

広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究

安福, 規之

<https://doi.org/10.11501/3054272>

出版情報 : 九州大学, 1990, 工学博士, 論文博士
バージョン :
権利関係 :

第3章 広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性

3.1 概説

前章では、砂の応力ひずみ挙動の拘束圧依存性を粒子の破砕性との関連において論じ、また、異方応力状態にある砂の挙動の圧密経路依存性やせん断経路依存性を色々な観点から検討した。本章では、第2章で示した砂の複雑な挙動を念頭において、密な砂の降伏特性を、応力域と圧密経路に着目して明確にすることを目的としている。これは、砂の降伏挙動に関する実験的検討が、より現実的な構成式を開発する上で、重要であるばかりでなく、前章で議論したような砂の応力ひずみ挙動をよりよく理解するためにも大切であると考えからである。

以下節に従って、本章の概要を述べる。まず、第2節では、応力域の考え方や砂の降伏特性を調べるために実施した応力経路試験について述べる。次いで、第3節では、降伏応力の考え方と具体的な評価方法及び、各種の応力経路試験から得られた応力ひずみ曲線と降伏応力について論じる。そして、第4節では、各種の応力経路試験から得られた降伏応力に基づく降伏曲線を p - q 空間上に描き、その形状の特性を応力域と圧密経路に着目して検討する。また、得られた降伏特性に基づき、異方的な特性をうまく表現し得る降伏関数の定式化を試みる。さらに、第5節では、構成式の中で、硬化パラメータとしてよく用いられる軸差ひずみ、仕事量及び正規化仕事量〔諸戸の提案する状態量(1976)〕の3つの量に注目し、それらの量のコンターを p - q 空間に描くことによって、その特性を検討する。また、これらのコンターと降伏曲線の形状を比較し、その対応を明らかにする。最後に、第6節では、本章で得られた知見を要約し、結論とする。

なお、ここでの検討は、三軸空間（三軸圧縮伸張条件下）に限ったものである。

3. 2 降伏曲線を評価するための応力経路

3. 2. 1 試料および実験手順

用いた試料は、秋穂砂であり、2. 4 で用いたものと同じである。実験は、すべて相対密度90% 程度の密詰めの飽和供試体を用いて行われた。供試体の作製は、ゴム製メンブレンに気乾試料をタンパーで詰め、炭酸ガスを通した後、吸水飽和するという方法で行った。また、飽和度を高める目的で背圧として供試体に200 kPa を負荷している。実際の三軸試験は、本研究室で保有する低圧用（耐圧2 MPa のロードセル内臓型三軸セルを有する）と許容側圧20 MPaの高圧用の試験機を低圧域と高圧域でそれぞれ使い分けて行っている。なお、試料の性質、供試体の作成方法、試験機についての詳細は、2. 2 で述べており、加えて実験手順については、2. 4 に詳述している。なお、前章で述べたように、密詰めの秋穂砂供試体は、拘束圧が2 MPa を越えた応力域で粒子の破碎が顕著になる。現有する試験機を用いて、砂の降伏特性に及ぼす応力域の影響（粒子破碎の影響）を調べる場合、この程度の破碎性の材料が最も実験がしやすく、また、信頼性の高い結果が得られうると結論した。

3. 2. 2 応力域の区分 ～低・高圧域の定義～

Lee and Seed(1967)、Vesic and Clough(1968)、三浦(1976)の報告、或いは先の2. 3 に示した結果（図2-3、図2-4参照）から、砂の圧縮性は、粒子破碎が生じる事によって著しく増加し、その結果として、等方圧密過程における $e - \ln p$ 関係は、明確な折れ曲がり点を有する曲線となり、その折れ曲がり点以降の曲線の勾配は、正規圧密粘土のそれに近いものとなることが知れる。図3-1は、秋穂砂の等方圧密試験結果を $e - \ln p$ 関係で整理したものであり、図3-2は、等方圧密過程における表面積増加量 ΔS と $\ln p$ の関係、すなわち、粒子破碎特性を示したものである。なお、 ΔS の求め方については、2. 3で言及している。ここでは、このような等方圧密過程における $e - \ln p$ 曲線と粒子破碎特性に基づいて、応力域を低圧域と高圧域に区分し、議論を進めている。

(1) 低圧域 --- 図3-1に示す $e - \ln p$ 曲線において、等方圧密圧力が p_v 値に至るまでの応力域を対象とする。図3-2の ΔS と $\ln p$ の関係から判断すれば、

この応力域は、粒子破碎がほとんど生じない応力域に対応する。秋穂砂では、等方圧力 p が、概して 2 MPa 以下の応力域に対応する。

(2) 高圧域 --- 図 3-1 に示す $e-\ln p$ 曲線において、等方圧密圧力が p_y 値を越えた応力域を意味する。図 3-2 の ΔS と $\ln p$ の関係から判断すれば、この応力域は、粒子破碎が顕著に生じる応力域に対応する。秋穂砂では、等方圧力 p が、2 MPa 以上の応力域に対応する。

さて、図 3-1 には、2.2 で示した密詰め秋穂砂の排水及び非排水試験から求められた最終的な応力状態もまた合わせて示している。これは、

近似的には、Castro and Poulos(1977)のいう定常状態線、或いは、Roscoeらのいう限界状態線に対応するものである。図中の斜線は、得られた結果に基づいて描いた定常状態の確からしい範囲を示したものであるが、この図から、破壊状態の特性に注目した場合には、低圧域と高圧域は、それぞれ最終応力状態線（定常状態線）の左側と右側として評価することも可能である。

3.2.3 実験に用いた応力経路

本章では、応力域と圧密経路に着目して異方圧密砂の降伏特性を調べるために、以下に示す2つのシリーズの実験を行った。

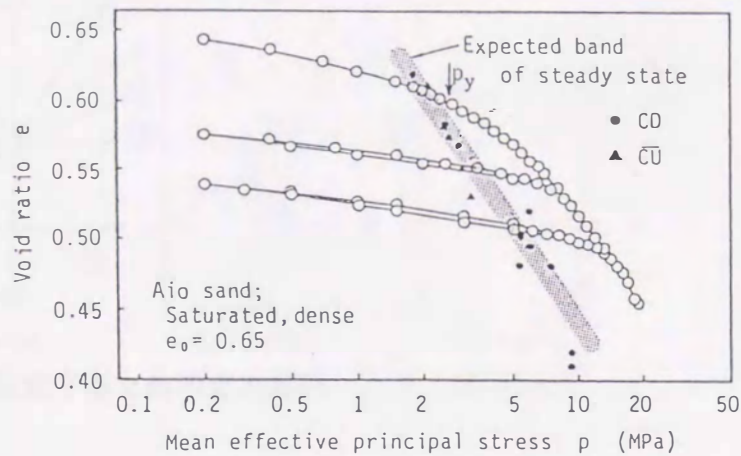


図 3-1 等方圧密試験による秋穂砂の $e-\ln p$ 関係と定常状態線

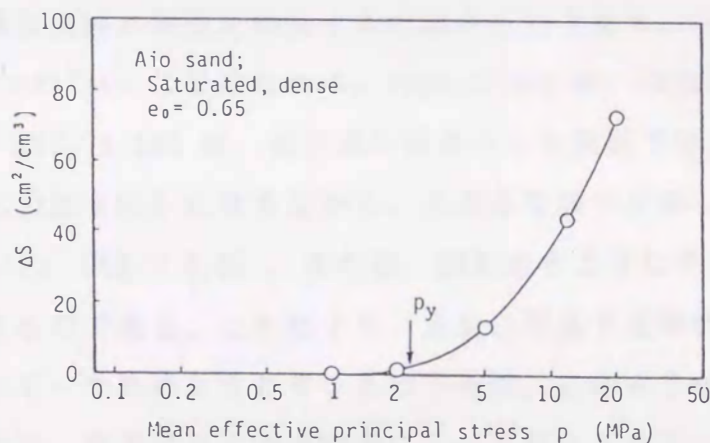


図 3-2 等方圧密過程における秋穂砂の表面積増加特性

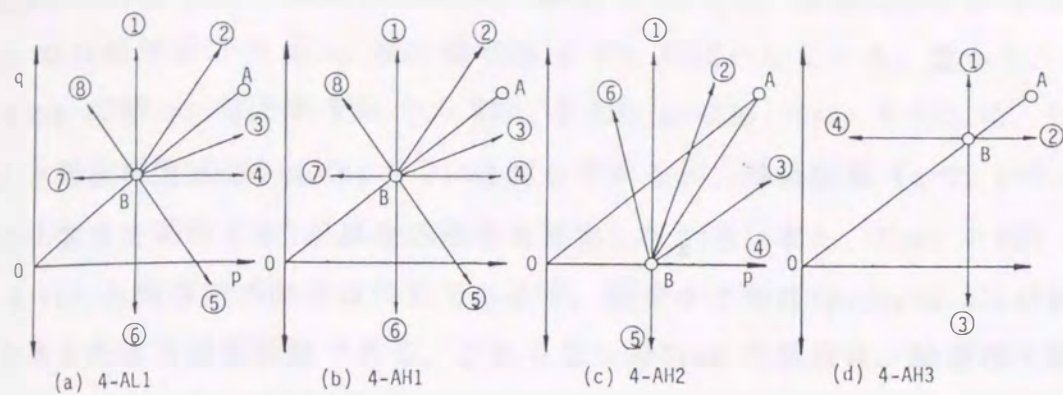


図3-3 降伏曲線を決定するための応力経路 (シリーズ4-A)

(1) シリーズ4-A --- このシリーズは、応力域の違いと除荷経路の違いに着目して、異方圧密された砂の降伏曲線の特性を検討するためのものであり、図3-3(a)~(d)に示すように、4つのTypeに分けられる。Type 4-AL1は、低圧域での実験であり、Type 4-AH1, 4-AH2, 4-AH3は、高圧域を対象とした実験である。Type 4-AL1とType 4-AH1は、応力比を0.8に保ちながら、A点まで異方圧密した後、B点まで除荷し ($p_B = p_A/2$; $OCR = 2.0$)、その後、図に示すような8方向の応力経路でせん断試験を行うものである。これにより、A点に対応する降伏応力をそれぞれの応力経路に対して一つ決めようとするものである。このような降伏点を定めるための実験的手法は、すでに多くの研究者によって用いられている (例えば、Poorooshasb, Holubec and Sherbourne, 1967; Tatsuoka and

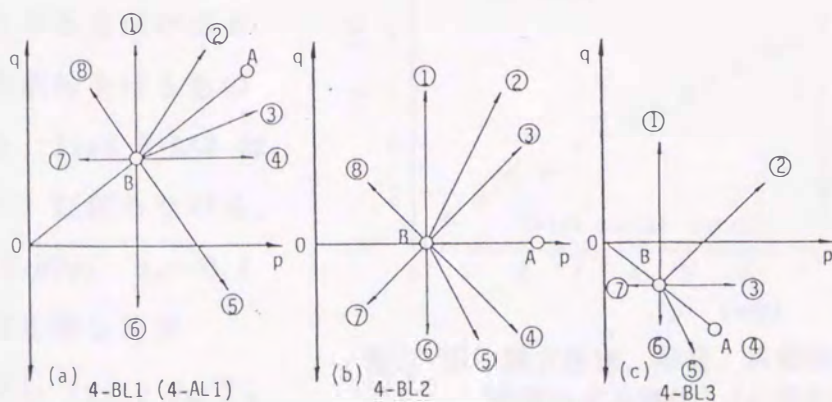


図3-4 降伏曲線を決定するための応力経路 (シリーズ4-B)

Ishihara, 1974; Miura and Yamamoto, 1982)。ここで、A点における p の値 p_A は、低圧域では 1.0 MPa, 高圧域では 10 MPa に統一している。従って、B点における p の値 p_B はそれぞれ 0.5 MPa, 5 MPa となる。Type 4-AH2 は、Type 4-AH1 と過圧密比, $OCR(=p_A/p_B = 2)$ は同じであるが、除荷経路 ($q=0, p=5.0$ MPa の状態まで除荷する) が異なる場合を想定しており、また、Type 4-AH3 は、Type 4-AH1 と除荷時の経路は同じであるが、除荷する程度 ($p_A/p_B=1.33$) が異なる場合を考えた応力経路試験である。これら2つのTypeの試験は、除荷幅や除荷経路の違いが異方圧密砂の降伏特性に与える影響を検討する目的で行ったものである。

(2) シリーズ4-B --- このシリーズは、圧密経路の違いに着目して、砂の降伏曲線の特性を検討するた

めのものであり、図3-4に示すように、3つのTypeに分けられる。いずれのタイプの試験も、低圧域におけるものである。Type 4-BL1 は、先のType 4-AL1 と同じものであり、Type 4-BL2 は、A点 ($p_A=1.0$ MPa, $q_A=0.0$ MPa) まで等方圧密した後、B点まで除荷し ($p_B = p_A/2$; $OCR = 2.0$)、その後、図に示すような8方向の応力経路でせん断試験を行うものである。また、Type 4-BL3 は、応力比を -0.8 に保ちながら、A点 ($p_A=0.5$ MPa, $q_A=-0.4$ MPa) まで異方圧密した後、B点まで除荷し ($p_B = p_A/2$; $OCR = 2.0$)、その後、図に示すような7方向の応力経路で

