

トンネル・地下空洞における岩盤の緩み

—粒状体地山の場合を中心として—

東京都立大学 今田 徹

1、はじめに

トンネルの安定や支保構造に作用する荷重の問題を検討するとき“緩み”という言葉がよく用いられる。緩みという言葉は直感的であり、観念的には理解し易いものであるけれども、正確に定義しようとするとは非常に難しく、曖昧に使用されているのが一般的である。緩みという概念は従来の支保構造である木製支柱式支保工や鋼アーチ支保工のようにトンネルの内側から“荷重を支持して”トンネルの安定を確保しようとする支保構造の設計に関連して用いられてきている。また、最近ではトンネル周辺の岩盤の耐荷力の減少との関連で検討の対象となっている。

支保工に作用する荷重は、従来から1) 真の土圧、2) 緩み土圧、3) 膨張性の土圧に分けて取り扱われてきた。このうち緩み土圧が多くのトンネルで支保工の設計を決定する支配的な要因であった。トンネルの施工では掘削後できるだけ速やかに支保工を施工するのが経験に基づく原則であり、支保の施工が遅れるとトンネル周辺の地山の緩みが増大して、作用する荷重が増加しトンネルの安定を得るのが難しくなると考えられている。緩みというのはそれが進行すると支保工に作用する荷重が増加するというような特性を持っている現象であると理解されている。これに対し、真の土圧や膨張性土圧は掘削面の変位の進行にともなって基本的には減少する性質を持っており、緩み土圧は特異な性格を持っているといえる。

2、緩み土圧

緩むという現象があるからには、緩まない状態に対するものとして用いられていることになる。緩まない状態とは緩んだ状態と同様に定義することは難しいと考えられるが、地山が一体性を確保している状態をさすものであろう。一体性とは地山がばらばらでなく連続体として挙動するような状態をさすものであり、変形の多少や耐荷能力の大小には無関係の概念である。また、弾性的に挙動するか塑性的に挙動するかにも無関係と考えるのが妥当であろう。連続体として挙動する限りにおいて掘削面の変位の増大と共に、その変位を拘束しようとする荷重(支保荷重)は減少するという傾向を持つはずである。従って、連続体として挙動しない状態が緩みの原因であり、緩みはトンネルの掘削の結果、不連続性が地山の挙動を支配するような状態が生ずるような地山において起こる特有の現象と考えることが出来よう。不連続性の生ずる原因は、地山に存在している節理などの顕在、潜在的な不連続面、応力再配分によるトンネル掘削面の応力が地山の強度を超えた結果破壊が生じることによる不連続面および水の作用の結果によって生ずるものなどがある。緩むということは、トンネルの場合これらの不連続面がトンネルの掘削によって不連続面に沿って分離あるいは移動が生じ耐荷力を失った状態になったことを意味するものと考えられる。このような分離、移動が可能になる条件は拘束圧が低下した状態のみであり、緩みの発生には不連続面の存在と、拘束圧の低下という条件が必要であるといえるであろう。緩みが発生すると耐荷能力が減少する結果、その自重さえも支持することが出来なくなり崩落や落盤というような現象が生ずることになる。これを防ぐため支保工によって支持すれば、支保工には荷重が作用することになり、これが緩み荷重と呼ばれるものに相当することになるであろう。緩み荷重を量的に取り扱うことはその性格から非常に難しく、その特性を系統的に理解することを困難にしている。そこで、不連続面が極端に発達した場合と考えられる粒状体地山の場合について、落し戸実験の結果を参考に緩み荷重の持つ特性を検討することにする。落し戸実験は土被りが浅いトンネルについての現象を模擬する実験となっている。

3、粒状体地山の緩み

落し戸実験は、底板の一部(落し戸)を降下させることが出来るようになっている特殊な実験土槽を用い

て行う実験である。実験土槽に所定の深さに砂あるいは散弾などを詰めた後、落し戸をそれに作用する荷重を計りながら、徐々に降下させて行く。落し戸の降下量と落し戸に作用する荷重との関係は一般に図-1に示すような経過をたどる。図-1¹⁾は鉛の散弾を用いて行ったもので、 ∞ の記号が付いているものが普通の落し戸実験の結果に相当する。3*3等の記号はロックボルトを入れた場合について示すもので、数字はロックボルトの間隔である。降下量ゼロの状態における落し戸荷重は土被り相当の鉛直荷重を示し、これはトンネルの掘削前の状態を示している。落し戸を降下させると、落し戸に作用する荷重は急激に減少し、落し戸幅の0.5%程度の変位で最低値に達し、以後徐々に増加する。

