

報告番号 ^{*} 第 2966 号

主論文の要旨

題名

増分弾塑性理論と岩質材料の破壊過程
に関する基礎的研究

氏名 市川 康 明

主論文の要旨

報告番号	※ 第 2	号	氏名	市川康明
<p>せん断塑性変形と体積塑性変形を伴いながら破壊が進展していく地盤材料の応力・ひずみ応答に対して、現象的により矛盾が少なく、かつ力学理論の体系に整合した構成則を構築することは困難な作業であり、このため、従来極めて多くの地盤材料の構成則が提案されてきておりながら未だ統一された力学モデルへは収斂していない。本論文では、塑性理論において後続降伏を含んだ降伏関数の一階微分は零であることを意味する Druckerの適合条件が増分塑性応答の別の形の表現であるという視察を手掛かりに、等方性を有する地盤材料に対して、弾性・塑性の各成分毎にせん断応答、体積応答をそれぞれ Laplace変換を用いて定義する新しい増分弾塑性理論を提案し、この力学モデルが現実の地盤材料、特に岩盤材料に対して有用であることを示した。本研究で得られた結果について以下に総括する。</p> <p>第1章では岩質材料および岩盤の変形・破壊を記述するために提案された既往の力学理論について主として歴史的な過程に重点を置いて概観した。第2章では物体の“等方性”の意味を主応力、主ひずみの空間で幾何学的に明らかにした上で、各種の構成則、例えば Hooke弾性則や、超弾性則、亜弾性則、粘弾性則、塑性流れ則を増分理論の立場から再構成した。等方な物体の応答は応力・ひずみの各不変量の間で表現されるが、この関係は各テンソルの主値（主応力、主ひずみ）を用いて表しても良い。この3つの主値によるベクトル空間で、各ベクトル（主応力のベクトル、主ひずみのベクトル）は体積成分、偏差成分およびLode角の成分に分解することが出来る。従って、等方性物体の応答はこの3成分同志の関係で表現出来るが、特に、本研究では応力・ひずみの各体積成分と偏差成分の間で表現される物体の応答を等方性として扱うこととした。換言すれば、この意味における等方性は体積成分の軸の廻りにおける軸対称問題であると理解されよう。亜弾性則や塑性流れ則では始めから増分形で応力・ひずみの応答が記述されるので当然であるが、超弾性則等で全域的な応答</p>				

主論文の要旨

報告番号	※第	号	氏名	市川康明
<p>が与えられた場合、その Gateaux 微分で増分応答が表現される。このような増分形で表しておくとも有限要素法等の数値解析が容易に導入出来る。</p> <p>第3章は本論文の理論的な中核をなし、旧来の塑性流れ理論と対比しながらせん断変形と体積変形を独立に取り扱うことの出来る新しいタイプの増分弾塑性理論を提案した。すなわち、スカラーポテンシャル理論である流れ理論が本質的に塑性せん断変形のみ（あるいは塑性体積変形のみ；例えば正規圧密粘土に対する Cambridge 理論）しか独立には扱えないのに対して、せん断変形・体積変形のそれぞれの塑性応答を定義すればその増分形として塑性構成則が自然に導入されること、その結果、塑性流れ理論の内包する種々の矛盾はこのような取り扱いによって解決しうることを示した。この章で得られた結論は以下のとおりである。1). 後続降伏面を含んだ降伏曲面は、Prager の適合条件式から導かれる 1 階偏微分方程式（空間降伏曲面式）により決定される。ただし、各成分毎の塑性応答関数が求められていると、ベクトル型降伏関数がこの応答関数の項を移項することによって定められ、このベクトル降伏関数は空間降伏曲面式を自動的に満足する。2). 流れ理論は、ここで提案した増分弾塑性理論に含まれると考えることが出来るが、偏差成分と体積成分の塑性応答を共に含む様な材料に流れ理論を適用すると、構成マトリックスの行列式が零となり、極めて不自然である。3). Drucker の安定条件は、この増分理論に依ると単に構成テンソルの非負定値を意味し、降伏関数の凸性や適合型流れ則を導くものではないことが判る。4). せん断応力と体積応力、それぞれに関する塑性応答関数は、軟化現象を取り扱わないという仮定（軟化はマクロなせん断面が形成された後に現れる構造的な現象である）の下にせん断塑性ひずみと体積塑性ひずみをパラメータとして多重 Laplace 変換を用いて表現される。実験データからこの応答関数を決定するには Laplace 変換のスペクトルに対する第一近似を用いてスペクトル点を定め、係数を最小二乗法によって求めると</p>				