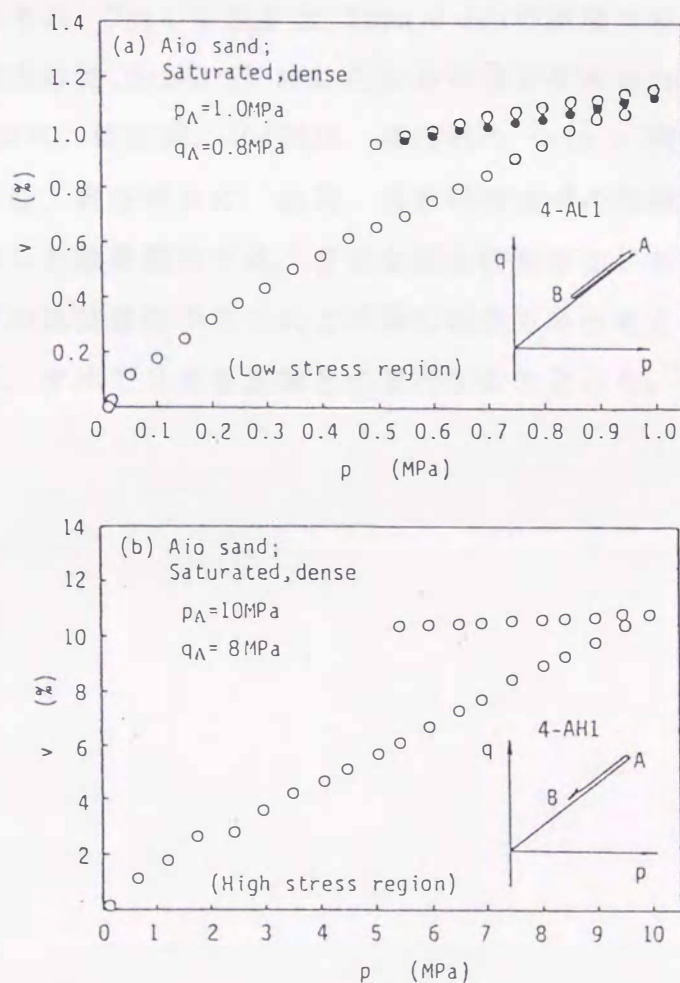


図3-5 異方圧密、除荷、再載荷時の体積体積ひずみ特性; (a)低圧域での $v - p$ 関係; (b)高圧域での $v - p$ 関係

せん断試験を行うものである。なお、このシリーズでは、降伏応力をより客観的に評価することを目的に、付加的な実験として、B点まで処女圧密後、各Typeで決められた方向にせん断する処女載荷応力経路試験（第2章のシリーズ3-3の試験に対応する）も合わせて行っている。これは、このような試験を行っておけば、先行圧密履歴を加えた場合と処女載荷の場合の応力ひずみ曲線を比較することによって、より客観的な降伏応力の把握が可能であると考えたからである。

各Typeの試験において、A点までの圧密に、低圧域の場合には約3時間、高圧域においては、約20時間を要した。さらに、その後の各応力経路における載荷または除荷は、その経路を5～20段階に分けた応力制御方式で行い、各段階での軸ひずみ速度が、0.01%/min.以下であれば、次の段階に進むこととした。

さて、図3-5(a),(b)は、それぞれ、Type 4-AL1とType 4-AH1の試験において、比例載荷、除荷、再載荷（応力経路,0-A-B-A）中に生じる体積ひずみと $\ln p$ の関係を示したものである。(a)図は、低圧域、(b)図は、高圧域の $v-\ln p$ 関係を示している。これらの図から、低、高圧域共に、除荷、再載荷過程中的体積ひずみは、弾性的であり、ここで示した除荷過程では、有意な塑性変形は生じないことがわかる。また、他のタイプの除荷過程でもこれと同様の結果であったことから、以下での実験結果の整理は、すべてB点を基準として行うこととした。

3.3 降伏応力と応力ひずみ曲線

3.3.1 降伏応力の考え方と評価手法

砂の応力ひずみ曲線においては、明確な降伏点が現れない場合も多く、また応力経路のとり方によっては、あるひずみ成分が生じないこともあり、弾性領域と塑性領域の境界としての降伏応力を、応力ひずみ曲線上で明確に決定するにはかなりの困難が生じる。

三浦・山本(1982)、Miura, Murata and Yasufuku(1984)は、降伏応力を決定するための手段として、 $q - \epsilon$ および $p - v$ の2種類の応力ひずみ曲線について、図3-6の4通りの方法について適否の検討を行った。その結果、算術目盛図上に描いた応力ひずみ曲線上の最大曲率点(図3-6(c))で降伏応力を決定する方法を用いれば、1) 座標スケールの選び方の影響が小さく、比較的簡単に降伏点が求まること、2) $q - \epsilon$ 及び $p - v$ 曲線から求めた降伏応力がよく一致すること、3) 降伏曲線の特性が、明瞭に現れることなどを示し、この方法が合理的であることを明らかにしている。つまり、明確な弾性域から完全な弾塑性域に至る間にその過渡的な領域が存在することを認めた上で、降伏応力を塑性変形の十分に生じる応力点と位置づけている。したがって、結果的には、降伏曲面内部には、若干の塑性変形が生じていることになるが、その量は、少なくとも単調載荷条件下での、全体的な降伏や変形挙動を考えた場合には、無視できるほど小さいと判断できたのである。

また、最近、Tanimoto and Tanaka(1985)によって降伏応力を音響エネルギーの観点から、合理的に決定するという興味ある研究が行われている。しかし、その方法は必ずしも簡便なものとはいえず、現状では、実用的な手法とはいえないようである。

このため、本研究では降伏という概

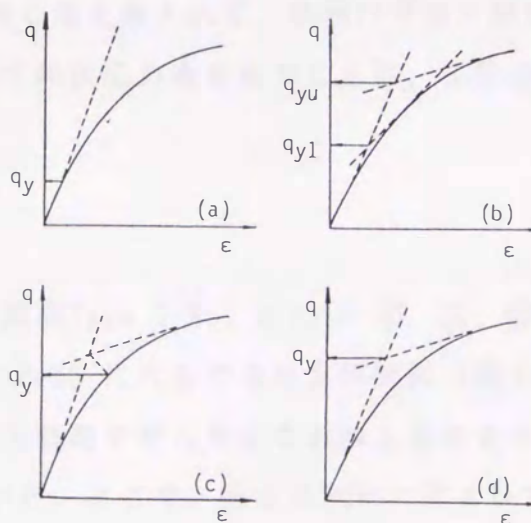


図3-6 各種の降伏応力の決定方法

念を先に述べた考え方で捕らえ、具体的には、以下に示す4つの応力ひずみ曲線に基づいて、それぞれ独立に降伏応力を決定している。

- a) $\eta - \epsilon$ または $q - \epsilon$ 曲線
- b) $\eta - v$ または $p - v$ 曲線
- c) $\eta - k_m$ または $p - k_m$ 曲線
- d) $\eta - W$ または $p - W$ 曲線

すなわち、上記曲線の ϵ 、 v 、 k_m および W の値が急増する点をもって降伏応力と定め、各曲線から求まる降伏応力を比較している。ここに、 W は全仕事、 k_m は諸戸・河上(1974)、Moroto(1976)の示した状態量(正規化した全仕事に対応)であり、それぞれ式(3-1)、式(3-2)で表される。

$$W = \int dW = \int p \cdot dv + \int q \cdot d\epsilon \quad (3-1)$$

$$k_m = \int dW/p = \int dv + \int \eta \cdot d\epsilon \quad (3-2)$$

$\eta - W$ または $p - W$ 曲線と $\eta - k_m$ または $p - k_m$ 曲線を用いれば、後述するように特定の応力経路試験に対して降伏応力が定まらないことはなく、降伏応力も $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - v$ 曲線の場合より、明確に現れることが多かった。また、圧密とせん断の効果が連成し合いながら降伏が生じると考えれば、体積ひずみと軸差ひずみの両方の項を含む W や k_m に基づいて降伏応力を定めることは、工学的に意味のあることである。

3.3.2 応力ひずみ曲線と降伏応力

図3-7は、低圧域における応力経路試験Type 4-AL1のPath ②、④、⑤、⑦に対する $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - v$ 曲線が、それぞれのPathに対応する処女供試体〔図3-3(a)において、B点まで圧密後、所定の応力経路でせん断する試験を意味する〕に対する応力ひずみ関係と一緒に示されている。ここで、処女供試体の応力ひずみ曲線は、先行圧密を受けた供試体(Type 4-AL1の供試体)のそれとある応力比以上で重なりあうように横軸に沿って移動させて描いている。それぞれのPathにおける降伏応力は、低圧域の場合には、このように処女供試体と先行圧密供試体の

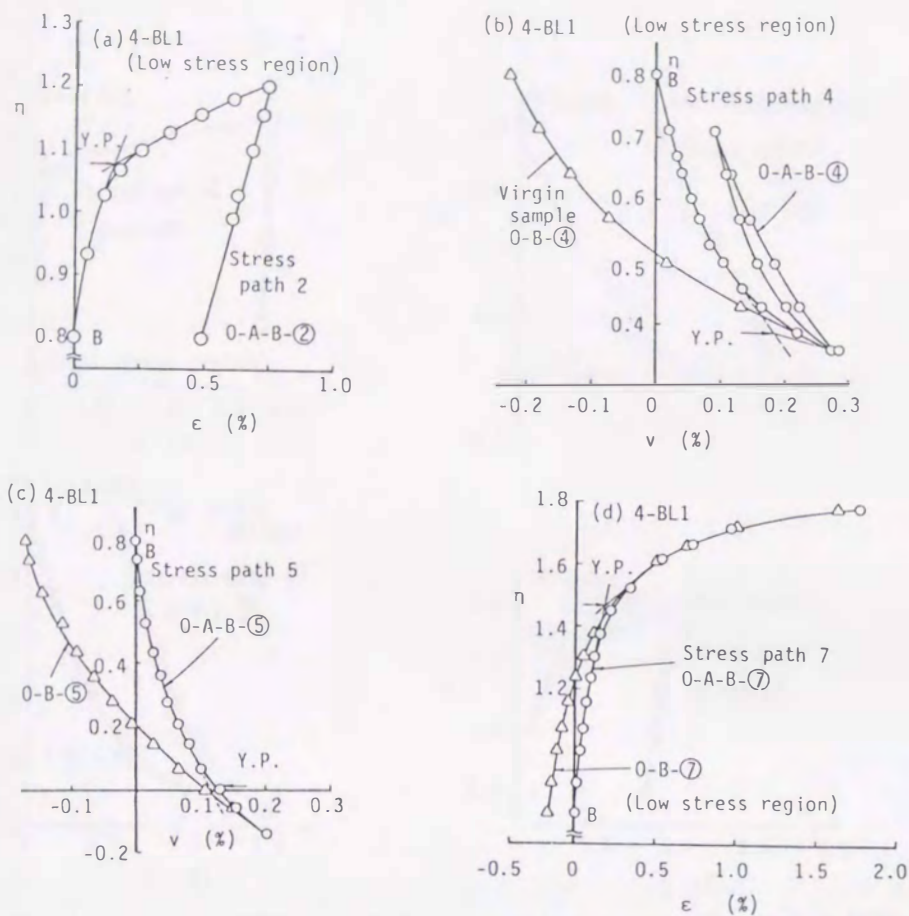


図3-7 Type 4-BL1 試験（低圧域）の代表的な応力ひずみ関係と降伏応力
 (Type 4-BL1 と4-BL1 は、同じ試験である)

応力ひずみ曲線を比較した上で、Poorooshasb, Holubec and Sherbourne(1967)、Parry and Nadarajah(1970)、Tatsuoka and Ishihara(1974)、三浦・山本(1982)によって用いられている経験的手法と同様の手順で決定される。すなわち、図3-7中に示すように、応力ひずみ曲線を2つの直線で近似し、その交点で降伏応力は与えられるものとした。種々の応力経路試験に対して降伏応力を決定する時、先に述べたように降伏応力が算術目盛り上で明確に現れない場合がある。そのような場合、図3-7に示す先行圧密履歴を加えた供試体と処女供試体の応力ひずみ曲線の比較が、大変有効である。図3-7中には、この手法で求められた降伏点が、矢印で示されている。

図3-8は、高圧域における応力経路試験Type 4-AH1 のPath ②、④、⑤、⑦に対する $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - v$ 曲線が、先と同様の方法で決定された降伏応力と共に示されている。なお、高圧域の試験では、降伏応力が低圧域の試験に比べて、明確に決

