

岩盤変形試験と内部ひずみ分布特性

建設省土木研究所

飯田隆一, 柴田 功, 西岡 正, ○斎藤孝三

1. 序論

一般に岩盤の中には、キレツ・節理の不連続面が大なり小なり存在していて、この不連続面での複雑な機構が、岩盤の力学的特性の解明に障害となっていることは周知の通りであるが、我々はこの複雑な挙動を詳細に調査する目的で、現位置載荷試験の際に岩盤表面変位のほかに岩盤内のひずみ分布の測定を実施してきている。特に、この不連続面が変形試験時に及ぼす影響を観測するために、岩盤表面から深部までの連続したひずみ計を開発して以来、数カ所のダムに於いて岩盤内部の詳細なひずみ分布が得られている。このひずみ計の構造について簡単に紹介すると、長さ約 10 cm のひずみ計を互に少しづつラップさせながらこれをエポキシ樹脂で棒状に固めたものであり、ボーリング孔の深さ約 1 m の全長にわたりひずみ測定が可能なものである。このひずみ計によって得られた変形試験時の岩盤内部のひずみ分布については、岩盤のキレツや節理の不連続面の状態に非常に良く対応している興味ある結果を示しており、ここに代表的なものについて紹介する。

2. 変形試験と岩盤内ひずみ測定

これまで岩盤内部のひずみ測定を行った中から今回紹介するものについて地点別に変形試験結果、その他の諸数値を整理したものを示すと表-1の様になる。

表-1 測定地点の詳細

地 点 名	川 治 ダ ム		滝 沢 ダ ム		大 川 ダ ム			
	A	B	No.1	No.2	No.301	No.303	No.403	No.405
岩 種	閃緑岩	閃緑岩	粘板岩	粘板岩	流紋岩	流紋岩	流紋岩	流紋岩
クラックの本数(本/m)	6	6	20	19	多数	多数	多数	多数
不連続面の狭雑物	なし	なし	土	土	粘土	粘土	粘土	粘土
載荷板の種類	フラットジャック	フラットジャック	剛板	剛板	剛板	剛板	剛板	剛板
載荷板の直径(cm)	80	80	30	30	30	30	30	30
コアの弾性係数 E_C (kg/cm ²)	212,000	292,000	174,000	320,000	供試体採れず測定不能			
岩盤の弾性係数 E_R (kg/cm ²)	145,000	122,000	44,000	40,000	18,700	22,000	16,100	16,500
岩盤の変形係数 D (kg/cm ²)	71,000	51,000	31,000	26,000	7,800	11,700	4,100	8,200
D/E_R	0.49	0.42	0.70	0.65	0.42	0.53	0.25	0.50
E_R/E_C	0.68	0.42	0.25	0.12				

今回は変形試験載荷面中心部のひずみ分布について述べるものであり、同位置に深さ約 1.2 m のボーリングを行い長さ 100 cm のひずみ計を埋設したものである。測定例として川治ダム地点での荷重-変位曲線、ひずみ計によって測定した最上部および最深部での荷重-ひずみ曲線を各々図-1~3に示す。

なお、大川ダムの No.303 および No.405 地点は、後述する横坑掘削の際に生ずると考えられたゆるみによる影響を除去するために約 50 cm 程掘削面を盤下げして試験を行ったものである。

3. 岩盤内ひずみ分布の測定結果

各地点岩盤内ひずみ増分の分布を図-4~7に示す。各々の図は、変形試験時の各載荷々重段階での処女曲線の勾配、繰返し荷重時の勾配を各ひずみ計について整理してある。また、表面変位から求めた弾性係数と同じ弾性係数を有する弾性体としたときのひずみ分布と、ボーリングコアによる供試体が作製出来たものについては、それと同じ弾性係数を有する弾性体と仮定したときのひずみ分布を示している。次に、このひずみ分布の状況について各地点別に詳細に述べる。

3-1 川治ダム地点について

試験地点は、非常にキレツの少ない堅硬な閃緑岩である。興味を引くことは図-2の最上部の荷重-ひずみ曲線が図-1の荷重-変位曲線と類似して非弾性的であるのに対し、図-3の最深部でのそれは極めて弾性的なことであろう。この関係は図-4に明確に表われている。即ち、表面から40~50cm付近までのひずみ測定値は、表面変位より求めた弾性係数あるいはコアの弾性係数をもつ弾性体のひずみより大きい値となっていて、荷重の増加によって次第に減少している。また、より深い部分になると荷重増加をしてもひずみ増分は変化せず、表面変位およびコアの弾性係数をもつ弾性体のひずみ増分とほぼ一致している。このことは、この地点の岩盤を元々は岩石の弾性係数をもつ弾性体に近いものだったと推定すると、発破掘削の影響によって表面付近のキレツにゆるみが生じたためであり、これが荷重の増加で次第に締固まってくるからであろうと解釈出来る。

