



Metodi di progetto delle gallerie con sostegno cedevole in rocce spingenti e rigonfianti

Tunnel design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks

Prof. Dr. Kalman KOVÁRI^(*)

Sommario – Sebbene i processi, che hanno luogo nel terreno circostante una galleria in roccia rigonfiante e in roccia spingente, differiscano fondamentalmente l'uno dall'altro, esiste un aspetto comune tra i due casi: al crescere della deformazione della roccia decresce la sua pressione. Questo fatto è dimostrato sia dall'esperienza sia dalle investigazioni teoriche ed è stato chiaramente riconosciuto sin dagli inizi dell'ultimo secolo. "Per ogni frazione di millimetro di spostamento della massa rocciosa, il valore della pressione che agisce sul rivestimento decresce" [1]. Sulla base di questa consapevolezza un numero di metodi progettuali è oggi a disposizione degli ingegneri, per il controllo della pressione della roccia anche in rocce altamente rigonfianti e altamente spingenti. Sia il rivestimento temporaneo sia quello definitivo possono essere costruiti in modo tale da esercitare una pressione stabilizzante sulla roccia e allo stesso tempo consentire alla massa rocciosa di deformarsi.

In molti casi questa azione combinata, cioè il sostegno della roccia e la libertà di deformazione della stessa, non solo risulta la soluzione più economica ma, in alcuni casi, è l'unica soluzione che rende fattibile la costruzione della galleria.

Parole chiave: pressione della roccia, deformazione della roccia, roccia spingente, roccia rigonfiante, sostegno cedevole.

1. Introduzione

I termini "roccia spingente" e "roccia rigonfiante" provengono dai giorni pionieristici dello scavo di gallerie nelle Alpi. Già nella seconda metà del 18° secolo si era già compreso che questi tipi di pressione della roccia erano fondamentalmente causati da differenti meccanismi. La roccia spingente è caratterizzata dalla tendenza alla riduzione della sezione trasversale del foro – generalmente in tutte le direzioni. La roccia rigonfiante si traduce in un sollevamento del fondo dello scavo di galleria [2], [3]. Poiché il rivestimento offre resistenza al movimento della

Summary - Although the processes taking place in the ground around a tunnel in squeezing and in swelling rock differ from each other fundamentally, there is one common feature in both cases: with increasing rock deformation the rock pressure decreases. This fact is proved both by experience and theoretical investigations and was clearly recognized as early as at the beginning of the last century. "With each fraction of a millimetre with which the rock mass moves, the amount of pressure acting on the lining decreases" [1]. Based on this recognition a number of design methods are nowadays at the disposal of the engineer to control rock pressure even in heavily squeezing and heavily swelling rock. Both the temporary and the final lining can be constructed in such a way as to exert stabilizing pressure on the rock and at the same time allow the rock mass to deform. In many cases this combined action, i.e. rock support and letting the rock deform, not only presents the most economical solution, in some cases it is the only one that makes tunnel construction feasible.

Keywords: rock pressure, rock deformation, squeezing rock, swelling rock, yielding support.

1. Introduction

The terms "squeezing rock" and "swelling rock" originate from the pioneering days of tunnelling in the Alps. As long ago as the second half of the 18th century one already understood that these types of rock pressure were caused by fundamentally different mechanisms. Squeezing rock is characterised by the tendency to reduce the cross-section of the opening – generally from all sides. Swelling rock manifests itself in heave of the bottom of the tunnel [2], [3]. Since the lining resists the rock movement, a reaction occurs - called rock pressure. Thus rock deformation and rock pressure are directly related to each other. With respect to the lining the rock pressure is regarded as a loading, and with respect to the rock it acts

^(*) Ingegnere consulente, Zurich.