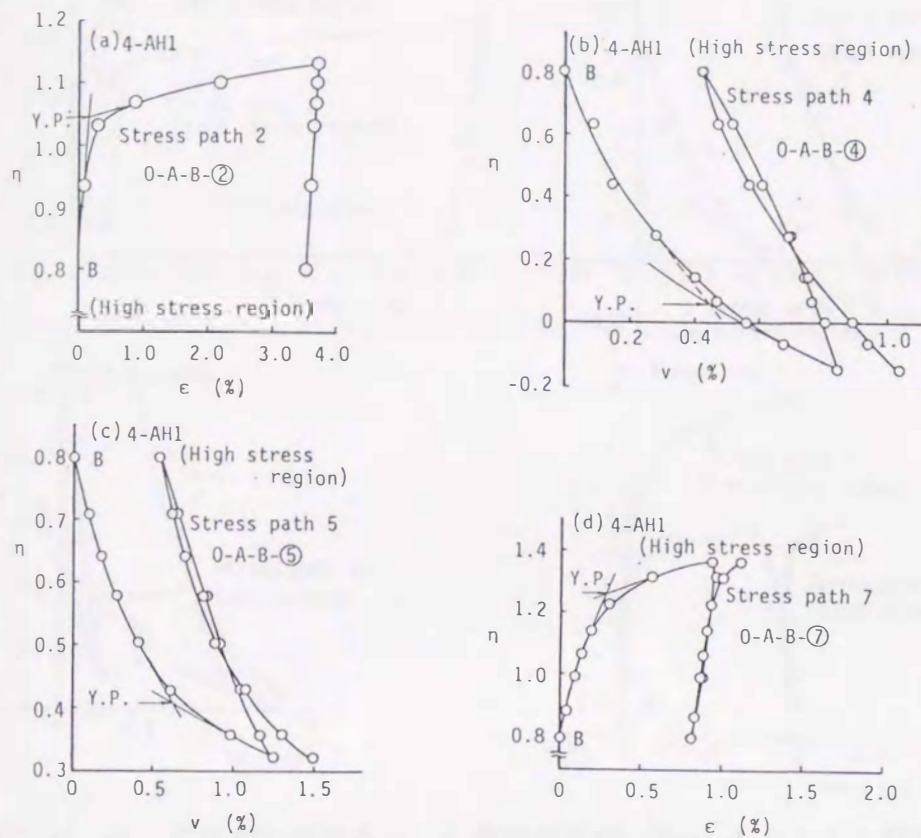


図3-8 Type 4-AH1 試験（高圧域）の代表的な応力ひずみ関係と降伏応力

定できるという経験的事実 (Miura, Murata and Yasufuku, 1984; 村田・兵動・安福, 1987b) から処女供試体との比較を行うことはしなかった。しかし、降伏応力をより客観的に決定したいという意図で、付加的に、同じ経路上での載荷、除荷試験を行っている (例えば、Path ②では、0-A-B-2 で終わらずに、0-A-B-2-B-2 の経路で試験を行う)。図3-7、図3-8 から、履歴を加えた試験では、いずれの Path も、処女供試体に比べて、B 点以後の変形は、相対的に小さくなっており、履歴の効果が現れていること、また、算術スケールで上で結果を整理した場合には、応力比が減少し、 p が増加するような Path ④と⑤では、Path ②と⑦に比べると、特に低圧域において、明確な降伏応力が現れない傾向にあることがわかる。以上のような傾向は、Type 4-AL1、Type 4-AH1 の Path ①、③、⑥、⑧ に対しても見られるものである。

さらに、図3-9 は、Type 4-AL1 (低圧域) と Type 4-AH1 (高圧域) の Path ②、④、⑤、⑦ の η と正規化した仕事量 k_m の関係をまとめて示したものである。

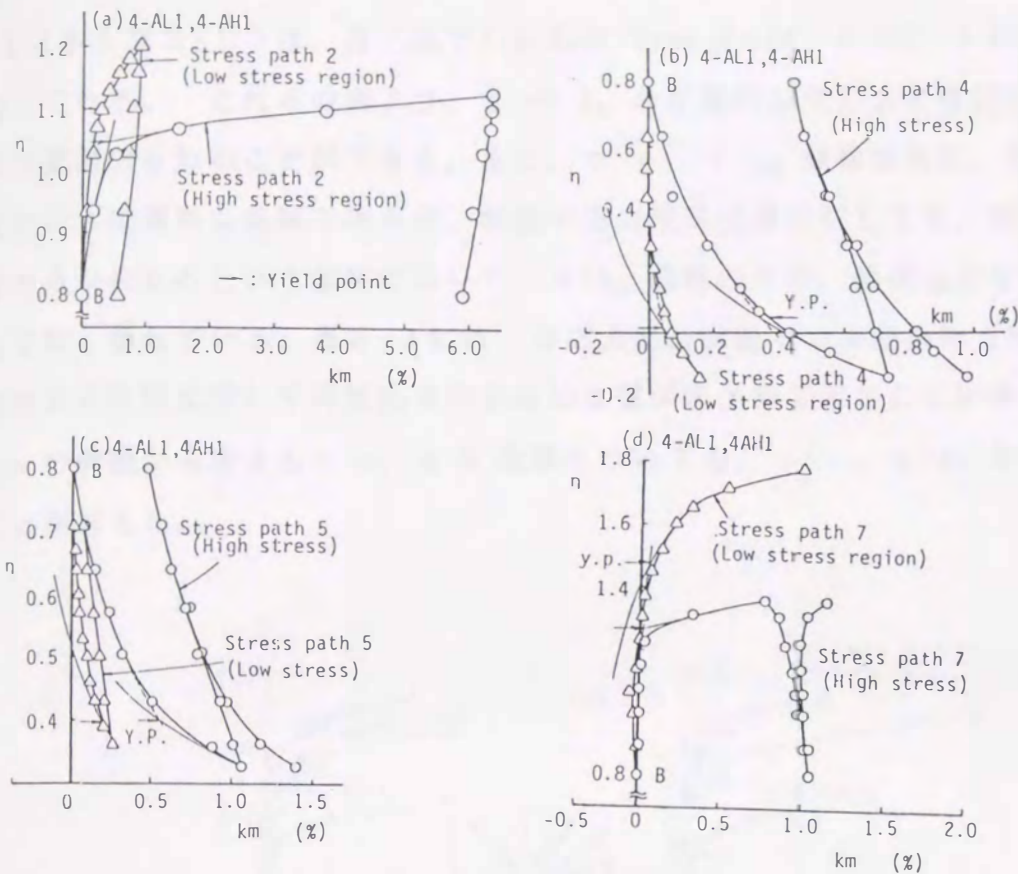


図3-9 低、高圧域における η - k 曲線の比較 (Type 4-AL1 と4-AH1試験の比較)

この図から、1)いずれのPathも、先の η - ϵ 、及び η - v 曲線よりも降伏応力が、明確に求められる。2)降伏点におけるひずみレベルは、Path ②と⑦では、低・高圧域において有意な違いがないものの、Path ④と⑤の場合には、高圧域の方が低圧域に比べて少し大きく表れている。この理由のひとつとして、低、高圧域における p の増加に対する弾性ひずみ成分の生じ方の違いを挙げる事ができる。3)応力比の増加するPath ②と⑦で降伏点における応力比が、高圧域の方が低圧域に比べて小さいことなどがわかる。

ここで、上述のような結果は、別の応力経路試験 (Type 4-AH2、Type 4-AH3、Type 4-BL2、Type 4-BL3) に対しても同様に得られた。

さて、すべてのタイプの応力経路試験の結果を η - ϵ 、 η - k_m の関係で整理したものが図3-10から図3-15である。それぞれの図には、各せん断経路で求まる降伏点の位置 (矢印) も明示されている。図3-10から図3-12は、低圧域で行われた、Type 4-AL1(4-BL1)、4-BL2、4-BL3の結果をそれぞれ示し、

図3-13から図3-15は、高圧域で行われた Type 4-AH1、4-AH2、4-AH3 の結果を示している。これらの図より、 ϵ や k_m の全体的な生じ方や降伏応力の相対的な位置関係を知ることができる。また、 $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - k_m$ 曲線は共に、降伏応力を知るのに大変便利な曲線であるが、任意の応力経路試験に対しても、明確な折れ曲がり点が表れるという意味において、 $\eta - k_m$ 曲線の方が、降伏応力を知る道具としては、優れている。表3-1には、各応力経路試験での実験条件（初期間隙比、圧密後の間隙比等）や降伏応力の具体的な値がまとめて示されている。なお、各 Type の試験から求まる $\eta - v$ 、 $\eta - W$ 曲線についても、 $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - k_m$ 曲線と同様のことが言えた。

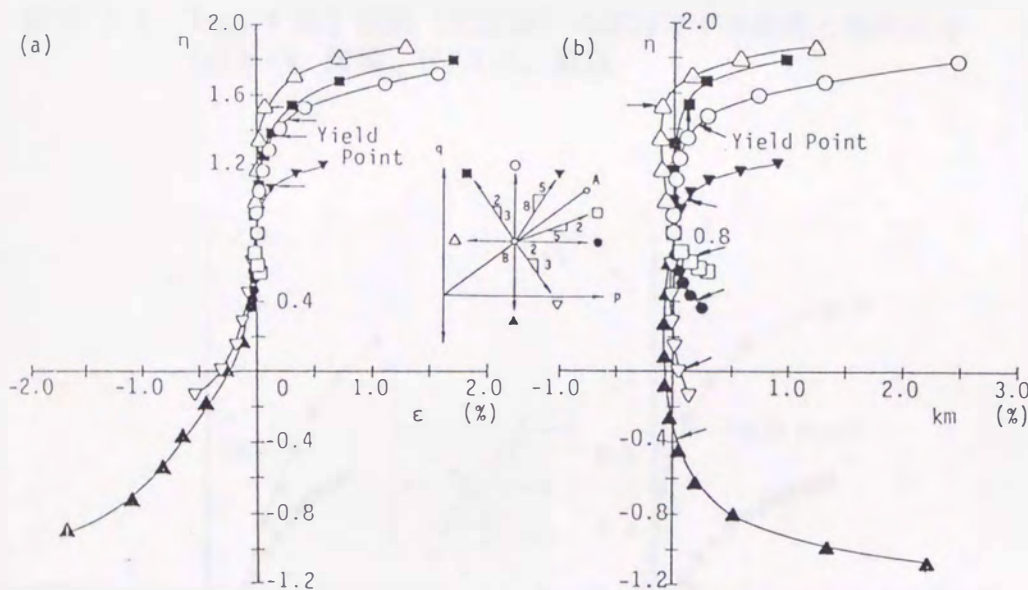


図3-10 Type 4-AL1(4-BL1) 試験（低圧域）の応力ひずみ関係と降伏応力
(a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

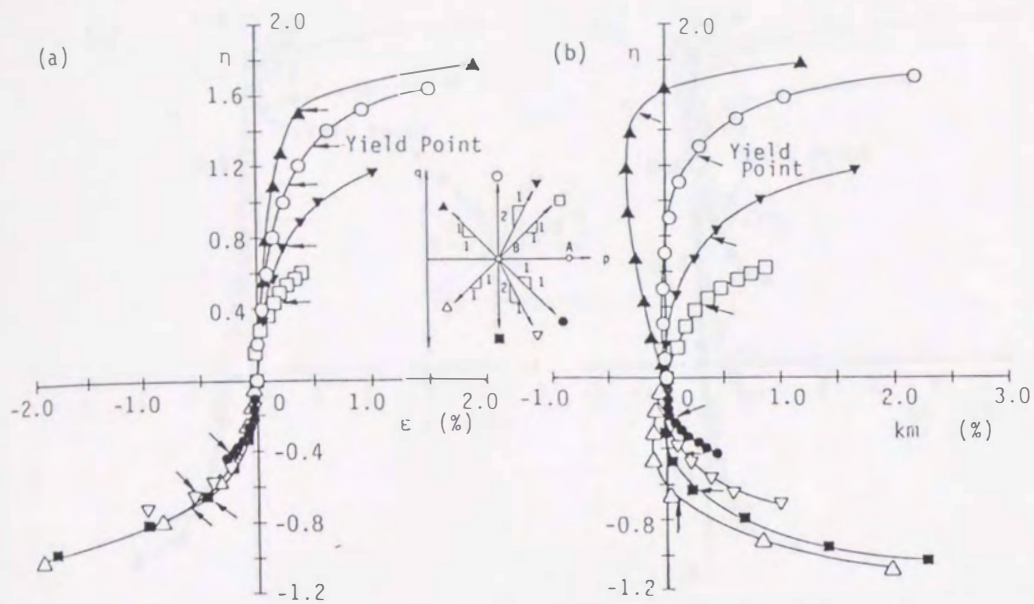


図3-11 Type 4-BL2 試験 (低圧域) の応力ひずみ関係と降伏応力
(a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

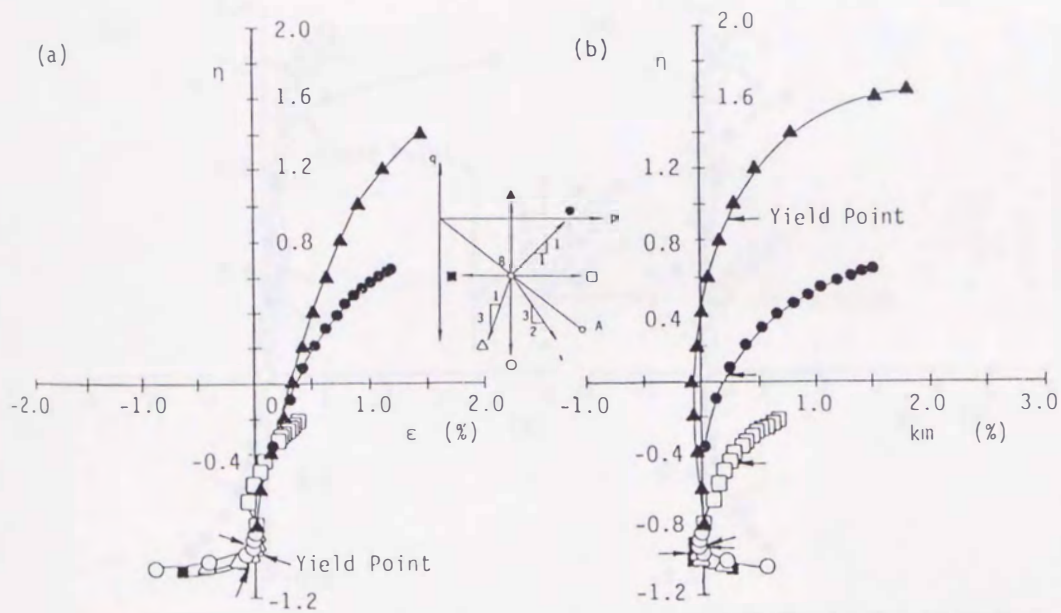


図3-12 Type 4-BL3 試験 (低圧域) の応力ひずみ関係と降伏応力
(a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

