実験ケースにおいても軸圧制御の応力割合が大きい方が K_0 値は大きくなっている。

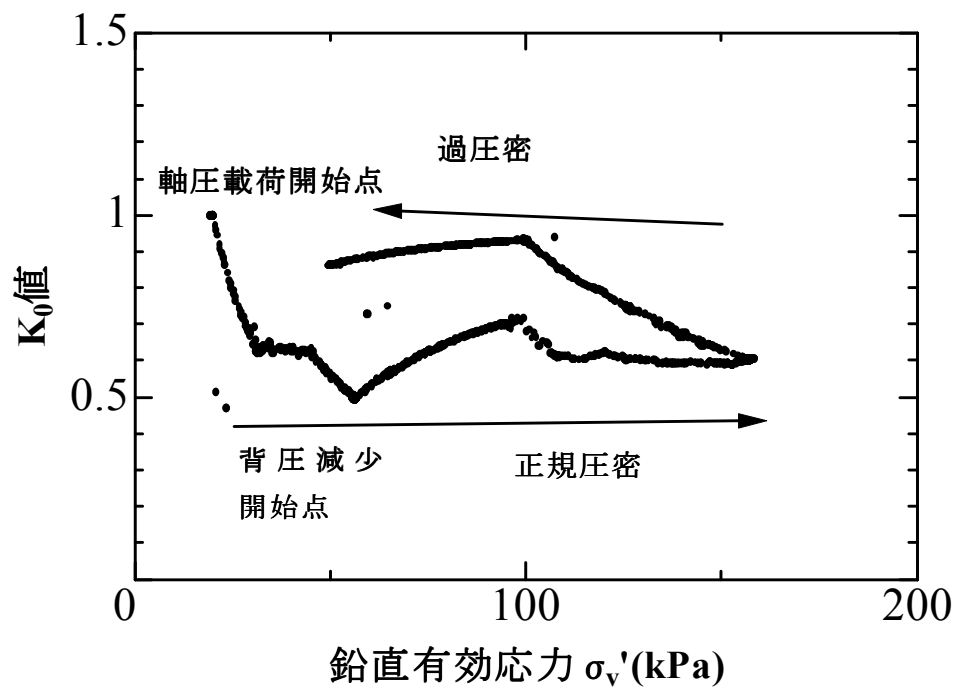


図 3-16 K_0 値の挙動 (ケース (f))

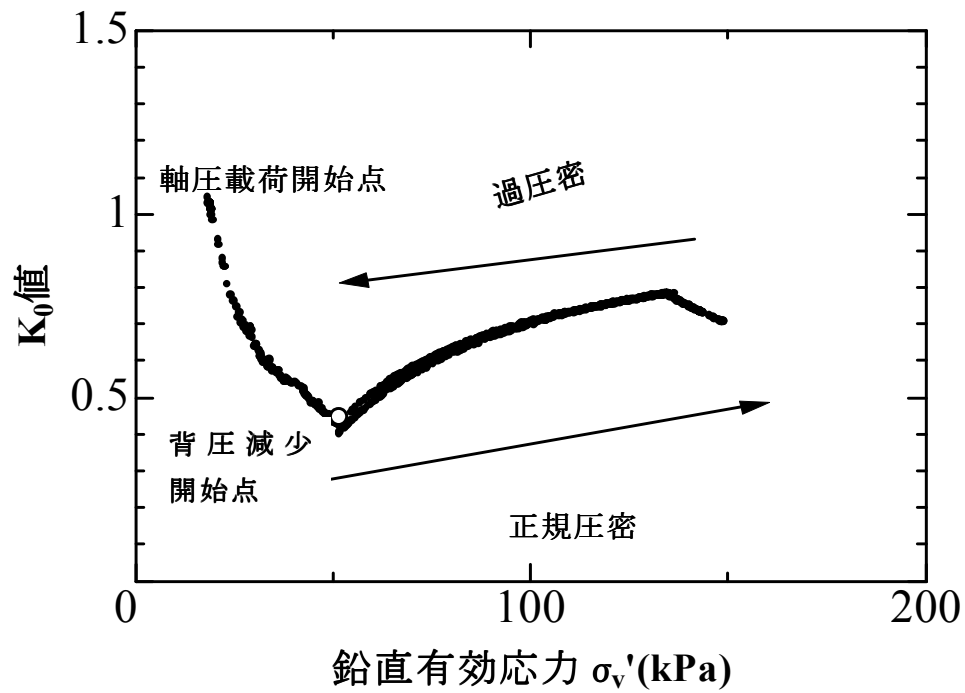


図 3-17 K_0 値の挙動 (ケース (g))