^(*) Consulting Engineer, Zurich.

roccia, si sviluppa una reazione - denominata pressione della roccia. Così la deformazione della roccia e la pressione della roccia sono direttamente collegate. Rispetto al rivestimento, la pressione della roccia è considerata come un carico mentre, rispetto alla roccia, essa agisce come una resistenza del rivestimento; in tal modo sono espressi due distinti aspetti (azione e reazione) dello stesso fenomeno. Se la pressione della roccia supera la capacità portante del rivestimento o quella dell'arco rovescio, uno di essi sarà danneggiato o anche distrutto e le deformazioni della roccia continueranno fino al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio. Se non si riempiono gli spazi previsti dalla linea di scavo minima con il rivestimento temporaneo, è inevitabile la riprofilatura della roccia.

Tale lavoro di riparazione richiede tempo e comporta costi elevati.

Nella roccia spingente il meccanismo sollecitazione-deformazione è fondamentalmente governato dal fenomeno della plasticità, da quello dello scorrimento e da altri fenomeni non lineari dipendenti dal tempo.

Il comportamento della roccia rigonfiante contenente minerali di argilla è caratterizzato dall'aumento di volume nel caso di contatto con l'acqua. Il processo di rigonfiamento nell'argilla è di natura fisica (osmosi). Nelle rocce contenenti anidrite si verifica una reazione chimica che trasforma il minerale in gesso. Questa trasformazione può condurre, almeno in condizioni di laboratorio, ad un incremento fino al 60%. A seguire vengono inizialmente discussi i principali aspetti del sostegno cedevole, concentrandosi sullo scavo di gallerie in condizioni di roccia spingente.

Questo problema si verifica in tutto il mondo molto più frequentemente rispetto al caso delle rocce fortemente rigonfianti. La necessità di tipi di sostegno cedevole temporanei o definitivi negli scavi di gallerie in rocce spingenti e rigonfianti è da tempo riconosciuta.

Di recente ANAGNOSTOU e CANTIENI [4] hanno illustrato due esempi storici di sostegno cedevole attinenti a scavi di miniera in terreni spingenti, proposti da HEISE e HEERBST nel 1913 [5], che illustrano chiaramente due approcci concettualmente molto differenti (fig. 1).

Da un lato, uno strato di materiale sufficientemente comprimibile è inserito tra la superficie della massa rocciosa scavata ed il rivestimento e, dall'altro lato, il rivestimento stesso è reso altamente deformabile.

In entrambi i casi, è richiesto un adeguato sovra-scavo per contenere le deformazioni attese della massa rocciosa. In accordo con la Fig.1 (a), un sotto-rivestimento in legno di sufficiente spessore funge da "materiale cedevole" mentre, in accordo con la fig.1 (b), interstrati comprimibili in legno, che fungono da "ele-

as lining resistance; thereby, the two distinct aspects (action and reaction) of the same phenomenon are expressed. If the rock pressure exceeds the bearing capacity of the lining or that of the invert arch it will be damaged or even destroyed and the rock deformations continue until a new state of equilibrium is reached. By not fulfilling the planned clearance of the minimum excavation line with the temporary lining re-profiling the rock is unavoidable. Such repair work is time-consuming and involves high costs.

In squeezing rock the stress-deformation mechanism is basically governed by the phenomenon of plasticity, creep and other time dependent, non linear phenomenon.

The behaviour of swelling rock containing clay minerals is determined by increase in volume when coming into contact with water. The process of swelling in clay is of physical nature (osmosis). In rocks containing anhydrite a chemical reaction takes place converting the anhydrite minerals into gypsum. This transformation may lead at least in laboratory conditions to an increase of volume up to 60%.

In the following first we discuss the main aspects of yielding support concentrating on tunnelling in squeezing rock. This problem arise world wide much more frequently than the case of heavily swelling rock. The need for yielding types of temporary or final support when tunnelling in squeezing and swelling rock has long been recognized. Recently ANAGNOSTOU and CANTIENI [4] have shown two historical examples for yielding support from mining in squeezing ground, proposed by HEISE and HEERBST in 1913 [5] which clearly demonstrate two conceptually quite different approaches (fig. 1).