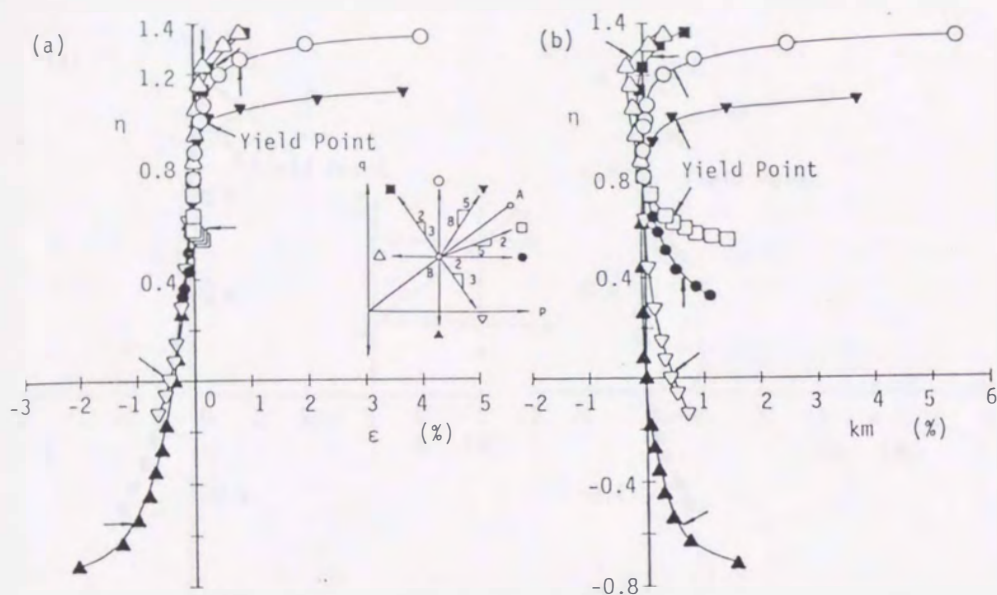


図3-13 Type 4-AH1 試験 (高圧域) の応力ひずみ関係と降伏応力
(a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

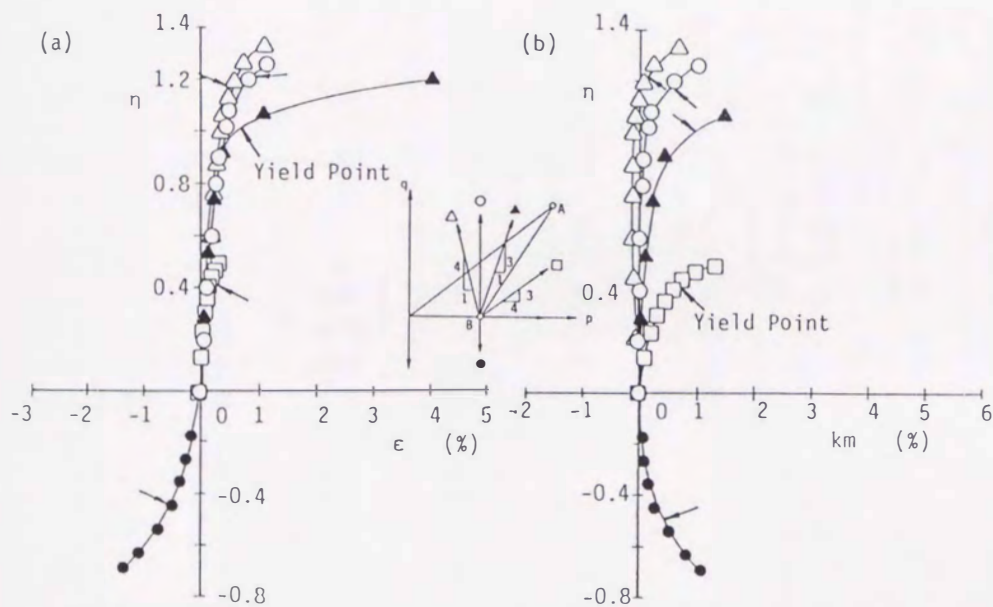


図3-14 Type 4-AH2 試験 (高圧域) の応力ひずみ関係と降伏応力
(a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

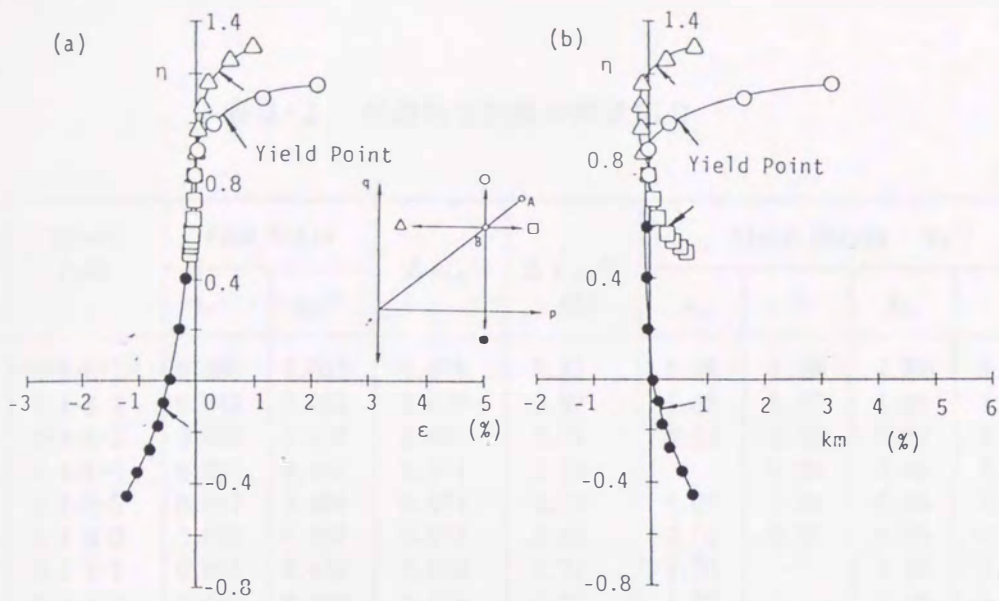


図3-15 Type 4-AH3 試験 (高圧域) の応力ひずみ関係と降伏応力
 (a) $\eta - \epsilon$ 関係、(b) $\eta - k_m$ 関係

表3-1 代表的な試験の降伏応力

Test Type	Stress Path	Void Ratio		$\Delta e_{BA}^{3)}$	$\Delta \epsilon_{BA}^{4)}$ (%)	Yield Stress $\eta_y^{5)}$			
		$e_0^{1)}$	$e_B^{2)}$			ϵ	v	k_m	W
4-AH1	0-A-B-1	0.666	0.502	0.078	3.82	1.30	1.29	1.30	1.30
	0-A-B-2	0.649	0.482	0.079	3.62	1.06	1.07	1.05	1.06
	0-A-B-3	0.659	0.488	0.081	3.75	0.58	0.61	0.60	0.59
	0-A-B-4	0.653	0.499	0.074	3.23	-	0.40	0.40	0.39
	0-A-B-5	0.647	0.486	0.077	3.27	0.07	0.05	0.05	0.05
	0-A-B-6	0.650	0.487	0.077	3.40	-0.55	-0.55	-0.55	-0.54
	0-A-B-7	0.644	0.480	0.079	3.74	1.26	-	1.27	1.25
	0-A-B-8	0.649	0.486	0.079	3.65	1.26	-	1.26	1.26
4-AL1	0-A-B-1	0.654	0.640	0.007	0.33	1.43	-	1.53	1.52
	0-A-B-2	0.664	0.648	0.007	0.35	1.09	-	1.10	1.10
	0-A-B-3	0.665	0.648	0.008	0.31	-	0.59	0.59	0.59
	0-A-B-4	0.666	0.648	0.008	0.36	-	0.39	0.40	0.41
	0-A-B-5	0.656	0.645	0.007	0.39	-	0.00	0.00	0.00
	0-A-B-6	0.661	0.646	0.007	0.37	-	-	-0.37	-0.45
	0-A-B-7	0.660	0.643	0.008	0.33	1.48	-	1.50	1.50
	0-A-B-8	0.664	0.638	0.008	0.36	1.35	1.48	1.50	1.40
4-BL2	0-A-B-1	0.651	0.610	0.010	0.02	1.30	1.30	1.26	1.23
	0-A-B-2	0.654	0.621	0.009	0.04	0.75	0.70	0.80	0.80
	0-A-B-3	0.664	0.631	0.010	0.04	0.42	0.42	0.44	0.46
	0-A-B-4	0.662	0.620	0.010	-0.02	-	-0.28	-0.27	-0.29
	0-A-B-5	0.657	0.626	0.009	0.02	-0.47	-0.46	-0.45	-0.47
	0-A-B-6	0.645	0.606	0.009	-0.00	-0.65	-	-0.63	-0.64
	0-A-B-7	0.667	0.638	0.008	-0.01	-0.67	-	-0.69	-0.69
	0-A-B-8	0.655	0.628	0.008	0.09	1.44	-	1.46	1.44
4-BL3	0-A-B-1	0.655	0.631	0.008	-0.33	-	1.00	0.88	1.00
	0-A-B-2	0.658	0.633	0.008	-0.35	-	-0.01	0.04	-0.01
	0-A-B-3	0.663	0.636	0.009	-0.41	-	-0.51	-0.41	-0.37
	0-A-B-4	0.668	0.645	0.008	-0.40	(0.50)	(0.50)	(0.50)	(0.50)
	0-A-B-5	0.664	0.641	0.005	-0.31	-0.95	-0.95	-0.93	-0.93
	0-A-B-6	0.660	0.632	0.008	-0.36	-0.98	-0.97	-0.95	-0.96
	0-A-B-7	0.654	0.630	0.008	-0.32	-1.00	-0.98	-0.98	-0.97

[注意] 1)初期の間隙比、2)せん断前のB点における間隙比
 3),4)応力経路BA間における間隙比とせん断ひずみの変化量
 5)4種類の応力ひずみ関係から決定された降伏点の応力比

3.4 降伏曲線の形状と定式化

3.4.1 降伏曲線の形状と塑性ひずみ増分ベクトル

図3-16は、シリーズ4-Aの試験から求めた降伏点を基にして描いた降伏曲線の形状を示したものである。図(a)は、Type 4-AL1の応力経路試験から求めた低圧域における平均的な降伏曲線の形状を示したものであり、 η - ϵ 、 η - v 、 η - k_m 、 η - W 曲線から評価した降伏点と共に示されている。一方、図(b)には、Type 4-AH1、Type 4-AH2、Type 4-AH3の応力経路試験から求めた降伏点とそれに基づいて描いた平均的な降伏曲線の形状が示されている。なお、Type 4-AH2、AH3の場合には、降伏点として、4つの応力ひずみ曲線から求めた降伏点を平均したものが黒丸●と黒四角■でプロットされている。また、図(a)には、図(b)に示した高圧域の降伏曲線と破壊包絡線（最大応力比線）を1/10に縮小したものが、比較のために点線で示されている。

これらの図から、まず、 ϵ 、 v 、 k_m 、 W から判定された降伏点は、お互いによく一致したものとなっていることがわかる。次に、図(b)の結果から判断すれば、この程度の除荷時の応力経路の違いや除荷の幅が、降伏曲線の形状に与える影響は