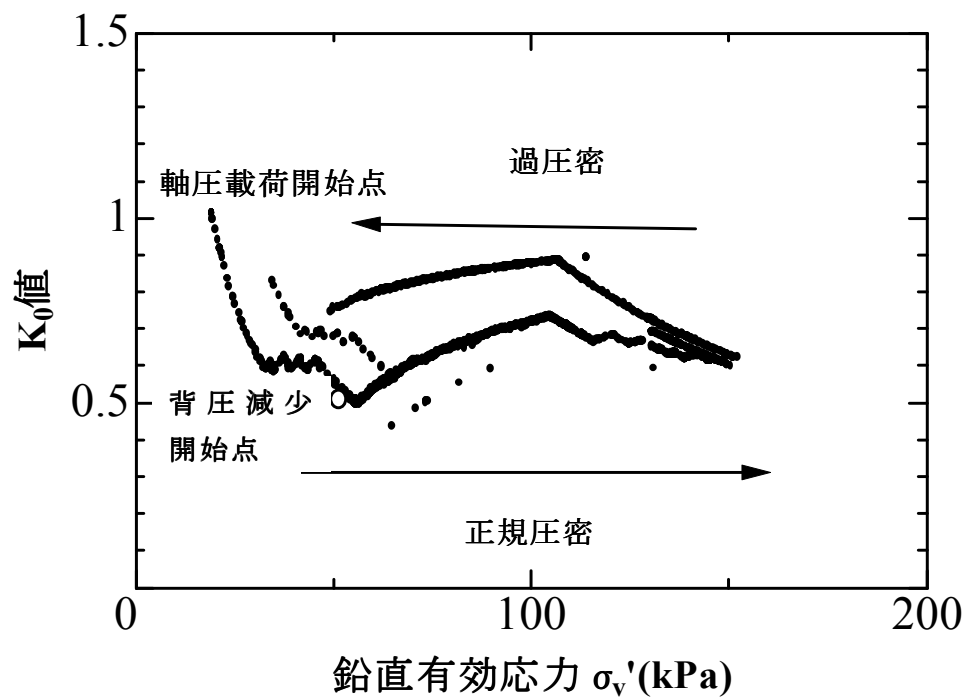


図 3-18 K_0 値の挙動 (ケース (h))

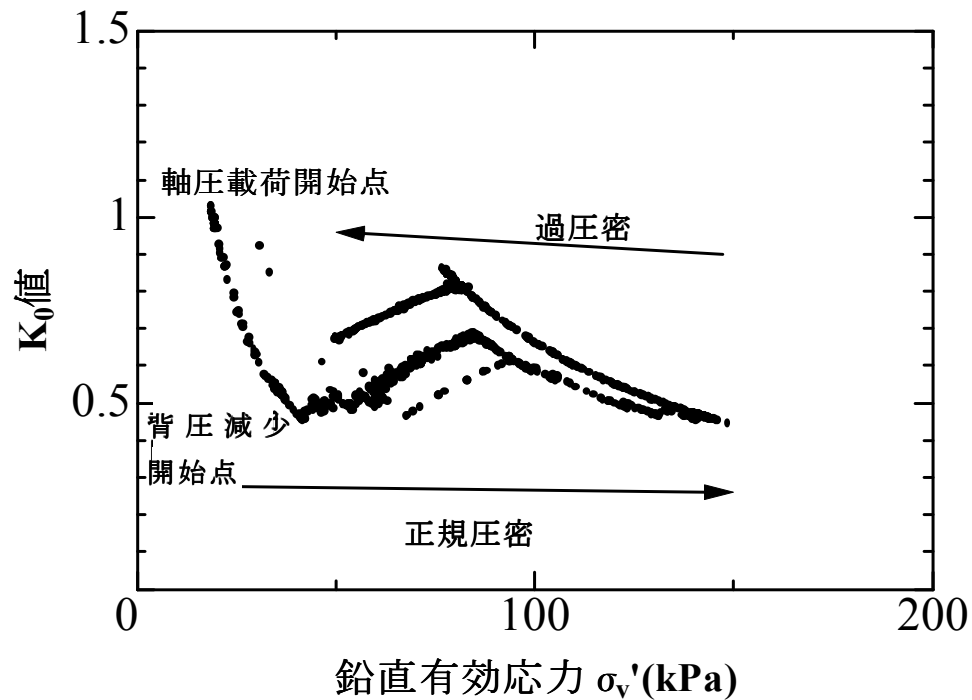


図 3-19 K_0 値の挙動 (ケース (i))