主論文の要旨

報告番号	※第	号	氏名	市川康明
<p>いう過程を経る。Laplace変換を用いずに最初から指数関数の級数の形でも表現可能であるが、この場合実験データに対して基底となる指数関数を何項まで取れば良いかという指標が明確でなく、しかも、最小二乗法等のデータフィッティングに依っては指数部の係数 ($A_i \exp(-\alpha_i x)$ とした場合の α_i) と指数関数の係数 (前述の A_i) は同時に定めることは困難である (非線形最適化手法を適用しなければならないため)。この理由で Laplace変換のスペクトル近似理論が用いられる。また、地盤材料は弾性ひずみも変形の初期から非線形性を示すことが知られ、このような非線形弾性応答に対しても塑性応答と全く同様の形式で応答関数が導入出来、除荷過程も自然に表現される。</p> <p>第4章では自然乾燥状態の岩質材料に対して三軸圧縮試験を実施して軸応力、軸ひずみと体積ひずみをデジタル形式でデータ計測する方法について述べ、実際に新第三紀層の軽石凝灰岩 (大谷石) と中世代上層部に属する四万十層帯の砂岩に対してこの方法で三軸試験を実施した。この三軸試験の結果より、第3章で述べた方法を用いて各岩質材料に対する塑性応答が決定され、提案された増分構成則が妥当であることが確認された。さらに、この大谷石の構成則を用いて大谷石の三軸圧縮試験の有限要素法による数値シミュレーションを実施し、実験結果と良く一致した荷重・変形曲線が得られることを確かめ、また、供試体内で破壊域の進展する状況を再現されることを示した。</p> <p>岩は内部に無数の空隙、亀裂を内包しており、特に軟岩より成る岩盤においては水の流れの影響を無視することが出来ない。第4章では、大谷石のようにほぼ均一な空隙を一樣にかつ無数に内包する岩盤を対象として、水の流れと応力場 (運動場) が連成する方程式を運動量保存則と質量保存則から導き、各方程式の物理的意味を明らかにした。運動場における構成則には当然第3章で述べた増分弾塑性理論が適用される</p>				

主 論 文 の 要 旨

報告番号	※ 第 号	氏 名
	2	市 川 康 明

のであり、質量保存則から得られた水の流れ場に対しては構成則として Darcy則が適用される。これらの方程式は一般的な境界条件、初期条件の下では有限要素法等の数値解析法に依ってしか解くことが出来ない。このため、上記連成場の支配方程式に対して仮想仕事の原理を導いておいた。これより有限要素離散化までは直接的な道程である。

本論文では以上のように、せん断塑性変形と同時に体積塑性変形を伴って破壊の進行する地盤材料、殊に岩質材料の応力・ひずみ応答を記述する新しい増分弾塑性理論を提案し、大谷石や砂岩に対してその妥当性を検討した。ある材料（ここでは地盤材料）の応答を記述するには、経験と実験事実を総合してその挙動を規定し、その予測された特性に則した一般的な積分変換を導入する方法が妥当であろう考えられる。この際、導入された構成則が既往の力学体系にどのように組み込まれるか、あるいは力学体系を何如に変革するかを検証しなければならない。つぎに、この積分変換の離散的な核関数がスペクトル近似理論を用いて決定され、係数は最小二乗法により定められるという過程を経て実際の材料の応答が表現される。本論文はこのような考えを具体的に地盤材料の弾塑性応答に適用する一つの方法を提示したが、その妥当性に対する最終的な検証は一に懸って対象とする材料（ここでは岩質材料）の挙動計測を積み上げるより他ない。今後は種々の岩質材料に対して、さらには砂や粘土のような土質材料に対してここで示した構成理論が妥当であるか否かを検討して行く予定である。なお、岩盤に対しては岩質材料の構成則をそのまま適用することが出来ないが、損傷場を導入して岩盤の内包する分布亀裂を表現すれば、岩質材料の物性はそのまま母岩の物性として用いられるので、岩盤に対する損傷力学の体系とここで示された岩質材料の構成則は緊密に関連し、両方の理論を併せて岩盤力学の一分野を構成すると考えられる。また、斜面や地下空洞等の岩盤構造物を施工する場合、現場計測に依って構

主論文の要旨

報告番号	※第 乙	号	氏名	市川康明
<p>造物の挙動を観測し、そのデータをフィードバックする必要がある、そのために逆解析(Sakurai, Shimizu and Matsumuro 1985, Gioda 1985) が用いられる機会も最近は多いが、これらの逆解析法の多くは弾性や完弾塑性等、モデルを固定してそのパラメーター同定する問題となっている。完全なモデル同定は困難であろうが、本論文で示した弾塑性理論を適用して離散スペクトルを定めるという方法が開発されれば、パラメーター同定からモデル同定に近寄った方法となり、より妥当な逆解析が実施出来るのではないかと考えている。</p>				