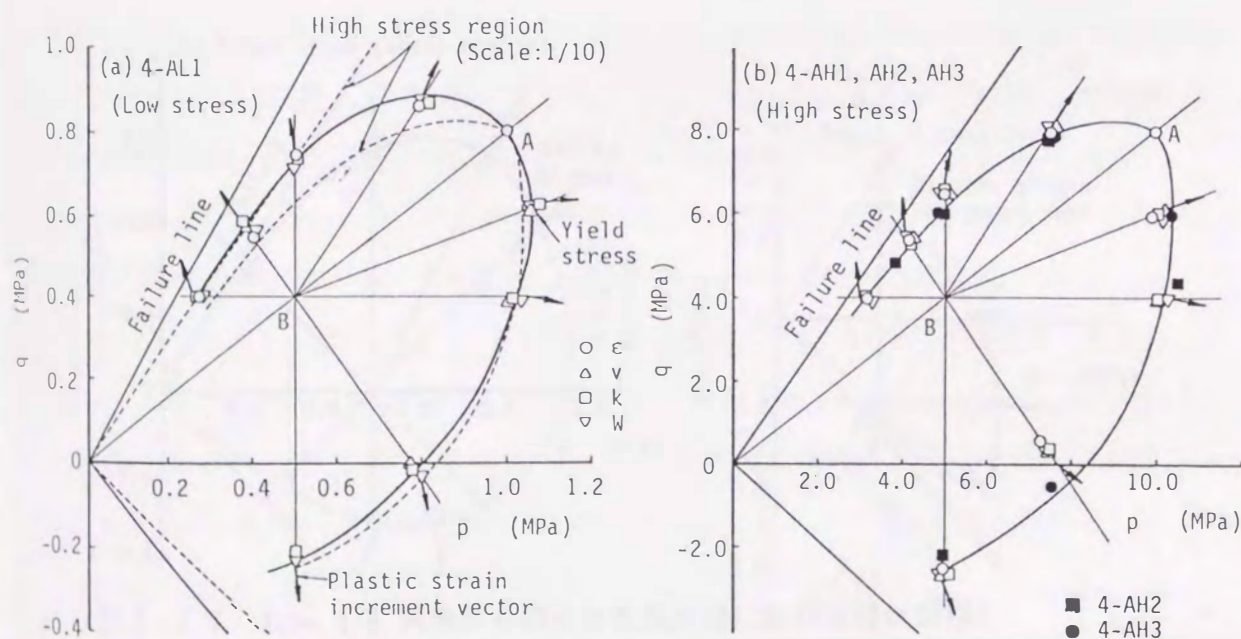


図3-16 Type 4-A 試験から得られた異方圧密砂の降伏曲線；
(a)低圧域における降伏曲線、(b)高圧域における降伏曲線

小さい。また、 k_m と W に基づく降伏点は、各Type のすべての応力経路に対してうまく決定できることから、これらのパラメータは、降伏点を決定するためのパラメータとして有効であることもわかる。これと同様の確認は、自然堆積粘土を対象としたTavenas, Rosiers, Leroueil, La-Rochelle and Roy(1979)の研究によってもなされている。さらに、図(a)から、低圧域の降伏曲線と正規化した高圧域での降伏曲線の形状は、特に、応力比の高い領域 ($\eta > 0.8$) で多少違いが見られ、高圧域における正規化した降伏曲線が、低圧域における曲線の内部に位置する結果となっている。この理由の一つに、ピーク時の応力比の値が、低圧域に比べて高圧域の方がかなり低く、同じ応力比でも高圧域の方がピーク時の応力比（破壊状態）に相対的に近いことが挙げられる。しかしながら、実用的な観点から見れば、低、高圧域における降伏曲線の全体的な特性は、概ね似ており、何れの応力域でも、異方圧密状態にある砂の降伏曲線の形状は、圧密経路を中心とした歪んだ楕円で形容できる。このような密な砂の降伏曲線に及ぼす応力域の影響は、等方圧密を受けた場合においても見られることを既に確かめている(Murata, Hyodo and Yasufuku, 1987)。

図3-17は、シリーズ4-Bの試験から求めた降伏点を基にして描いた低圧域における降伏曲線の形状を示したものである。図(a)には、Type 4-BL2 の応力経

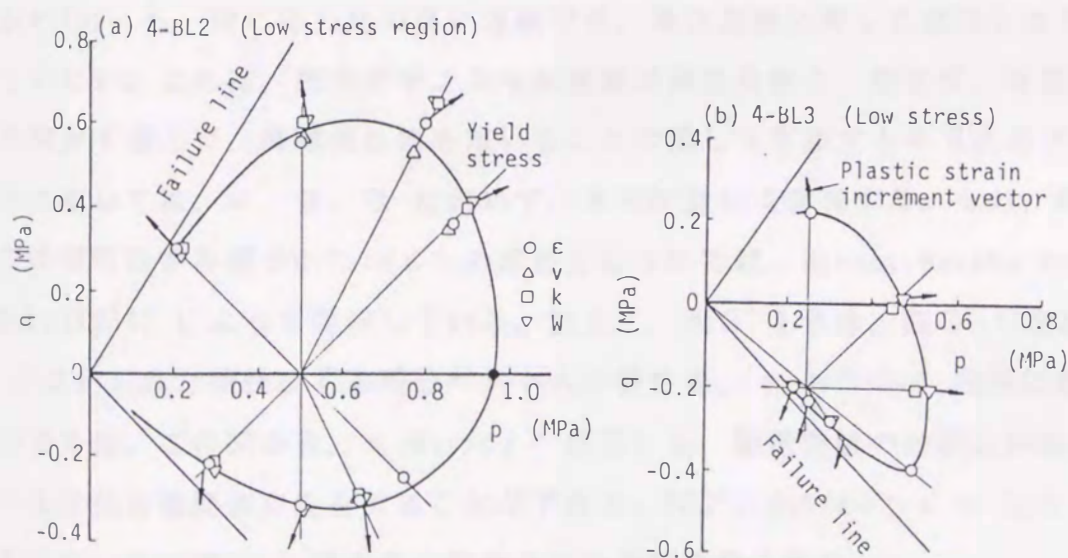


図3-17 Type 4-B 試験から得られた低圧域における降伏曲線；
(a)等方圧密砂の降伏曲線、(b)伸張側に異方圧密した場合の降伏曲線

路試験から求めた平均的な降伏曲線の形状が、 $\eta - \epsilon$ 、 $\eta - v$ 、 $\eta - k_m$ 、 $\eta - W$ 曲線から評価した降伏点と共に示されている。この結果から、降伏曲線の形状は圧縮領域と伸張領域で多少異なっているものの、 p 軸を中心にした歪んだ楕円型を呈していることがわかる。そして、図(b)には、Type 4-BL3 (伸張領域における異方圧密履歴を有するタイプ) の応力経路試験から求めた降伏点とそれに基づいて描いた平均的な降伏曲線の形状が示されている。この降伏曲線も、圧密経路の方向に大きく回転した楕円のような形状となっている。なお、Type 4-BL1 の降伏曲線の形状は先の図 3-16 (a) に示した通りである。得られた降伏曲線は、いずれも、圧密経路を中心とした歪んだ楕円のような形で近似でき、結果として、それらの形状は、お互いに著しく異なったものである。このことは、降伏曲線の形状が、応力域の違いよりもむしろ、圧密経路履歴に大きく依存していることを意味し、降伏特性、或いは変形特性を考える上で、今の応力状態を把握することの重要性を示すものである。なお、図 3-17 に示す降伏曲線の形状は、破砕性の異なる材料に対しても同様に見られ (Miura, Murata and Yasufuku, 1984; 三浦・安福, 1983)、ここで示した結果の普遍性を認識することができる。

次に、図 3-16 と図 3-17 には、それぞれの降伏点近傍における塑性ひずみ増分 (dv^p と $d\epsilon^p$) の方向も示されている。その増分ベクトルの方向を見ると、いずれの Type も、特に応力比の高い領域では、降伏曲線に対して直交した方向を示していない。これは、塑性ポテンシャル曲線が降伏曲線と一致せず、弾塑性構成式を検討する上で、関連流れ則を用いることの難しさを表すものであるが、このことに関しては、4.3.3 において、さらに詳しく言及する。なお、降伏点近傍での塑性ひずみ増分 dv^p 、 $d\epsilon^p$ の求め方については、Miura, Murata and Yasufuku (1984) によって詳述している。加えて、図 3-18 は、図 3-16 と 3-17 に示された塑性ひずみ増分ベクトルの特性を、 $\eta - dv^p/d\epsilon^p$ 関係に整理したものである。この図から、 $\eta - dv^p/d\epsilon^p$ 特性にも、降伏曲線の形状と同様に、著しい圧密経路履歴依存性を見ることが出来る。特に、 $dv^p/d\epsilon^p = \infty$ となる応力比の値が、3つの Type で大きく異なることが特徴的である。

3.4.2 降伏曲線の勾配の特性と塑性増分ベクトルとの関係

等方圧密履歴を受けた緩い砂や密な砂の降伏曲線の接線勾配 dq/dp は、応力経

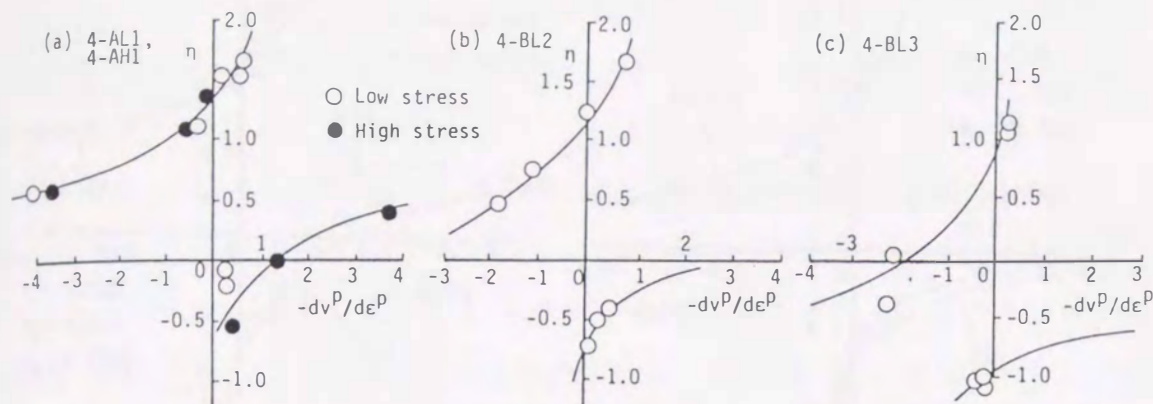


図3-18 降伏点近傍での応力比と塑性ひずみ増分比の関係；
 (a) Type 4-AL, 4-AH 試験の結果、(b) Type 4-BL2 試験の結果、
 (c) Type 4-BL3 試験の結果、

路には依存せず、応力比のユニークな関数で与えられることを、数多くの実験的検討によって明らかにしている（三浦・山本，1982；Miura, Murata and Yasufuku, 1984；村田・兵動・安福，1987b）。すなわち、

$$\frac{dq}{dp} = G(\eta) \quad (3-3)$$

の関係が成り立つ。等方圧密は、異方圧密の特殊な場合と考えられるから、この等方圧密砂に対して得られた知見は、異方圧密砂の降伏特性の特殊な場合として位置づけられるべきである。そこで、ここでは、このことを踏まえて、異方圧密された砂の降伏曲線に対しても、応力比とそれに対応する降伏曲線の接線勾配 dq/dp の関係に着目して整理を行った。その結果が、図3-19である。

図3-19は、図3-16と図3-17に示した降伏曲線の形状を、応力比 η と接線勾配 dq/dp で整理したものである。図(a)は、Type 4-AL1（低圧域，応力比 0.8 で異方圧密）と Type 4-AH1（高圧域，応力比 0.8 で異方圧密）の $dq/dp-\eta$ 関係をまとめて示し、図(b)と図(c)は、それぞれ Type 4-BL2（低圧域，等方圧密）と Type 4-BL3（低圧域，応力比 -0.8 で異方圧密）の $dq/dp-\eta$ 関係を示してい

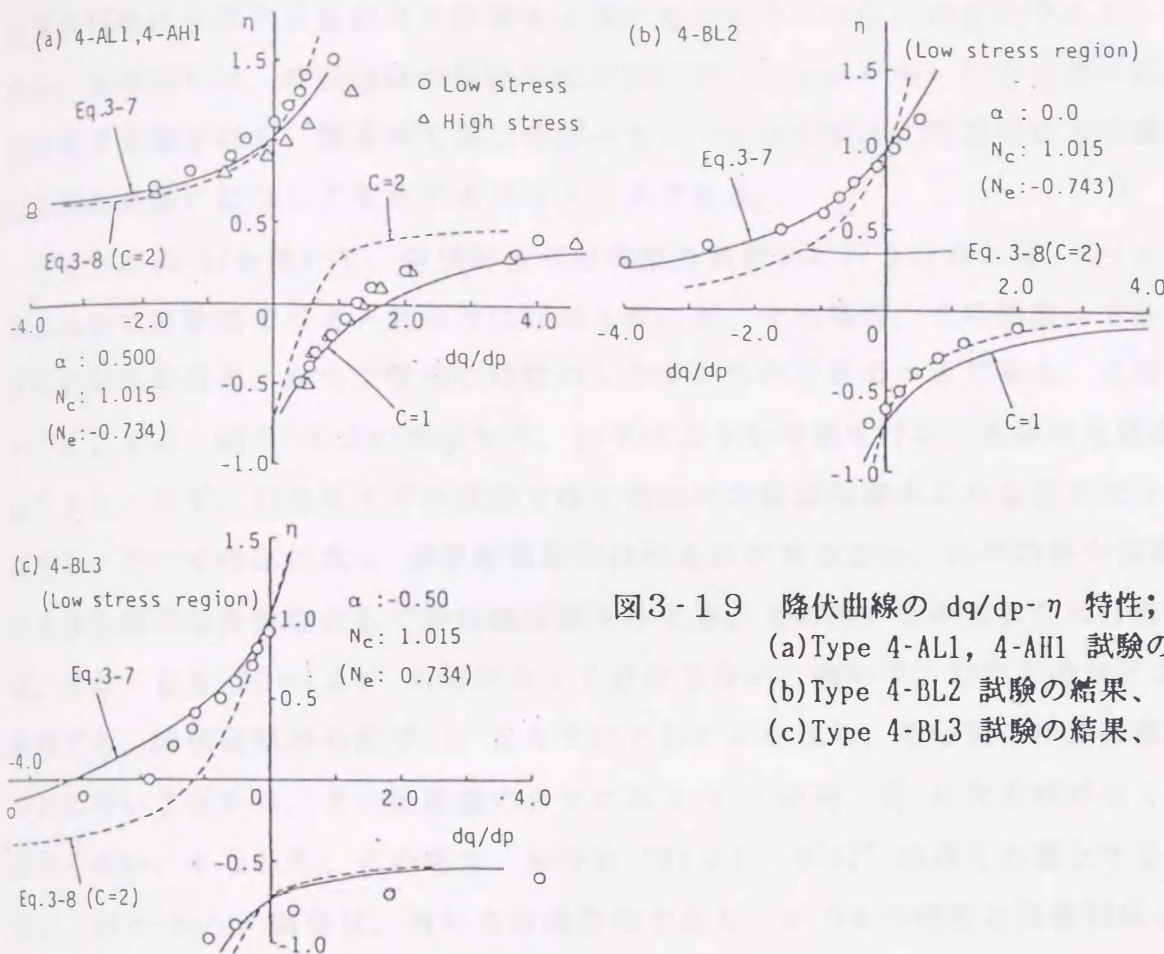


図3-19 降伏曲線の dq/dp - η 特性;
 (a) Type 4-AL1, 4-AH1 試験の結果、
 (b) Type 4-BL2 試験の結果、
 (c) Type 4-BL3 試験の結果、

