

地下空洞におけるケーブルボルトによる先行補強工の設計について

山口大学工学部

セントラルコンサルタント(株)

電源開発(株)

山口大学工学部

学○足立光

正 星野貴史

正 柏柳正之

正 清水則一

1. はじめに

公共事業の投資が見直され、地下空洞やトンネルの建設コストの軽減がこれまでも増して望まれ、経済的かつ合理的な工法が望まれている。そこで本報告では、ケーブルボルト工法に着目し、前報²⁾で得た計測結果に基づいた数値シミュレーションによる再現岩盤変位を用いて逆解析を行い、ケーブルボルト（以下、CBと呼ぶ。）による岩盤の先行補強効果を定量的に評価する。そして、それらの結果を踏まえた上で、ケーブルボルトによる先行補強工の設計法についての検討を行う。

2. 逆解析による評価

まず、図1に現場実験を行った地下空洞の解析モデルを、図2にD断面L-2（図1参照）における計測岩盤変位を示す。ケーブルボルトの打設による先行補強効果をより定量的に評価するために、図2に示す前報で得た再現岩盤変位を入力値（以下、入力変位と呼ぶ。）として逆解析³⁾を行う。図3に逆解析の流れを、図4に逆解析に使用した計測線配置図を示す。

(a) ケーブルボルトを打設した場合

まず、不連続面が密集している計測線e（図4参照）の付近に不連続面の影響により、変形係数の低下したゆるみ領域が発生していると考え、その位置にゆるみ領域1（図5-(a)参照）を考慮する。次に、健全部の変形係数とゆるみ領域の変形係数の比である変形係数比を变化させ、入力変位と逆解析結果の変位誤差の二乗和平均が最小となるように変形係数比を求めた結果（図6参照）、ゆるみ領域1の変形係数比が健全部の1/7のときに最もうまく入力変位を表現できた。

(b) ケーブルボルトを打設しない場合

図5-(a)に示すゆるみ領域の範囲において、ケーブルボルトを打設しない場合の入力変位を入力値として逆解析を行ったところ、入力変位と逆解析結果に大きな差が見られた。また、D断面L-2の空洞壁面付近においてケーブルボルト打設の有無により岩盤変位に大きな差が生じていた（図2参照）。そこで図5-(b)に示すようなゆるみ領域2を考えた。次に、健全部の変形係数比を1、ゆるみ領域1の変形係数比を1/7とした上で、ゆるみ領域2の変形係数比の検討を行う（図7参照）。その結果、ゆるみ領域2の変形係数比を健全部の1/15としたときに最もうまく入力変位を表現できた。

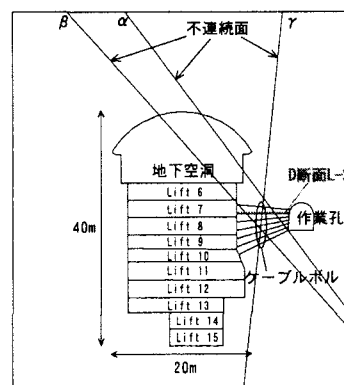


図1 解析モデル

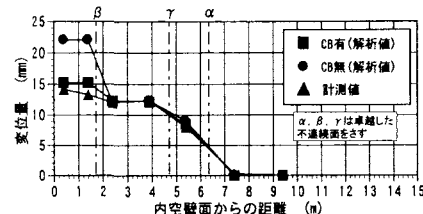


図2 岩盤変位比較図（D断面L-2）

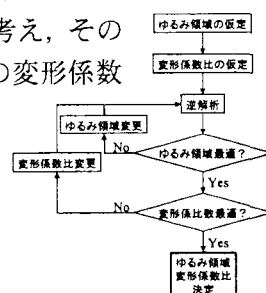


図3 逆解析の流れ

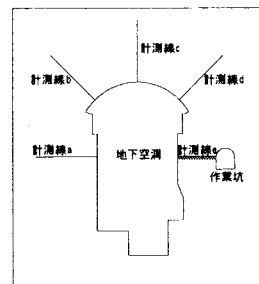
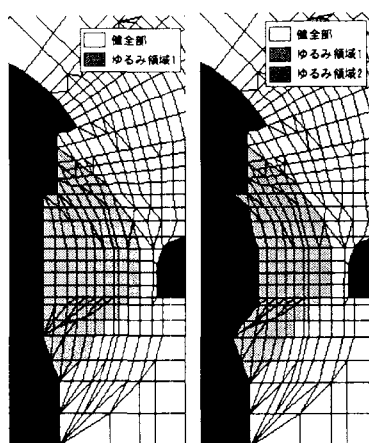


図4 計測線配置図



(a) CB 打設

(b) CB 非打設

図5 ゆるみ領域の範囲

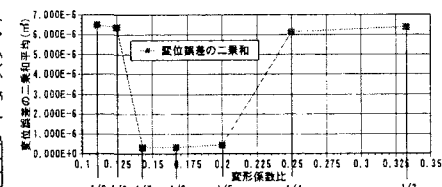


図6 変形係数と変位誤差の二乗和平均の関係(CB有)

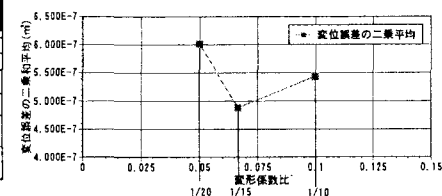


図7 変形係数と変位誤差の二乗和平均の関係(CB無)