On the one hand, a layer of sufficiently compressible material is inserted between the excavated rock surface and the lining and, on the other hand, the lining itself is

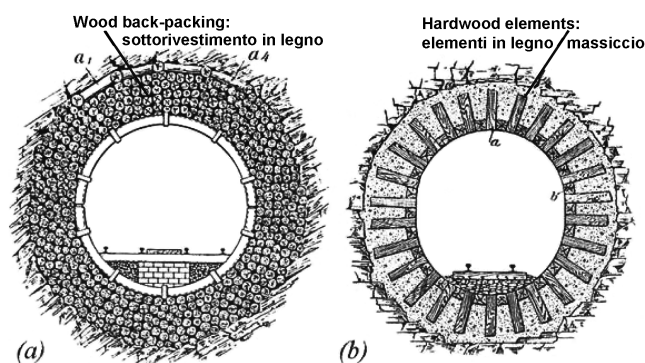


Fig. 1 - Concetti di sostegno cedevole. (a) Sotto-rivestimento con legno tra sostegno in acciaio e roccia, (b) Interstrati di pannelli di legno nel rivestimento in calcestruzzo (HEISE and HERBST, 1913). Yielding support concepts. (a) Back-packing with wood between steel support and rock, (b) Interlayer of wooden panels in the concrete lining (HEISE and HERBST, 1913).

menti cedevoli”, sono inseriti nel rivestimento in calcestruzzo consentendo la convergenza dello stesso. In seguito e per entrambi i concetti, furono sviluppate soluzioni molto più praticabili. Ad esempio, MOHR in 1957 [6] propose per terreni spingenti l'applicazione di cenere di combustibile ad alta comprimibilità, invece del legno, tra il rivestimento e la roccia di un pozzo profondo. In tale contesto, MOHR propose la prima rappresentazione della curva caratteristica della massa rocciosa insieme a quella del Sostegno Cedevole [7]. La curva caratteristica della massa rocciosa stabilisce la relazione tra deformazione della roccia e resistenza del rivestimento. Negli anni 30 LENK [8] descrisse un metodo brevettato consistente nel posizionare un numero limitato di elementi cedevoli in legno tra le sezioni prefabbricate in calcestruzzo, costituendo inoltre in tal modo dei giunti quasi liberi da momenti flettenti (fig.2).

Le caratteristiche di deformazione di questi elementi in legno sono state determinate sperimentalmente.

Il primo tipo di sostegno cedevole, di vasta e continua applicazione sia negli scavi di miniera sia in quelli di galleria, fu rappresentato dalla cosiddetta centina in acciaio Toussaint-Heintzmann come descritto da FRÖHLICH in 1948 [9]. Questo ha comportato il progetto di nuovi profilati in acciaio (sezione superiore a C con bordi) con anelli di collegamento ad attrito (fig. 3), consentendo alla galleria di sopportare una più ampia convergenza con resistenza del rivestimento più o meno costante. Tale fatto ha contraddistinto l'inizio dell'impiego dei primi appoggi in condizioni di roccia spingente prodotti in modo industriale, per mezzo dei quali la pressione del terreno poteva essere ridotta con un incremento della convergenza.

Poiché la resistenza di attrito nei giunti è molto limitata rispetto alla piena capacità portante delle centine, anche la resistenza del rivestimento alla convergenza della roccia è relativamente bassa.

Un primo tentativo di gestione degli scavi di galleria in terreni fortemente rigonfianti, mediante l'inserimento di un mezzo cedevole tra rivestimento e roccia, fu descritto da SCHÄCHTERLE nel 1926 [10].

Come si vede dalla Fig.4, in primo luogo fu posato il rivestimento su uno strato comprimibile di detriti di roccia e in secondo luogo fu posato sulla sua parte superiore uno strato comprimibile di 1 m di spessore dello stesso materiale. Infatti, nel corso del tempo la copertura si è sollevata di circa 1.3 m, determinando la necessità di ricostruzione della galleria, che ha richiesto il corretto posizionamento di un arco rovescio.