3-2 滝沢ダム地点について

川治ダム地点はキレツの少ない良好な岩盤であったので、この地点は一般的なキレツの多い岩盤についての測定を主眼として、古生層粘板岩のキレツが多く、その面にも狭雑物を有するものについて行った。測定結果で、興味を持たれることは、深い部分であり、図-5で明らかな様に、深さ30cm以上の部分で荷重の増加にともなって、ひずみ増分も大きくなる傾向を示したことである。この地点については、更にボーリングコアおよび周辺を良く観察したところ、キレツも川治ダム地点等よりかなり多く、その面にも粘土状の狭雑物がゆるみなく詰まっている岩盤と判定出来た。したがってこの深部の現象については、荷重の増加によってキレツに存在する粘土質の狭雑物が降伏するために、逆にひずみ増分が大きくなったのではないかと推定された。

3-3 大川ダム地点について

弾性係数の高い所だけでなく、キレツもゆるみも多い地点でのデータ集積を行う目的で、試験地点は流紋岩でキレツや節理に富み、著しく風化が進み粘土を挟んでいる所である。したがってボーリングコアは礫状化していずれも室内試験用供試体として整形することが出来なかったものである。この地点での試験の特徴は、川治ダム地点での結果から横坑掘削によるゆるみの影響を除去することにし、Na 303およびNa 405地点では他地点より更に50cm程試験面の盤下げを行ったことである。ひずみ分布は全体的に深部までゆるみのある現象を示しながらも荷重の増加によって、ひずみ増分は一様に減少し、締固まっていく傾向を示した。

盤下げを行った結果についてみると、Na 301地点とNa 303地点およびNa 403地点とNa 405地点は互に近傍で地質性状はほぼ同様とみて良いが、盤下げを行ったNa 303およびNa 405地点は各々の近傍地点に比して変形係数で約2倍、弾性係数で2~30%程度の大きい値となっていて、表面近くでのひずみ分布も小さい。した

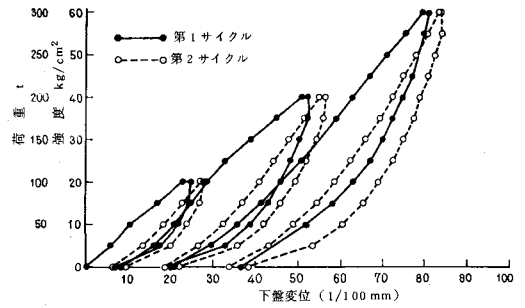


図-1 川治ダムB地点荷重-変位曲線

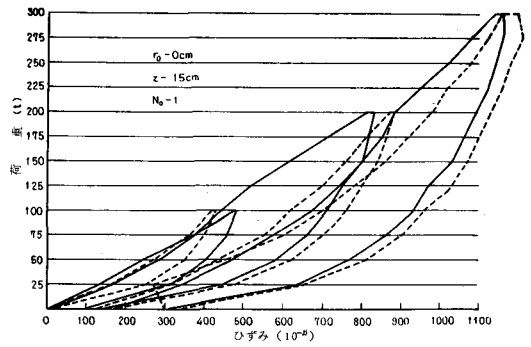


図-2 B地点荷重-ひずみ曲線

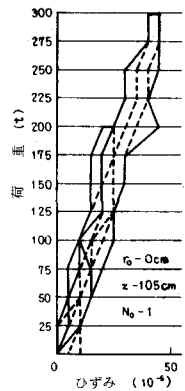


図-3 B地点荷重-ひずみ曲線

がって、元々からゆるみの存在する岩盤で火薬使用量の少ない所でも横坑掘削の際表面付近のゆるみを助長していることを裏付けている。弾性係数の値が余り大きくならなかったのは、もともと存在していたゆるみが、掘削の影響によるゆるみより大きかったためであろう。

4. 測定結果に対する考察

これまでに行った岩盤内部のひずみ測定結果から、キレットや節理の不連続面に注目した場合について巨視的に云うならば、

- 1) 横坑掘削にともなう岩盤表面のキレットのゆるみが、ジャッキ法による岩盤変形試験にかなり影響を及ぼしている。
- 2) 岩盤を不連続面の状態によって分類するならば極めて対応性のある挙動を示している。