表1に今回行った逆解析結果を、図8、図9にケーブルボルトを打設した場合、打設しない場合それぞれにおける計測線eの計測変位比較図を示す。ケーブルボルトを打設した場合には、打設しない場合に発生しているゆるみ領域2の発生が抑制されており、これがケーブルボルトによる先行補強効果といえる。

3. ケーブルボルトによる先行補強工の設計についての検討

前節よりケーブルボルトの先行補強によるゆるみ領域の抑制効果を示すことが出来た。以上のことを踏まえたうえで、ケーブルボルトによる先行補強工の設計について検討する。図10に設計フロー（試案）を示す。フローからも分かるように、ケーブルボルトを先行的に打設する場合と打設しない場合におけるゆるみ領域を求め、それぞれの場合において空洞掘削後に必要なPSアンカーの打設本数を決定する。そして、支保工に必要なコストを算出し、比較することにより検討していく。また、支保工に関するコストについては、次式を用いる。

$$(\text{支保工に関するコスト}) = (\text{PSアンカー施工費}) + \{ (\text{ケーブルボルト施工費}) - (\text{施工期間の短縮による縮減コスト}) \}$$

支保工に関するコストについて検討した一例を示す。図11に示す解析モデルを用い、数値シミュレーションにより空洞の順次掘削を行う。ここでは、アーチ部に着目する。図12に解析結果を示す。図中の線の太さは、開口幅の大きさを示している。この結果より、今回想定した地下空洞においては、PSアンカーとケーブルボルトを併用した場合はPSアンカーのみの場合と比較して、コストが抑えられていることがわかる。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 現場実験に基づいた数値シミュレーションの結果を用いた逆解析により、ケーブルボルトを打設した場合とケーブルボルトを打設しない場合による違いを検討し、ケーブルボルトによる先行補強効果を示すことが出来た。
- (2) ケーブルボルトによる先行補強効果の有効性を踏まえたうえでケーブルボルトの設計法について検討を行った。その結果、ケーブルボルトのコスト面に関する評価方法を示し、地下空洞設計にケーブルボルトを導入することを提案した。

表 1 逆解析結果

ケーブルボルトあり	ケーブルボルトなし
健全部	健全部
11900MPa	11900MPa
ゆるみ領域1	ゆるみ領域1
1700MPa (健全部の1/7)	1700MPa (健全部の1/7)
	ゆるみ領域2
	800MPa (健全部の1/15)

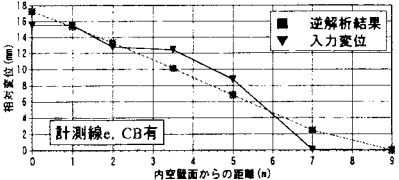


図 8 計測変位比較図

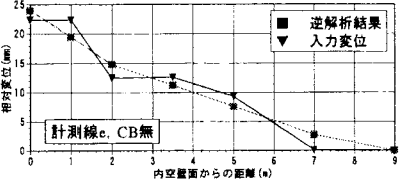


図 9 計測変位変位図

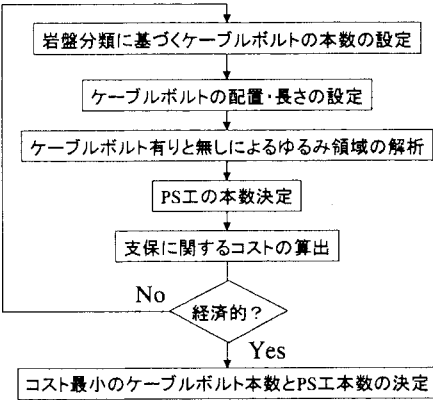


図 10 設計フロー（試案）

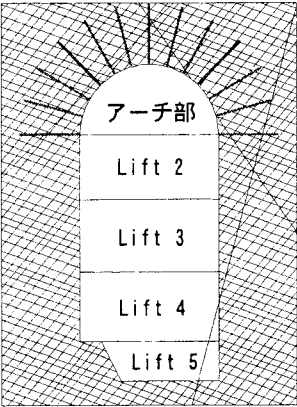


図 11 解析モデル図

	(a)	(b)	(c)	(d)
ケーブルボルト 打設間隔(m)		2.5	2.0	1.5
ケーブルボルト 打設本数(本)	0	7	10	13
亀裂開口分布図				
ゆるみ領域の 面積(m ²)	23.365	7.123	7.052	0
PSアンカー 設置本数(本)	2	1	1	0
PSアンカー 施工費(万円)	120	60	60	0
ケーブルボルト 施工費(万円)	0	14	20	26
支保工に関する 施工費(万円)	120	74	80	26

図 12 亀裂開口分布図

PSアンカー施工費:60万円/本
ケーブルボルト施工費:2万円/本

参考文献

- 1) 清水則一：ケーブルボルト工法による地下空洞岩盤の先行補強，電源土木，No.275，pp.1-7，1998.
- 2) 岩崎進一郎，深光良介，清水則一，星野貴史，柏柳正之，鳥羽瀬孝臣，伊藤文雄：ケーブルボルトによる地下空洞岩盤の先行補強に関する現場実験～数値解析による評価～，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，2002
- 3) 星野貴史，深光良介，岩崎進一郎，清水則一，柏柳正之，鳥羽瀬孝臣，伊藤文雄：ケーブルボルトによる地下空洞岩盤の先行補強に関する現場実験～逆解析による評価～，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，III -255，pp.509-510，2002.9.