る。この結果によると、 η - dq/dp 関係は、圧密経路の違いによって著しく異なった特性となることがわかる。特に、 dq/dp の値が急増する応力比（勾配が無限大になる応力比）が、各 Type で異なることには注目すべきである。しかしながら、いずれの Type も $dq/dp = 0$ となる応力比 N の値は、概ね同じ値を示し、圧密経路や応力域の影響をさほど受けないことがわかる。このことを踏まえると、各試験タイプの dq/dp - η 関係は、圧密経路の方向や応力域に関係なく、以下のような応力比と降伏曲線の p - q 空間における傾き方を表現する変数 α の関数で表される。すなわち、

$$\frac{dq}{dp} = G(\eta, \alpha) \quad (3-4)$$

となる。この式は、 α が常に 0 である時、式(3-3)そのものとなる。ここで α

は降伏特性に及ぼす圧密経路の影響を反映するための一つの内部変数であり、これは、具体的には、降伏曲線の接線勾配が無限大 ($dq/dp = \infty$) になる時の応力比の値で定義される。第4章で詳しく述べるように α の値は、現在の応力状態や応力経路履歴に依存して変化するパラメータである。

さて、式(3-4)を用いて、降伏関数の定式化を具体的に行うためには、 $G(\eta, \alpha)$ が具体的な関数型で与えられなければならないが、その場合、その関数はできるだけ汎用性が高く、かつ工学的に理解のしやすいものであるべきである。このため、ここでは、図3-19の結果から、以下のような考察を行い、具体的な関数型を与えた。まず、1)各タイプの試験で降伏曲線の勾配が無限大になる応力比 α が存在し、かつその応力比 α が圧密経路依存性を示す事実から、この特性を表現できる最も簡単な関数型として双曲線関数を与える。その時、その関数型の分母には、少なくとも " $(\eta - \alpha)$ " の項がなくてはならない。次いで、2)何れのタイプの試験でも、降伏曲線の勾配が0となる応力比 N が存在し、その値は圧密経路に依存しないことから、その関数型の分子には $\eta = N$ の時、0になる項がなくてはならない。すなわち、この場合、分子は " $X(\eta) - X(N)$ " の項を必要とする。また、3) $\eta - dq/dp$ 関係は、何れも非線形的であり、かつその特性は地盤材料に依存するはずだから、そのことを評価できる定数 c が関数の中には含まれているべきである。そして、4)与えられる関数は、後述の式(3-11)の中で、積分可能な形式でなければならない。つまり、式(3-11)中の " $1/[G(\eta, \alpha) - \eta]$ " が積分可能でなければならない。さらに、5)ある特殊な条件として、 $\eta = \alpha$ を考えたとき、与える関数は、後述の式(3-6)で与える等方硬化モデルのそれ (Yasufuku, Murata and Hyodo, 1988)に帰着すべきである。以上のことを踏まえると、 $G(\eta, \alpha)$ の具体的な関数型として次式の双曲線関数が最も適切である。すなわち、

$$\frac{dq}{dp} = \frac{[\eta - (2-c)\alpha] \eta - [N - (2-c)\alpha] N}{c(\eta - \alpha)} \quad (3-5)$$

$$|N| > |\alpha|$$

ここで、 N と c は材料定数であり、 N は $dq/dp = 0$ における η の値、 c の値は双曲線の形状を特定する定数であり、 $\eta = N$ の時の $\eta - dq/dp$ 曲線の接線勾配

から決定することができる (Yasufuku, Murata and Hyodo, 1988)。また、記号“| |”は絶対値を意味する。上式は、 $\alpha = 0$ の時、Yasufuku, Murata and Hyodo(1988)の示した等方硬化モデルのそれに一致し、この場合、

$$\frac{dq}{dp} = \frac{\eta^2 - N^2}{c\eta} \quad (3-6)$$

と簡単になる。さらに、上式において、もし、 c の値が 2 であり、 N の値が、限界状態における応力比 M と等しければ、式(3-6)は、修正Cam-clay モデルのそれに帰着する。このことから、式(3-5)は修正Cam-clay モデルにおける η - dq/dp 特性を三軸空間において最も一般的な形で表した関数であると結論できる。

また、式(3-5)は $c = 1$ 及び 2 の時、以下に示す、比較的簡単な式となる。

$c = 1$ の時：

$$\frac{dq}{dp} = \frac{(\eta - \alpha)\eta - (N - \alpha)N}{(\eta - \alpha)} \quad (3-7)$$

$$|N| > |\alpha|$$

$c = 2$ の時：

$$\frac{dq}{dp} = \frac{\eta^2 - N^2}{2(\eta - \alpha)} \quad (3-8)$$

$$|N| > |\alpha|$$

実験結果との対応を見るために、図3-19には、式(3-7)、式(3-8)を用いて予測した dq/dp - η 関係が示されている。図中の実線は、 $c = 1$ の時の予測結果を、また、点線は、 $c = 2$ の時の予測結果をそれぞれ示している。ここで、この予測において、 α と N_c (圧縮側の N の値、すなわち、 $\eta > \alpha$ における N の値)は、図3-19に示した実験結果から評価している。そして、伸張側の N の値 N_c ($\eta < \alpha$) については、Mohr-Coulomb 基準が三軸空間において成り立つことを仮定し、実験的に求めた N_c の値から次式で計算している。

$$N_s = \frac{-3N_c}{3 + N_c} \quad (3-9)$$

N_c の測定値、 $N_c = 1.015$ を用いると、式(3-9) は、 $N_s = -0.758$ を予測するが、この値は、図3-19に示した実測結果とうまく対応しており、結果として、予測曲線は、何れも、直線近似や等方硬化の仮定では表現できないような圧縮側、伸張側での実験曲線の特徴をうまく表している。

3.4.3 降伏曲線の定式化

砂の応力ひずみ挙動の精度よい予測を行うためには、実験的に得られた降伏特性を評価し得る降伏関数の決定が必要である。ここでは、前述した実験結果に基づき、異方応力状態にある砂に適用可能な降伏関数を提示する。

降伏曲線の特徴を表す式(3-3)を用いると、降伏関数は、以下の手順で定式化できる。まず、 $q = \eta \cdot p$ の関係から、次式的全微分形を得る。

$$dq = \eta \cdot dp + p \cdot d\eta \quad (3-10)$$

次に、この関係を式(3-4)に代入すると、以下のような一般式を得る。

$$\ln \frac{p}{p_0} = \int_{\alpha}^{\eta} \frac{1}{G(\eta, \alpha) - \eta} d\eta \quad (3-11)$$

ここで p_0 は、 $\eta = \alpha$ での降伏曲線上の p の値で定義される。

さて、上式の $G(\eta, \alpha)$ として、式(3-5)を用い、それを上式に代入すると以下の降伏関数を得る。

$c=1$ の時 :

$$f = (\eta - \alpha)^2 + 2 \cdot N \cdot (N - \alpha) \cdot \ln p/p_0 = 0 \quad (3-12a)$$

$c \neq 1$ の時 :

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \frac{c}{2(c-1)} \ln \left[\frac{(1-c)(2\alpha - \eta)\eta + [N - (2-c)\alpha]N}{(1-c)\alpha^2 + [N - (2-c)\alpha]N} \right] = 0 \quad (3-12b)$$

上式において、式(3-12a)は、式(3-7)から誘導される降伏関数と等価であり、また、式(3-12b)で、 $c = 2$ と置いたものが、式(3-8)から誘導される降伏関数となる。すなわち、 $c = 2$ の時、式(3-12b)は、

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \ln \left[\frac{\eta^2 - 2\alpha\eta + N^2}{N^2 - \alpha^2} \right] = 0 \quad (3-12c)$$

の降伏関数を与える。なお、式(3-12c)は、第6章の構成式の三主応力空間への拡張に際して用いられる降伏関数となる。

さて、上式で、もし、 $\alpha = 0$ であれば、降伏関数 f は、

$c=1$ の場合 :

$$f = \eta^2 + 2 \cdot N^2 \cdot \ln p/p_0 = 0 \quad (3-13a)$$

$c \neq 1$ の場合 :

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \frac{c}{2(c-1)} \ln \left[\frac{(c-1)\eta^2 + N^2}{N^2} \right] = 0 \quad (3-13b)$$

となり、さらに、式(3-12b)の特殊な場合として、 $c = 2$ の場合には、

$$f = \ln \frac{P}{P_0} + \ln \left[\frac{N^2 + \eta^2}{N^2} \right] = 0 \quad (3-13c)$$

となる。これらの式は、実験的な手法によって提示した等方圧密砂に対する等方硬化型の降伏関数に一致する（村田・兵動・安福，1988）。なお、式(3-13a)は、 $N = M_c$ である場合、橋口(1972, 1978)が独自のエネルギー的考察に基づいて導いた降伏関数と等価となる関数である。しかし、実験結果から判断すると、 N の値は、 M 値とは等しくならず、 M_c よりかなり小さい値を取る。ここで、 M_c は、三軸圧縮領域において $dv^p/d\varepsilon^p = 0$ となる応力比である。

図3-20は、 N をパラメータとして、式(3-12)を用いて描いた正規化降伏曲線群を示している。図(a)から(c)は、 c の値を1に固定して、 α の値をそれぞれ0.5, 0.0, -0.5 として予測したものである。また、図(d)から(f)は、 c の値を2に固定した場合の予測結果である。これより、 N の値や α の値が、降伏曲線の形状に大きな影響を与えていることが理解できる。また、図(b)と(e)には、比較のために、Poorooshasb(1971)の示した降伏関数($m = 0.6$)を用いて描いた降伏曲線も併せて示しているが、予測式との形状の違いは明らかである。また、図中に示したバンドは、実験的に求めた降伏曲線の確からしい範囲を正規化して示したものである。この図は、もし、適切な N と α の値を与えることができれば、何れの提案式も、その形状の特性をうまく表しうることを示している。

図3-21は、代表的な定数 c の値、1.0 と2.0 を用いて予測したシリーズ4-Aの降伏曲線と低、高圧域において実験的に得られた降伏曲線（斜線で示されている）を正規化して比較したものである。この場合の予測に用いた定数は、 $\alpha = 0.5$ 、 $N_c = 1.015$ である。この図から、予測した降伏曲線は、何れも、伸張領域で多少の違いが見られるものの、実験的降伏曲線の形状の特徴をうまくとらえている。ただし、この場合には、 $c = 1$ の時の方が、実験曲線との対応はよりよい。

図3-22は、定数 $c = 1.0$ を用いて予測したシリーズ4-Bの降伏曲線と実験的に得られた降伏曲線を正規化して比較したものである。予測に用いた α の値は、図3-19の結果から決められたものである。式(3-12a)を用いて描いた予測曲線は、圧密経路にかかわらず何れの場合も実験曲線とよい対応を示している。以上