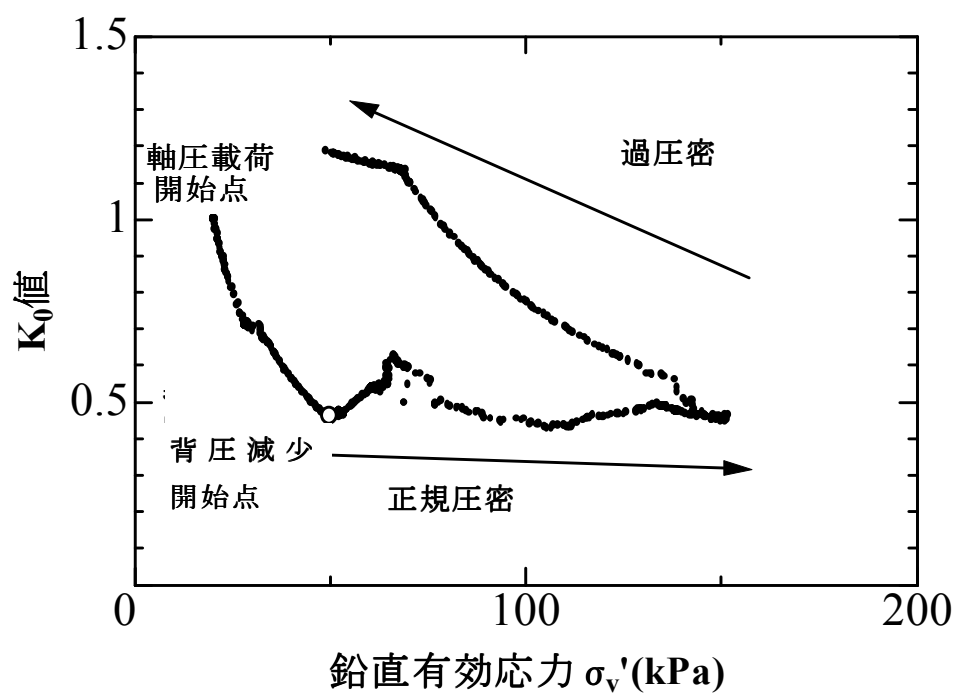


図 3-20 K_0 値の挙動 (ケース (j))

3-3 まとめ

本章では、載荷盛土工法、地下水位低下工法およびこれらの工法を組み合わせた場合を想定し、 K_0 応力条件下での K_0 値の挙動について調べた。本章の実験によって得られた結果として以下のようなことが挙げられる。

1. 載荷盛土工法を想定し軸圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)_vが大きくなるにつれて過圧密後の K_0 値は増加し、有効拘束圧も増加する。
2. 地下水位低下工法を想定し背圧制御により過圧密履歴を与えた場合、過圧密比(OCR)_vが変化しても過圧密後の K_0 値は変化せず、有効拘束圧も変化がない。
3. 載荷盛土工法、地下水位低下工法を組み合わせ適用した場合、適用する順序により K_0 値の挙動は異なり、過圧密後の K_0 値に違いが生じると考えられる。
4. 特に、今回の試験の場合、軸圧除荷点における鉛直有効応力が **98kPa** 程度の小さい値であるとき、すなわちケース(E), (G), (I), (J)では、圧密終了点における K_0 値が大きくなり、液状化強度の増加が期待できるものと考えられる。
5. ケース(E)とケース(G)の適用順序で、軸圧制御と背圧制御による応力の比を変化させて、 K_0 値の挙動を測定したところ、圧密終了時の K_0 値は、ケース(E)の方がケース(G)に比べて、全体的に大きくなった。また、軸圧制御の応力割合が大きい方が K_0 値は大きくなった。