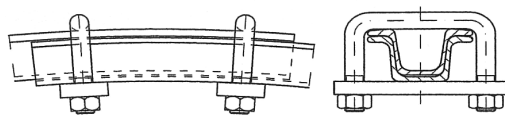


Fig. 3 – Connessione della centina scorrevole in acciaio (FRÖHLICH, 1948). *Sliding steel rib connection (FRÖHLICH, 1948).*

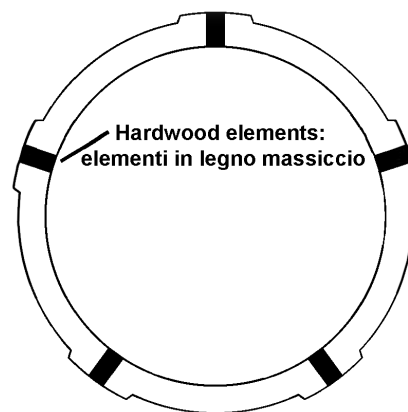


Fig. 2 – Elementi cedevoli in legno massiccio tra segmenti prefabbricati in calcestruzzo (LENK, 1931). *Yielding hardwood elements between prefabricated concrete segments (LENK, 1931).*

made highly deformable. In both cases an adequate over-excavation is required to accommodate the expected rock deformations. According to fig.1 (a) a wood back-packing of sufficient thickness serves as “yielding material” whereas according to fig. 1 (b) compressible wood inter-layer’s serving as “yielding elements” are inserted into the concrete lining allowing it to converge. Later, for both concepts much more practicable solutions were developed. For example, for squeezing ground MOHR in 1957 [6] proposed applying highly compressible fuel ash between the lining and the rock of a deep shaft instead of wood. In this context, MOHR provided the first representation of the characteristic line of the rock mass together with that of the yielding support [7]. The characteristic line of the rock mass establishes the relation between rock deformation and lining resistance. In the 1930s LENK [8] reported on a patented method consisting of placing a limited number of yielding wooden elements between prefabricated concrete segments, in this way also providing joints almost free of bending moments (fig. 2). The deformation characteristics of these wooden elements were determined experimentally.

The first type of yielding support of broad and continuous application, both in mining and in tunnelling, was provided by the so called Toussaint-Heintzmann steel ribs as reported by FRÖHLICH in 1948 [9]. This involved the design of new steel profiles (top hat cross-section) with friction connecting loops (fig. 3) permitting the tunnel to withstand larger convergence with more or less constant lining resistance. This marked the beginning of the first industrially-produced supports in squeezing rock, by means of which ground pressure could be reduced with increased convergence. As the friction resistance in the joints is very limited with respect to the full load-bearing capacity of the ribs, the lining’s resistance to rock convergence is also relatively small.

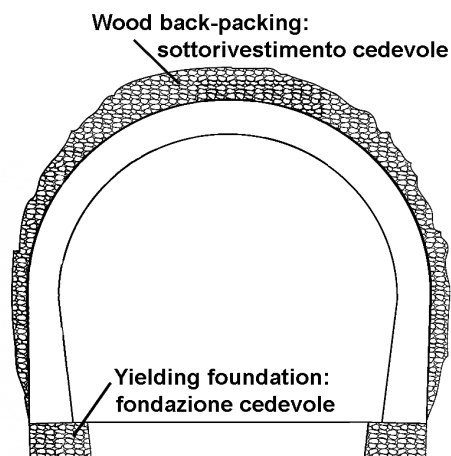


Fig. 4 - Rivestimento di galleria in roccia rigonfiante: sottorivestimento cedevole sulla volta e fondazione cedevole (SCHÄCHTERLE, 1926). Tunnel lining in swelling rock: yielding back-packing in the roof and yielding foundation (SCHÄCHTERLE, 1926).

2. Sostegno cedevole in acciaio

L'ulteriore sviluppo del sistema di sostegno TOUSSAINT-HEINTZMANN è illustrato in fig. 5. In vista della sua pianificata applicazione su vasta scala nella galleria di base che attraversa la Alpi Svizzere e dell'ampio diametro della galleria, furono effettuate prove "in situ" in scala 1:1 sulla base di una teoria proposta dall'Autore [11].

