Ⅲ—110　　層状体の空洞周辺の応力状態について

京都大学大学院　学生員　○大西有三
京都大学大学院　学生員　中川浩二
京都大学　正員　小林昭一

1．はじめに

最近、大規模な地下構造物、長大トンネルなどの建設が、ますます増加し、種々の岩盤条件の下での開さくが、必要とされるようになった。これに伴なって、このような地下空洞周辺の力学的挙動に関する研究が一層重要となってきた。空洞周辺の力学的挙動は、従来は主として、等方等質な完全弾性体、粘弾性体、あるいは、完全塑性体として、解析されてきた。しかし、一般に岩盤には多数の層理、節理などの不連続面が含まれていて、複合脆性材料としての性質が卓越し、地下空洞周辺部の力学的挙動は、ほとんど、この性質に左右されると考えられる。

岩盤に作用する荷重は、弱い不連続面に局部的な破壊を起し、その部分の強度をさらに低下させ、応力、変形は再配分される。この過程は、ある荷重状態の下で、逐次的に進行し、ある安定な状態に達するであろう。さらに、荷重が加わると、同様の逐次的な変化を経て、安定な状態へと到達する。材料自身は、刻々、局部的な変化を繰り返し、岩盤全体としては、逐次的に、非均質な性質を有してくる。このような逐次的な非均質物体の問題は、数学的な解析が困難であった。ところが、最近の大型電子計算機のめざましい発達によって、数値解析法が可能となってきた。その中でも、有限要素法（Finite Element Method）は、数年来、急速に発展した方法である。本研究は、この方法を適用して、層状体中の空洞周辺部の力学的挙動を、非均質な弾性体の問題として、逐次的に解析することを、試みたものである。

2．解析方法

ここでは、岩盤中にある円孔の問題を例にとって解析方法を述べる。基本的な仮定として、次のものを設ける。

(i) 岩盤の破壊は、ある方向の引張り歪がある一定値に達したときに生じる。

(ii) 岩盤は、局所的に弾性体である。

(iii) 岩盤は、巨視的な異方性を有している。

以上のような仮定によりモデル化した岩盤中の円孔に、無限遠から荷重が作用するものとして、解析を行なう。

岩盤、あるいは、空洞周辺部に潜在する層理、節理に伴なう微小亀裂、あるいは、外荷重による微小亀裂は、空洞全体の崩壊には至らず、ある荷重条件の下で、これら不連続面を含んだまま、安定する状態がある。荷重が増加すると、仮定(i)を満たすような条件の下で、さらに局部破壊が進行する。この部分の材料の性質は、破壊前のものとは、全く異ったものとなる。この場合の材料性質は、近似的には、亀裂と平行な方向の弾性係数は変化しないが、亀裂に直角方向の弾性係数が、極めて低下した異方性弾性体と考えられる。

以上のような考え方に基づいて、次のような順序で計算を行なう。

(1) 与えられた問題を、等方均質弾性体、異方性弾性体、あるいは、非均質弾性体と考えて応力(歪)、変形状態を求める。

(2) ある方向の最大引張歪が、ある一定値になるまで、外荷重を比例的に増減する。こうして得た荷重が、与えられた場所に新しい亀裂（不連続面）を発生するための限界荷重である。

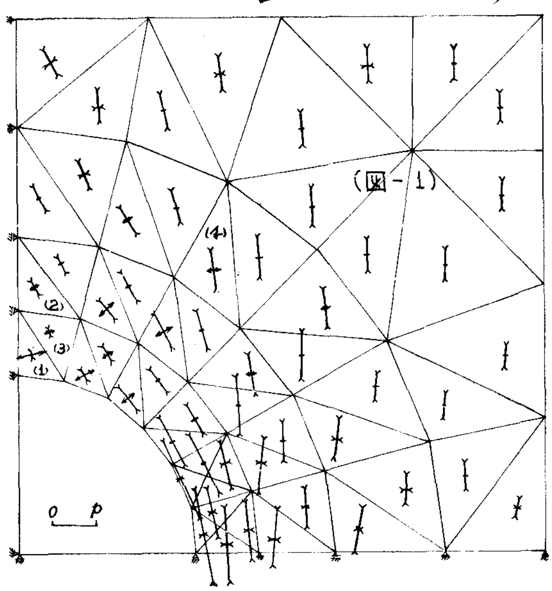
(3)、(2)の最大歪を生じた要素を、この亀裂（不連続面）を主軸とする直交異方性体に置き換える。亀裂の方向に直角な方向の弾性係数は、極端に減少させる。（ただし、弾性係数を零におくと計算遂行が困難になる。）