ことであろう。これについて更に詳細な考察を以下に述べる。

4-1 横坑掘削に伴うキレットのゆるみの影響について

① 変形性が小さく弾性係数の高い岩盤 ($E_R > 100000 \text{ kg/cm}^2$) は表面から 30~50 cm の部分とそれより深い部分のひずみ増分の差が著しい。表面付近でのひずみ増分は、岩石の弾性係数をもつ弾性体の理論値に比して極めて大きく、深い部分では岩石の弾性解に近い挙動を示している。これらのことは、横坑掘削によるキレットのゆるみによって、岩盤の変形特性である変形係数と弾性係数の差を強調させていることになり、かつ弾性係数の値も小さく測定されていると推察出来る。

② 変形性が大きく、弾性係数の低い岩盤 ($E_R \leq 20,000 \text{ kg/cm}^2$) で掘削面を盤下げして試験を行った結果、そうしないものに比して表面付近のひずみ増分は小さく、変形係数も大きかった。このことはもともとゆるみが存在する岩盤でも掘削の影響でこれを助長させて変形係数と弾性係数の差を大きくしていると考えられる。

上記のことがまとめられよう。したがって、従来のジャッキ法による変形試験では、変形係数と弾性係数の差を大きくし、特に良好な岩盤では、弾性係数も低く測定されている懸念があり、この影響を避けるためには 30~50 cm 手掘で、ていねいに周囲の岩盤をゆるませない様に除去して行うことが必要であろう。なお、例え横坑掘削の火薬使用量が少ない所の変形性が大きく弾性係数が低いと想定される岩盤でも大川ダム地点での例が示す様に、表面付近は相当にゆるみを助長していることもあるので同等の除去を要するものと思われる。

4-2 岩盤の不連続面の状態に応じたひずみ分布の特性について

- ① 岩石が堅硬で、キレット面にゆるみも無く、狭雑物も無い岩盤は、岩石の弾性係数と同じ弾性係数をもつ弾性体に近いひずみ分布をする。
- ② 岩石が堅硬で、キレット面にゆるみの存在する岩盤は、荷重増加によって、そのゆるみは次第に締め、ひずみ増分も減少する。しかし、岩盤の弾性係数は岩石のそれに近い値にはなり難い。このことは、キレット面での岩石間の点接触が、たとえ締められても再びゆるみが生じる以前の面接触到に近い状態になることが出来ないためであろう。
- ③ キレット面に狭雑物は有るが、ゆるみは無いと見られる岩盤は、非弾性的で、ひずみ増分も一定した値を示さず、その挙動も複雑である。試験地点によっては、ゆるみの有る部分とは逆に荷重増加に従ってひずみ増分も増加する傾向を示す場合もある。

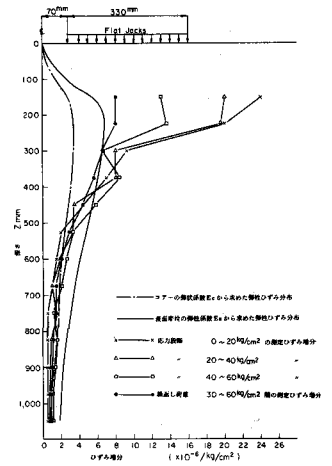


図-4 川治ダムB地点ひずみ分布図

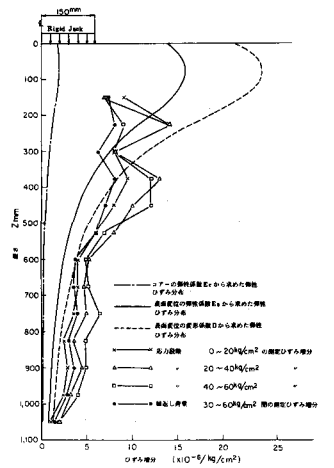


図-5 滝沢ダムNa2地点ひずみ分布図

- ④ キレット面に狭雑物も在り、ゆるみもかなり有る岩盤は、全般に挙動も非弾性的で弾性係数の値も低い。荷重増加に従ってひずみ増分は減少する傾向を示している。

なる特徴が上げられる。いま上記を更に簡単に整理することにし、岩盤を、岩石と不連続面で構成されているものとした場合、その不連続面の状態により分類するならば、

- (1) 不連続面にゆるみも狭雑物も無い岩盤
- (2) 不連続面にゆるみは有るが、狭雑物は無い岩盤
- (3) 不連続面にゆるみは無いが、狭雑物の有る岩盤
- (4) 不連続面にゆるみも狭雑物も有る岩盤