Il diametro di progetto della galleria era pari a $\varnothing=13$ m e la convergenza possibile richiesta era di 0.75 m (funzione del raggio della galleria).

Si progettò la posa due insiemi completi di centine di tipo TH 44/70, l'una dentro l'altra, per consentire ampi movimenti, coinvolgendo in totale 8 connessioni scorrevoli ad attrito. Valutazioni teoriche hanno indicato un valore massimo della resistenza del rivestimento pari a 2 MPa per il caso della chiusura completa dell'anello.

Il problema era il seguente: il sistema si sarebbe comportato come previsto, considerando i carichi, estremamente elevati, combinati con gli spostamenti insolitamente elevati (scorrimenti) delle single centine, l'una rispetto all'altra? Per effettuare la prova fu scavata una nicchia di adeguate dimensioni in gneiss massiccio duro e furono eretti due insiemi di centine con distanziamento di 0.5 m adeguatamente stabilizzati per impedire i movimenti al di fuori del piano degli anelli.

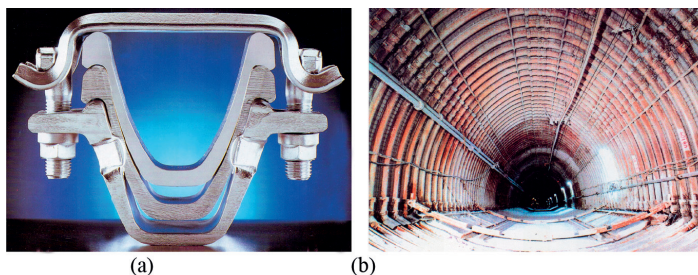


Fig. 5 - Sostegno cedevole in acciaio. (a) Particolare della connessione della centina in acciaio. (b) Esempio di applicazione nelle attività di miniera. Yielding steel support. (a) Details of the steel rib connection. (b) Example for application in mining.

An early attempt to master tunnelling in heavily swelling ground by inserting a yielding medium between lining and rock was reported by SCHÄCHTERLE in 1926 [10].

As can be seen in fig. 4, firstly the lining was founded on a compressible layer of rock debris and secondly in its upper part a compressible layer of the same material of 1 m thickness was placed. In fact, in the course of time the roof heaved by approx. 1.3 m, necessitating the reconstruction of the tunnel, which correctly involved the placement of an invert arch.

2. Yielding steel support

The further development of the TOUSSAINT-HEINTZMANN support system is shown in fig. 5. In view of its planned large scale application in the base tunnels driven through the Swiss Alps and of the large tunnel diameter, large scale 1:1 in situ tests were carried out based on a concept proposed by the Author [11]. The diameter of the planned tunnel was $\varnothing=13$ m and the requested possible convergence 0.75 m (function of tunnel radius).

It was planned to place two complete sets of TH 44/70 - type ribs within each other to allow the large movements, involving in total 8 frictional sliding connections. Theoretical considerations indicated a maximum lining resistance of 2 MPa for the case of complete ring closure. The question was whether the system would really behave as predicted considering the extreme high loads combined with the unusually large displacements (sliding) of the individual ribs with respect to each other. To perform the test a niche of adequate dimensions was excavated in hard massive gneiss and two sets of ribs were erected with a spacing of 0.5 m and stabilized to prevent movement out of the plane of the rings.

Liner plates were placed on the ribs to accommodate large inflatable rubber cushions using water as the pressurizing medium.