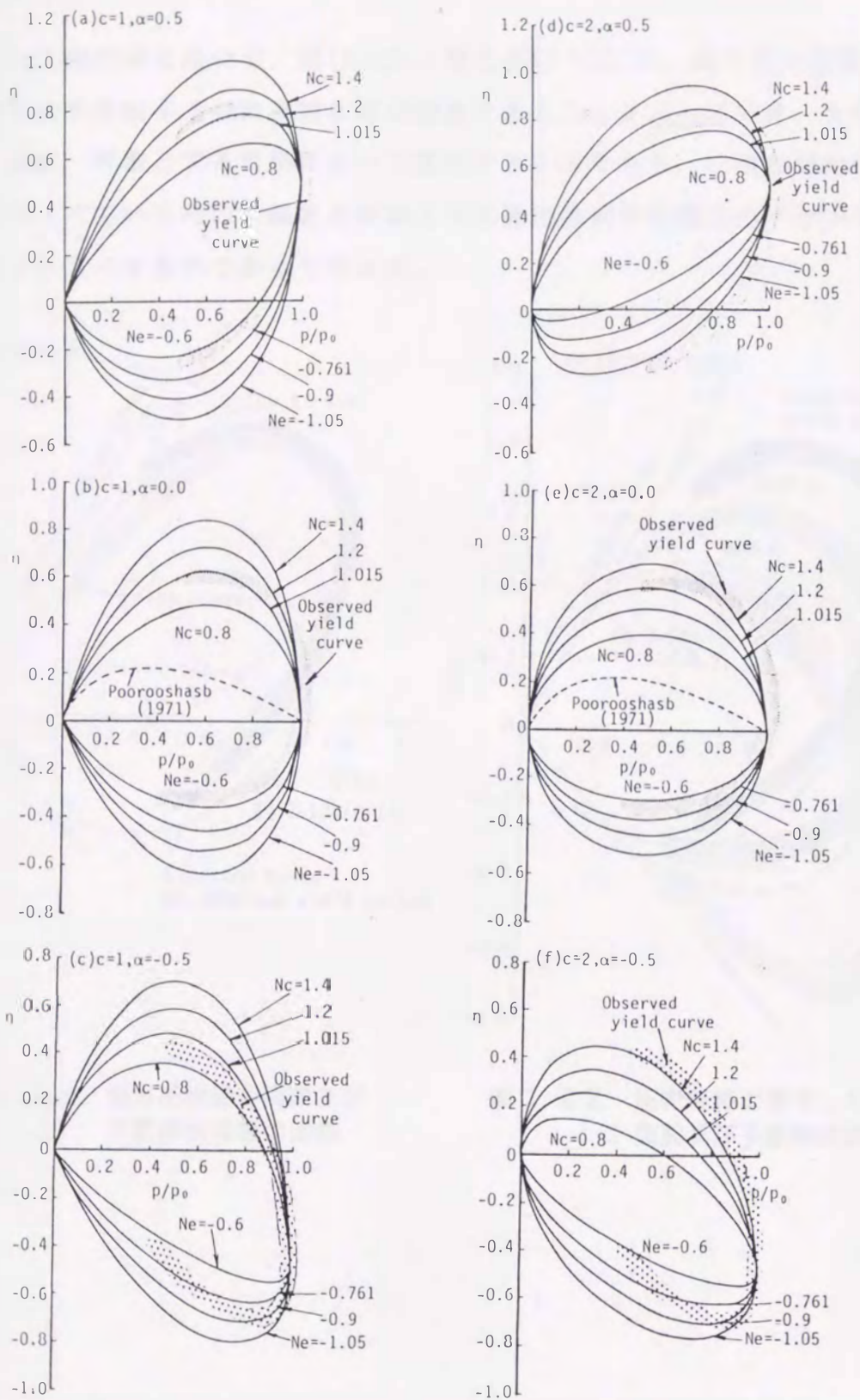


図3-20 定数 N と c をパラメータとして予測した正規化降伏曲線；
 (a) $c = 1, \alpha = 0.5$ の場合、(b) $c = 1, \alpha = 0.0$ の場合、
 (c) $c = 1, \alpha = -0.5$ の場合、(d) $c = 2, \alpha = 0.5$ の場合、
 (e) $c = 2, \alpha = 0.0$ の場合、(f) $c = 2, \alpha = -0.5$ の場合

のことは、三軸空間において、式(3-12)、特に式(3-12a)が、異方応力状態にある砂の降伏挙動を評価するのに有効な降伏関数であることを示している。ただし、 c 値は、本来、対象とする材料によって変化するものであり、 c 値の選択は、構成式を組み立てていく時の容易さと対象とする問題の要求精度とのバランスによって決められるべきものであると考える。

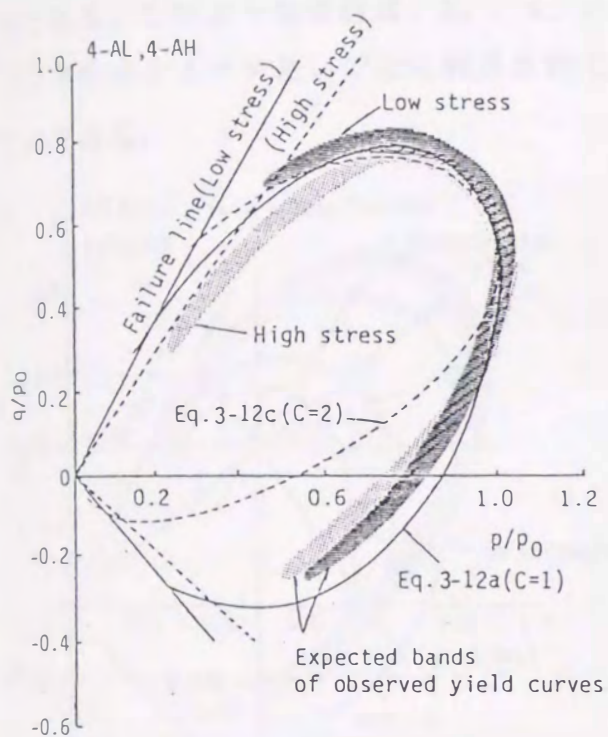


図3-21 異方圧密砂の実験及び予測降伏曲線の比較

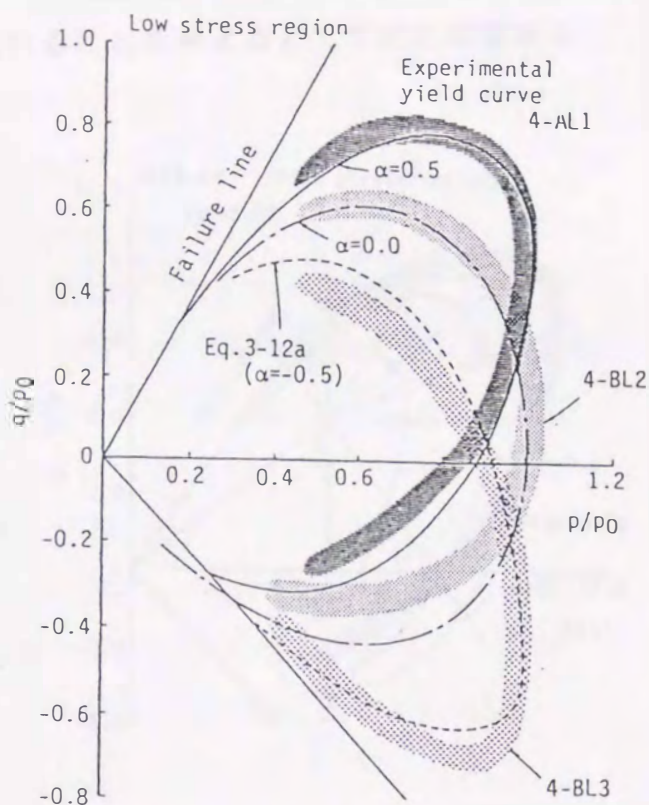


図3-22 圧密経路に着目して描いた実験及び予測降伏曲線の比較

3.5 等正規化仕事量曲線、等仕事量曲線、等軸差ひずみ曲線 と降伏曲線の対応

ここでは、式(3-1)、式(3-2)によって定義される正規化仕事量 k_m と仕事量 W 及び軸差ひずみ ϵ のコンターの形状を調べた上で、それらと降伏曲線との対応が検討される。このような検討は、 k_m 、 W 、 ϵ の塑性成分が、砂の弾塑性構成式の中で、硬化パラメータとしてよく利用されていることを考えると工学的には重要なことである。

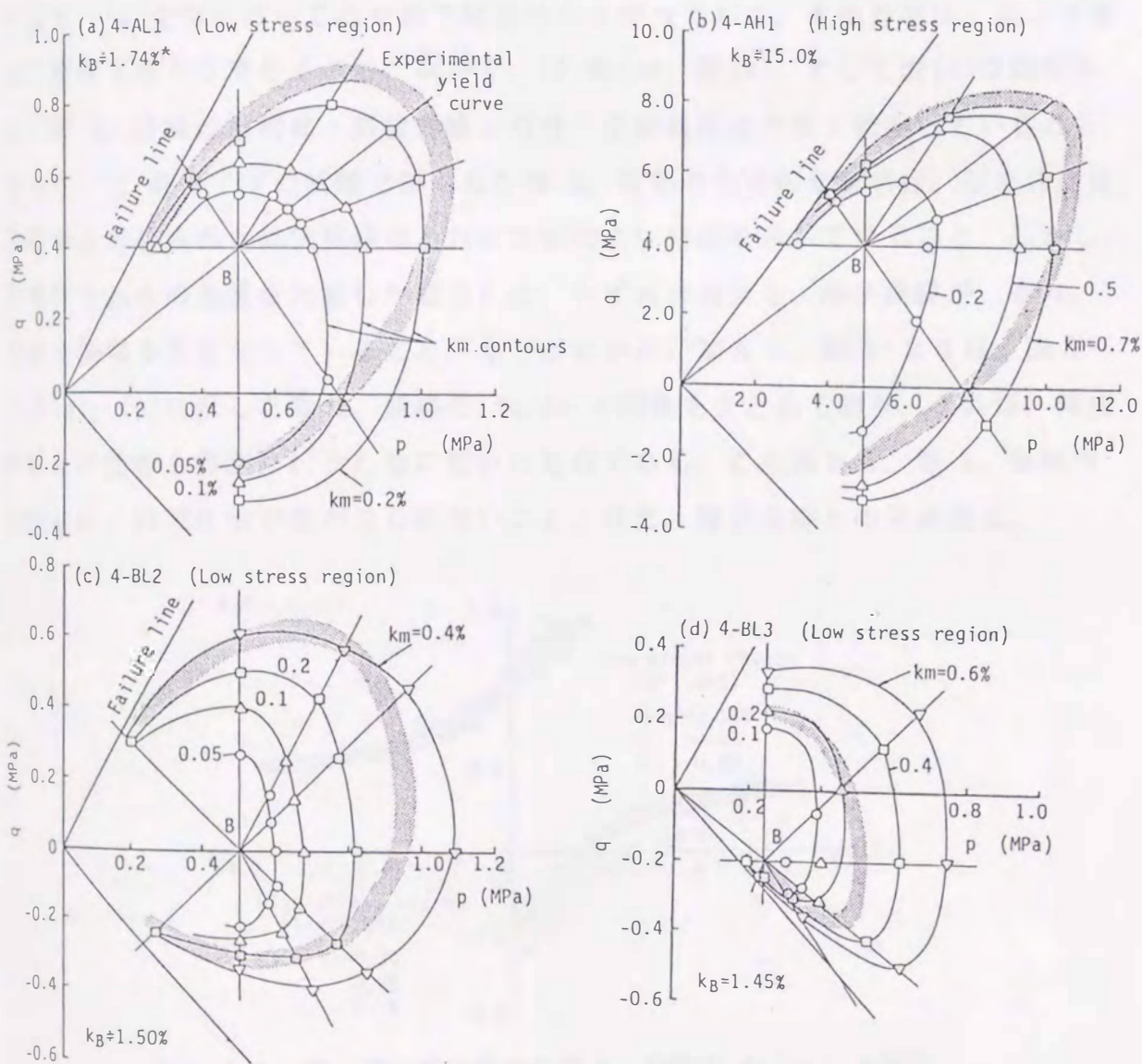


図3-2.3 各タイプの応力経路試験における等 k_m 曲線と降伏曲線の比較;
(a)Type 4-AL1 (低圧域) の場合、(b)Type 4-AH1 (高圧域) の場合、
(c)Type 4-BL2 (低圧域) の場合、(d)Type 4-BL3 (低圧域) の場合

図3-23は、各タイプの試験における等 k_m 曲線を示したものである。図(a)は Type 4-AL1 (低圧域: 応力比0.8 で異方圧密) の結果を、図(b)は Type 4-AH1 (高圧域: 応力比 0.8 で異方圧密) の結果を示している。また、図(c)と図(d)はそれぞれ Type 4-BL2 (低圧域: 等方圧密)、Type 4-BL3 (低圧域: 応力比 -0.8 で異方圧密) の結果を示している。なお、すべての等 k_m 曲線のコンターの評価は、除荷後のB点を基準にして行っている。加えて、図中には、実験から得られた降伏曲線の形状 (図3-16、17参照) をバンド (領域) で示している。この図の結果から、まず、1) いずれのタイプの等 k_m 曲線のコンターも、B点を原点にして p - q 空間において凸な形で相似的に広がっており、その形状は、歪んだ楕円で形容できそうであること、次いで、2) 図(a)、図(c)、そして図(d)の比較から、等 k_m 曲線の形状は、降伏曲線と同様、圧密経路に大きく依存していること、さらに、3) 各タイプの試験で得られた等 k_m 曲線の全体的な形状は、近似的には、実験から求められた降伏曲線のそれと比較的よい対応を示していること、しかし、詳細にそれらの形状を比較した場合には、いずれの場合も、降伏曲線が、等 k_m 曲線を横切る形となっていること、などがわかる。加えて、図3-24は、図3-23(a)、(b)に示した等 k_m 曲線の dq/dp - η 特性をまとめており、これは、降伏曲線との比較を詳細に行うために描いたものである。この図から、等 k_m 曲線の特徴には、拘束圧依存性が見られないこと、また、降伏曲線との対応性は、

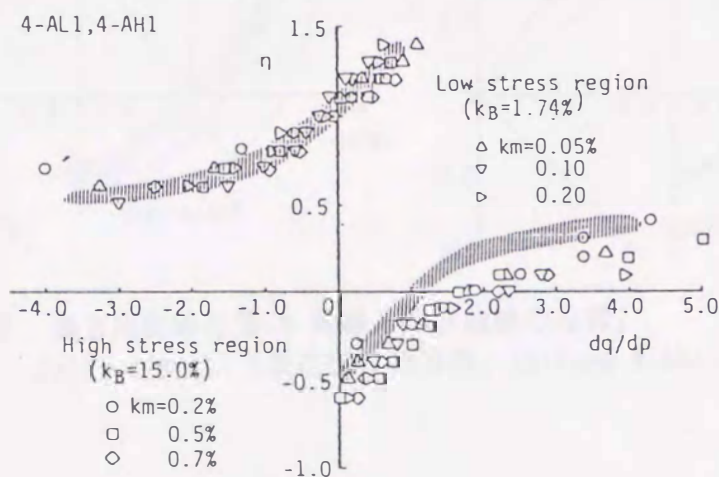


図3-24 低、高圧域における等 k_m 曲線の dq/dp - η 特性 (Type 4-AL1、4-AH1 試験の結果)