落し戸の降下はトンネルの掘削を模擬したことになる。落し戸を降下させることによってトンネルの掘削面の応力が開放され、トンネル部分の拘束が減少する。この結果、応力再配分が生じ、落し戸に作用していた荷重の一部は隣接した実験土槽の底に移ることになる。急激に荷重が降下するは応力再配分が行われている状態であり、弾塑性的な挙動によるこの地山の地山特性曲線に該当する。この部分は粒状体以外の場合とその傾向は異なるものではない。

トンネルを掘削し支保工を施工した状態がこの落し戸荷重-変位曲線のどの位置に相当するかは、施工法や支保工の建て込み時期によって変化すると考えられるので決めつけることはできないが、非常に小さな変位で最低値に達することから、一般的には最低値に達した以降の状態にあるものと考えることが出来る。支保は地山特性曲線の右下がり部分で平衡点が来るようにするのが理想であるが、多くの場合は最低点に達した状態以降になっていると考えられる。この状態における落し戸に作用している荷重は落し戸と共に移動する落し戸に乗っている部分（直接領域）の土砂の重量にほぼ等しく²⁾、それ自身では自重をも支持し得なくなった応力の開放された領域を支持するために必要な荷重、すなわち、緩み荷重の典型になっている。落し戸実験では緩み荷重が変位と共に著しく増加するという傾向はみられない。図-2は図-1実験の地山に若干の粘着力をつけた場合の結果である。落し戸荷重の最低値が小さくなると共に、この小さくなった分は変位の進行と共に大きく増大し粘着力のない場合に近づく傾向を示している。粘着力のない地山を用いた落し戸実験の結果は緩み荷重の最大値を与えるものと考えられる。粘着力を持たない地山に関する落し戸実験で、落し戸に作用する荷重が、変位が進行してもあまり変化しないということは、緩み荷重を抑制しようとして変位を小さく保っても緩み荷重を減少させることはできないことを意味している。すなわち、落し戸実験に用いられるような地山の場合は、緩み荷重をトンネルの内側から支える様な支保工の形態では緩みを減少させることが出来ないと言うことである。しかしこのような場合でも、図-1に示されるようにロックボルトで地山を補強することにより緩み荷重は小さくすることは出来る。地山を補強することが緩みの抑制に有効であることを示している。

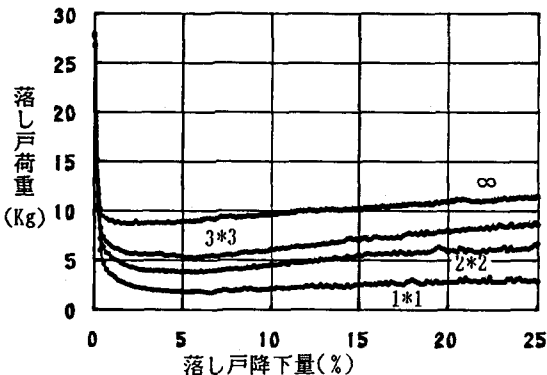


図-1 落し戸実験の1例（粘着力のない場合）

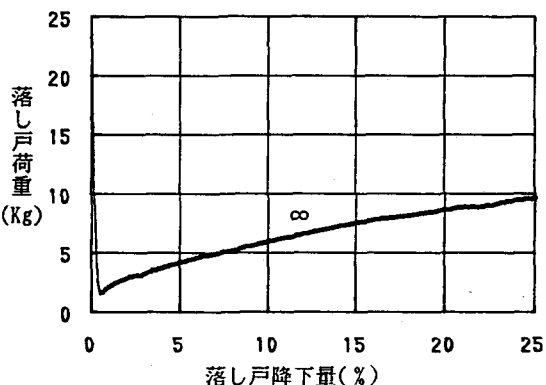


図-2 図1の実験の材料に粘着力を与えた場合

1) 茂木 伸太郎 「垂直縫地ボルトの効果に関する研究」 昭和62年度 東京都立大学卒業論文

2) 山本 稔 「ロックボルトの作用効果について」 土木学会論文報告集 NO.277 1978-9