Fig. 6 shows the test set up schematically, while fig. 7 shows details of the ribs loaded up to their bearing capacity. The most important results of this test can be

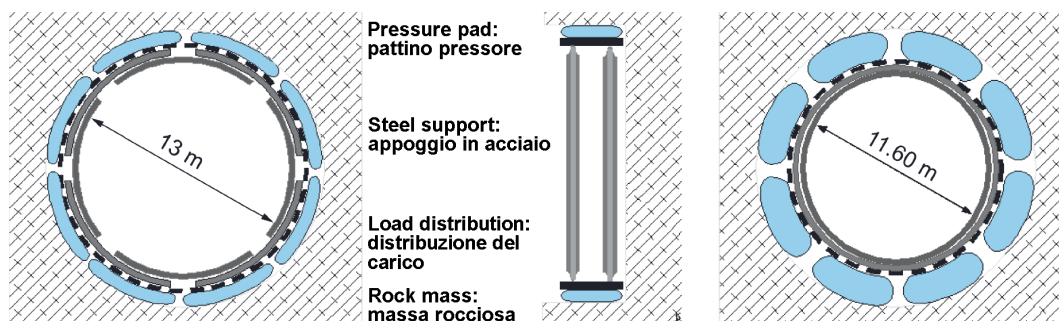


Fig. 6 – Prova di campo di un sostegno in acciaio di grande diametro eseguito in una nicchia di roccia dura con due strutture in acciaio complete, (a) Le strutture prima del caricamento, (b) Le strutture dopo il caricamento mediante cuscini a riempimento d'acqua e convergenza fino a 0,7 m (Kovári et al, 2005). *Field test of a large diameter steel support executed in a hard rock niche with two complete steel sets, (a) The sets prior to loading, (b) The sets after loading by water-inflatable cushions and convergence up to 0.7 m (Kovári et al, 2005).*

Piastre di ancoraggio sono state posizionate sulle centine per alloggiare grandi cuscini di gomma che utilizzano l'acqua come mezzo di pressurizzazione.

La Fig. 6 illustra la configurazione di prova in modo schematico, mentre la fig. 7 mostra i dettagli delle centine caricate fino alla loro capacità portante. I più importanti risultati di questa prova possono essere sintetizzati come segue. Durante il processo di scorrimento nei giunti c'è solo una resistenza di attrito assai modesta, che si risolve in una resistenza del rivestimento inferiore a 0.25 MPa come mostrato in fig. 8. Per uno spostamento radiale (corrispondente alla convergenza) di circa 0.65 m, la resistenza del rivestimento cresce ma non supera il 30% del suo valore teorico atteso. A causa della flessione locale delle centine, la capacità portante della centina-doppia corrisponde a circa il 50% di quella di una centina singola. Comunque, la capacità dell'anello a doppia centina, con le sue connessioni, di consentire una convergenza radiale di 0.7 m è stata pienamente confermata.

3. Supporto cedevole in calcestruzzo spruzzato

Un rivestimento ordinario in calcestruzzo spruzzato presenta una elevata resistenza ma una capacità di defor-

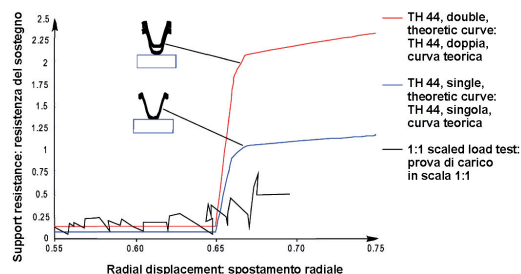


Fig. 8 – Risultati delle prove e diagrammi teorici attesi per le centine single e doppie. *Test results and theoretically expected diagrams for single and double ribs.*



Fig. 7 – Archi di acciaio caricati fino alla deformazione permanente delle centine (TH44). *Steel arches loaded up to local buckling of the ribs (TH44).*

summarized as follows: During the sliding process in the joints there is only a very modest frictional resistance resulting in a lining resistance of less than 0.25 MPa as shown in fig. 8. At a radial displacement (corresponding to convergence) of approx. 0.65 m, the lining resistance increases but does not exceed 30% of its theoretically expected value. Due to local buckling of the ribs, the bearing capacity of the double-rib only corresponds to about 50% of that of a single rib. However, the ability of the double-rib ring, with its connections, to allow a radial convergence of 0.7 m was well confirmed.