(4)、(3)の状態下で、(1)～(3)の操作をくり返す。

このような計算を、逐次繰り返すことにより、不連続面の進展による逐次破壊現象が解析できる。なお、上の考え方では、一定方向の歪の最大値が、ある一定値をとると破壊すると仮定したが、等方弾性体の場合には、一定方向の最大歪という項を、最大主歪に置き換えて、同様の計算を行なえばよい。

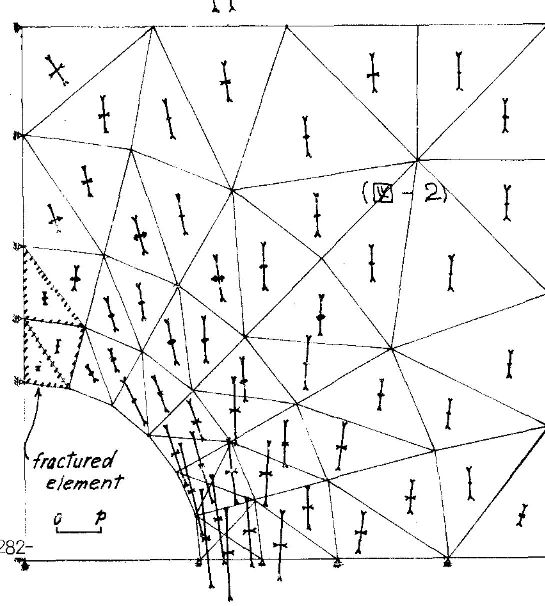
3. 計算例

図-1のように円孔を有する正方形板を、有限個の要素に分割する。今、等質な層が、y方向に入った場合の計算例を示す。計算値として、弾性係数 1.0×10^{5} (kg/cm²)、異方性とした場合の弾性係数は 1.0×10^{3} (kg/cm²) を使用した。ポアソン比は $\frac{\nu_{xy}}{E_x}=\frac{\nu_{yx}}{E_y}$ より、$\nu_{xy}=0.25$, $\nu_{yx}=0.0025$、せん断弾性係数 G は $\frac{1}{G}=\frac{1}{E_x}+\frac{1}{E_y}+\frac{2\nu_{xy}}{E_x}$ より求めた。計算においては、x方向の最大引張歪が、ある一定値をこえた場合を要素の破壊と考える。この方法によると、数多くの要素が一度に崩壊することもある。(この一定値は、材料の性質から決定される。) しかしながら、破壊現象は逐次的であり、この状態に至るには、どのような過程をたどったのか考える必要がある。すなわち、一定値をこえる引張歪を生じる要素の中で、最大引張歪の要素から、崩壊が始まるものとする。そして、この要素を、異方性要素に置換し、同じような操作をくり返す。



こうして、どのような順序で、要素が崩壊していったのか、計算によって、知ることができる。図-1のモデルにおいて、単位(200)の等分布荷重に対して、計算を行なうと、予想されるように、要素の崩壊は、要素1から始って、2, 3, 4と進行する。歪状態を示すと、表-1のようになる。要素1, 2, 3が崩壊すると考えた時の、要素1, 2, 3, 4の荷重状態を考える。最大引張歪のある一定値を ε_u とすると、各要素が崩壊するときの荷重は、$\varepsilon_u\times200$ を各要素の歪で割った値に比例する。要素1が最小の荷重で ε_u に達するのは、当然である。しかし、表-1より、要素2の歪 0.560×10^{-3} は要素3の歪 0.713×10^{-3} より小さい。これは、要素1を崩壊させたのち荷重をさらに増加すると、要素2が崩壊すると同時に要素3も崩壊することを示している。要素4を崩壊させるには、さらに荷重を増加させねばならない。ここで、等方等質の主応力状態と要素3の崩壊時の主応力状態を図-1, 図-2に示す。これらの計算結果は、丹羽, 小林ら[1]の実験結果とよく一致している。

ここでは、節点数40, 要素数56で、層がy方向に入ったモデルを解析したが、筆者らは、層が斜めに入った場合の、さらに節点数、要素数の多い問題の解析を進めている。



参考文献

1) 丹羽, 小林, 小柳, 中川 「モルタル内の初期欠陥からのひびわれの発生および発達」 セメント技術年報, XXI, 昭42

	要素1	〃2	〃3	〃4
等方等質	0.844	0.297	0.226	0.398 $\times10^{3}$
要素1崩壊時	1.856	0.560	0.393	0.449 $\times10^{3}$
要素2 〃	2.369	0.902	0.713	0.451 $\times10^{3}$
要素3 〃	3.313	1.692	1.483	0.486 $\times10^{3}$