となろう。いずれも岩石は堅硬なものであるとすると、(1)の岩盤は岩石の弾性係数と同じ弾性係数を持つ弾性体に近い挙動を示し、(2)の岩盤は非弾性的な挙動を示すが、荷重を加えると、ゆるみが縮まり、ひずみ増分は減少するものである。(3)の岩盤は非弾性的で、荷重増加とひずみ増分の関係は狭雑物の性質により複雑に異なるようである。特に、荷重の増加に従ってひずみも増加する傾向を示すものもある。(4)の岩盤も非弾性的で弾性係数も他の岩盤に比してかなり低いものであるが、ひずみ増分も荷重が大きくなるに従って減少する傾向を示すものと云えよう。

5. 結論

ジャッキ法による変形試験では横坑掘削の影響により、岩盤表面付近の不連続面にゆるみが生じたり、または、元からあったゆるみを助長させるため、変形係数と弾性係数の差を大きくし、特に良好な岩盤では、弾性係数も低く測定される懸念がある。真の試験値を得るには、表面付近の30~50cmを手掘で周囲の岩盤を傷めぬ様でいねいに除去する必要がある。

また、岩盤を、その不連続面の状態によって、上記4つのタイプに分類したときは、各々特徴ある挙動を示すことが明らかとなってきた。

このうち設計上(1)の不連続面にゆるみも狭雑物もない岩盤は、弾性体として取扱っても問題はない。非弾性体として取扱いを要する岩盤のうち、(2)についても飯田²⁾らによってその取扱い方法が研究されている。しかし、不連続面に狭雑物を有する(3)及び(4)については、その狭雑物の物性、不連続面の頻度などに応じて適切な解析法を検討していかなければならないものである。

参考文献 (1) 飯田隆一、小林茂敏：現地載荷試験時における岩盤の挙動特性の測定

土木技術資料 14-8

(2) 飯田隆一、小林茂敏：割れ目を有する岩盤の非弾性的挙動に関する理論的研究

土木研究所報告第144号

(3) Ryuichi Iida, Koji Hojo, Kozo Saito ; Study of Deformation Characteristics and Analyses of jointed Rockmasses, (Second International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, June 1976)

(4) 建設省阿賀川工事々務所：大川ダム岩盤変形試験報告書

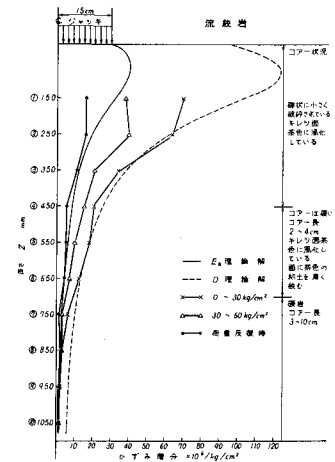


図-6 大川ダムNo.301地点ひずみ分布図

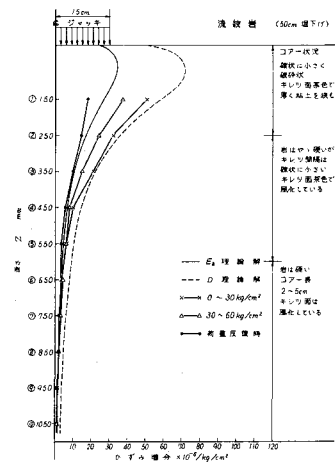


図-7 大川ダムNo.303地点ひずみ分布図

Rock deformation tests and the characteristics of the strain distributions in rock masses

The Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Ryuichi Iida, Isao Shibata, Tadashi Nishioka, Kozo Saito

Considering that cracks in rock masses influence the characteristics of deformation in these, rock deformation tests buried the continuous strain gauges from surface to the interior of rock masses were carried out at several dam sites to see the strain distributions in rock masses. Resulting strain distributions in rock masses show :

- (1) Surface looseness in rock masses by excavating the exploratory heading gives much influence on the results of rock deformation tests. Tests after removing surface rock to 50 cm meet with good results.
- (2) Classification of rock masses of test sites by the condition of cracks (loose or tight, including admixtures or not) gives good correspondence to the strain distributions in rock masses.

Then, rock deformation tests are influenced by looseness of rock masses caused by excavation of exploratory heading and removing surface rock 30 to 50 cm by hand is necessary to obtain good results.

Also, strain distributions in rock masses are characterized by conditions of cracks and it becomes clear that rock masses are classified into rock considered as elastic materials for design and non-elastic materials.