圧縮側に比べて伸張側で、やや劣ることが見いだせる。また、これと、同様の傾向は、他のタイプの試験結果でも見られることであった。

次いで、図3-25には、Type 4-AL1（低圧域）と Type 4-AH1（高圧域）に対する等 W 曲線が示されている。これらの図を見る限り、傾向的には、等 k_m 曲線の場合と大変よく似たものである。これは、等 k_m 曲線や等 W 曲線を用いれば、任意の異方応力状態にある砂の降伏曲線の形状を近似的に評価することが可能であることを示している。以上の結果は、間接的に降伏特性が異方的であることを示唆するものであり、先の降伏曲線に関する実験結果を支持するものである。

最後に、図3-26には、Type 4-AL1（低圧域）と Type 4-AH1（高圧域）の試験から求めた等 ϵ 曲線の形状が示されている。実験的に求めた降伏曲線のように p - q 空間上で閉じた形状ではないものの、そのコンターは低、高圧域共にそれぞれのタイプの圧密経路を軸にして、わずかに曲線を呈しながら広がる特性を示している。

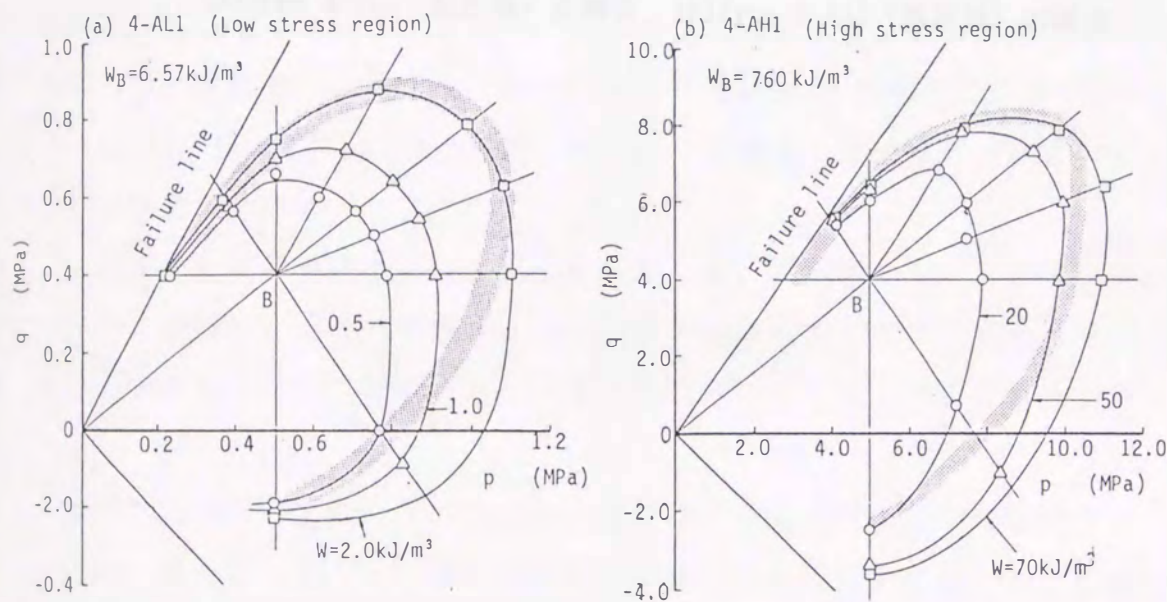


図3-25 異方圧密砂の等 W 曲線と降伏曲線の比較；
(a) Type 4-AL1（低圧域）の場合、(b) Type 4-AH1（高圧域）の場合

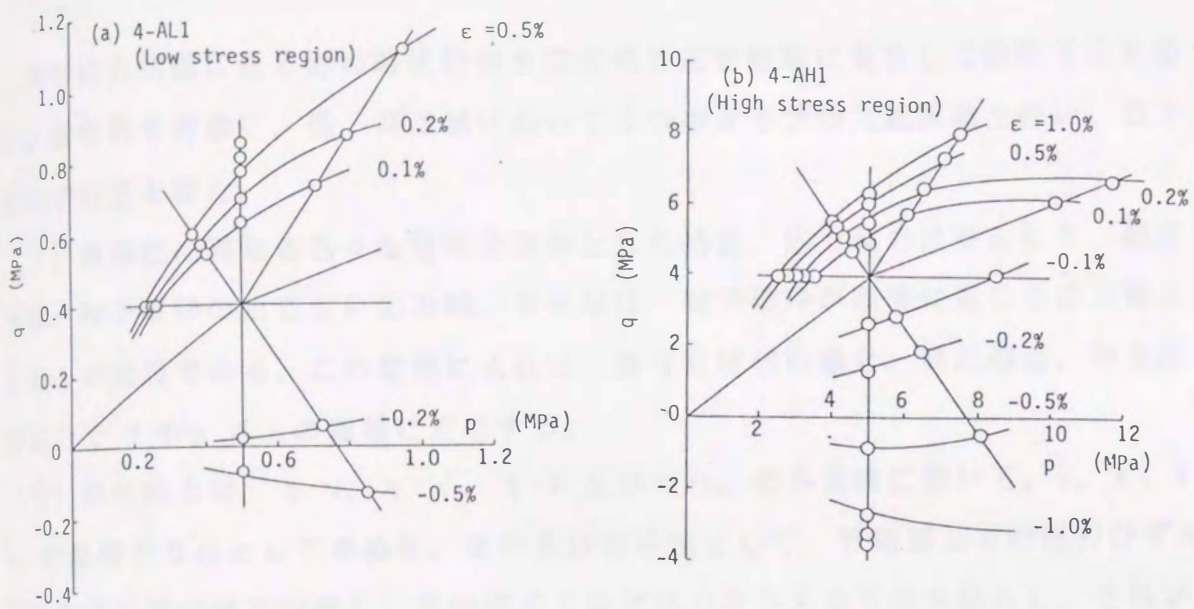


図3-26 異方圧密砂の等 ϵ 曲線と降伏曲線の比較;
 (a)Type 4-AL1 (低圧域) の場合、(b)Type 4-AH1 (高圧域) の場合

3.6 本章の要約

異方応力状態にある砂の降伏特性を応力域と圧密経路に着目して検討するために、密な砂を対象に、低、高圧域において5つのタイプの三軸試験を行い、以下に示す知見を得た。

(1) 破碎性の異なる色々な材料を対象とした場合、応力域の区分として、低圧域は、粒子破碎の生じない応力域、高圧域は、粒子破碎が顕著に生じる応力域とするのが妥当である。この定義によれば、密な秋穂砂の場合、高圧域は、等方圧密応力で 2 MPa 以上の領域に対応する。

(2) 降伏応力は、 $\eta-v$ 、 $\eta-\varepsilon$ 、 $\eta-W$ 及び $\eta-k_m$ の各曲線において、 v 、 ε 、 W 、 k_m が急増する点として求めた。その具体的手法として、算術図上での応力ひずみ曲線を2つの直線で近似し、その交点で降伏応力を与える方法を紹介し、それが、結果として妥当であることを示した。各曲線から定められた降伏点は、 $p-q$ 図上で、ほぼ同じ応力点を与える。しかし、何れの応力経路試験に対しても、明瞭な折れ曲がり点が表れるという意味で、正規化した仕事量 k_m [式(4-2)] や仕事量 W [式(4-1)] は、軸差ひずみ ε や体積ひずみ v に比べて、降伏点を求めるパラメータとしては適切である。

(3) 異方圧密を受けた砂の降伏曲線の形状は、低、高圧域ともに、異方圧密を受けた方向に回転した楕円型の形状を呈し、圧密経路履歴の方向に大きく依存する。また、その形状には、除荷経路や除荷幅の違いによる有意な影響は見られない。

(4) 実験的に得られた低、高圧域における降伏曲線を正規化して比較すると、応力比の高い領域で、低圧域における降伏曲線が、高圧域におけるそれに比べて、若干外側に膨らんだ形となる。しかし、その特性は、大変よくにており、実用的な観点、例えば、構成式に導入するという立場に立てば、この違いは無視できると判断できる。

(5) 降伏曲線近傍において求められた塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、応力域の影響は受けないものの、得られた降伏曲面に対して、特に応力比の大きい領域で直交性が保たれない。また、その方向の特性は、圧密経路履歴に依存したものである。

(6) 降伏曲線の勾配の特性は、圧密経路には無関係に、応力比と異方性を評価するパラメータ α のみの関数〔式(3-4)〕で与えられる。

(7) 実験的に得られた降伏曲線の η - dq/dp 特性の考察から、式(3-4)の具体的な関数型として、式(3-5)の双曲線関数が最も適切であることを示し、それが、修正Cam-clay モデルで導入された η - dq/dp 特性を最も一般化したものであることを明らかにした。さらに、この関数に基づいて、異方圧密砂の降伏関数として、式(3-12a, b, c)を誘導し、これらの降伏関数が有用であることを検証し、それと共に、これらの式のどれを用いるかは、実験結果との対応と、構成式の中での使いやすさ等との兼ね合いから判断されるべきであることを強調した。

(8) 等正規化仕事量曲線、等仕事量曲線は共に、 p - q 空間において、原点を中心にして、相似的に広がった歪んだ楕円型の特性を有しており、何れの曲線も、降伏曲線同様、圧密経路依存性を示す。また、これら2つの曲線は、降伏曲線の形状と比較的よい対応を示す。

参考文献

- Castro and Poulos(1977):"Factors affecting liquefaction and cyclic mobility," ASCE, Journal of GE Div., Vol.103, No.GT6, pp.501-516.
- 橋口公一(1972):"摩擦性塑性体の降伏について -硬化塑性法則-, "土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, pp.105-108.
- 橋口公一(1978):"土の構成式に関する現況総括 7 弾塑性論的アプローチ," 土質工学会論文報告集, Vol.18, No.4, pp.131-142.
- Lee, K.L. and Seed, H.B.(1967):"Drained strength characteristics of sands," ASCE, Journal of SM Div., Vol.93, No.SM6, pp.117-141.
- 三浦哲彦(1976):"高圧下における砂の挙動に関する基礎的研究," 九州大学博士論文
- 三浦哲彦・山本紀之(1982):"粒子破碎領域における砂の降伏曲線について," 土木学会論文報告集, No.326, pp.83-90.
- 三浦哲彦・安福規之(1983):"砂、礫の応力ひずみ特性について," 山口大学工学部研究報告, 第34巻, 第1号, pp.47-54.
- Miura, N., Murata, H. and Yasufuku, N.(1984):"Stress-strain characteristics of sand in a particle-crushing region," Soils and foundations, Vol.24, No.1, pp.77-89.
- Moroto, N.(1976):"A new parameter to measure degree of shear deformation of granular material in triaxial compression tests," Soils and Foundations, Vol.16, No.4, pp.1-9.
- 諸戸靖史・河上房義(1974):"砂の変形における状態関数," 土木学会論文報告集, No.229, pp.77-86.
- 村田秀一・兵動正幸・安福規之(1987b):"低・高圧下における密な砂の降伏特性," 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.183-192.
- 村田秀一・兵動正幸・安福規之(1988):"低・高圧下における砂の降伏特性を評価した弾塑性構成式について," 土木学会論文集, No.394/III-9, pp.11-20.
- Parry, R.H.G. and Nadarajah, V.(1973):"A volumetric yield locus for lightly overconsolidated clay," Geotechnique, Vol.23, No.2, pp.450-453.
- Poorooshasb, H.B., Holubec, I. and Sherbourne, A.N.(1967):"Yielding and flow of sand in triaxial compression, part II and III," Canadian Geotech. Jour., Vol.4, No.4, pp.376-398.
- Poorooshasb, H.B.(1971):"Deformation of sand in triaxial compression," Proc. 4th ARCSMFE, Bangkok, Vol.1, pp.63-66.
- Tanimoto, K. and Tanaka, Y.(1985):"A method of determining yield locus of sandy soil," Proc. 11th. ICSMFE, San Francisco, Vol.2, pp.1069-1072.

Tatsuoka, F. and Ishihara, K.(1974):"Yielding of sand in triaxial compression," Soils and Foundations, Vol.14, No.2, pp.63-76.

龍岡文夫(1975):"砂の三軸圧縮・伸張試験 -主として応力経路に関して-,
第20回土質工学シンポジウム, pp.61-70.

Javenas, F., Des Rosiers, J.P., Leroueil, S., La-Rochelle, P. and Roy, M(1977):"The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays," Geotechnique, Vol.29, No.3, pp.285-303.

Vesic, A.S. and Clough, G.B.(1968):"Behavior of granular materials under high stress," ASCE, Journal of SM Div., Vol.94, No.SM3, pp.661-688.

Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M.(1989):"Application of elastoplastic constitutive model to undisturbed soil "Masado," Proc. of Int. Conf. on Engineering Problems of Residual Soils, Beijing, Vol.1, pp.759-764.