3. Yielding sprayed concrete support

An ordinary sprayed concrete lining exhibits a high lining resistance but an extremely low deformation capacity. If it is overloaded, it generally loses its load-bearing capacity due to brittle failure even it is reinforced by the customary steel mesh. Therefore, a sprayed concrete

mazione estremamente bassa. Se esso è sovraccaricato, perde generalmente la sua capacità portante per effetto della sua fragilità alla rottura, anche se esso è armato con la consueta rete in acciaio. Pertanto, un rivestimento in calcestruzzo spruzzato, senza speciali accorgimenti, non è idoneo per applicazioni in condizioni di roccia spingente o rigonfiante. Comunque se il rivestimento in calcestruzzo "rigido" è dotato di un numero di elementi cedevoli, come proposto in Fig. 2, consentendo la contrazione del profilo ed offrendo allo stesso tempo una resistenza alla deformazione della roccia, il rivestimento in calcestruzzo spruzzato diventa uno strumento particolarmente potente per il controllo della pressione della roccia.

Di recente sono stati proposti ed applicati con successo nuovi tipi di elementi cedevoli. Uno di tali elementi consiste in cilindri in acciaio inseriti in fessure ricavate nel rivestimento in calcestruzzo spruzzato e caricati in senso assiale alla direzione circonferenziale del profilo [12]. Dopo un caricamento iniziale critico, i cilindri iniziano a deformarsi permanentemente e continuano in questo modo secondo gradini successivi, registrando un accorciamento e consentendo così al contempo lo sviluppo di una resistenza del rivestimento. Ulteriori progressi in questo campo sono stati ottenuti mediante lo sviluppo di elementi strutturali altamente comprimibili su una base di cemento. Questi sono composti da un mix di cemento, sabbia, particelle cave di vetro, fibre di acciaio e additivi e sono dotati anche di una idonea armatura in acciaio [13]. In Fig. 19 è mostrata un'applicazione nella galleria di base di Lötschberg (Svizzera) di lunghezza pari a 37 km che attraversa scisti di carbone altamente deformabili sotto un'elevata copertura (KELLER, 2005).

La comprimibilità di questi elementi in "calcestruzzo" arriva fino al 40-50%, a seconda della sollecitazione scelta per il sostegno ($4 \div 20$ MPa). La Fig.10 mostra i risultati delle prove di laboratorio effettuate su tali elementi ed illustra l'elevata riproducibilità delle loro proprietà di deformazione. Come si vede, dopo aver raggiunto una data sollecitazione di



Fig. 9 – Elementi in calcestruzzo altamente comprimibili inseriti nel rivestimento in calcestruzzo spruzzato. *Highly compressible concrete elements inserted in the shotcrete lining.*

lining without special measures is not suitable in applications under the conditions of squeezing or swelling rock. However, if the "stiff" concrete lining is provided with a number of yielding elements, as proposed in fig. 2, allowing the contraction of the profile and exerting at the same time resistance to rock deformation, the sprayed concrete lining becomes a particularly powerful means of controlling rock pressure.

Recently, new types of yielding elements have been proposed and applied successfully in practice. One such element consists of steel cylinders inserted into gaps in the shotcrete lining and loaded axially in the circumferential direction of the profile [12]. After a given initial critical load the cylinders start to buckle and continue to do so in successive steps, undergoing shortening and thus allowing at the same time a lining resistance to develop. Further progress in this field was achieved by the development of highly compressible bulk elements on a cement basis. They are composed of a mixture of cement, sand, hollow glass particles, steel fibres and additives and are also provided with suitable steel reinforcement [13]. In fig. 9 an application is shown in the 37 km long Lötschberg Base Tunnel (Switzerland) driven through highly deformable coal schist under a large overburden (KELLER, 2005).

The compressibility of these "concrete" elements amounts to up to 40-50%, depending on the selected yielding stress ($4 \div 20$ MPa). Fig 10 shows the results of laboratory tests carried out on such elements, illustrating the high reproducibility of their deformation properties. As can be seen, after reaching a given peak stress of approx.

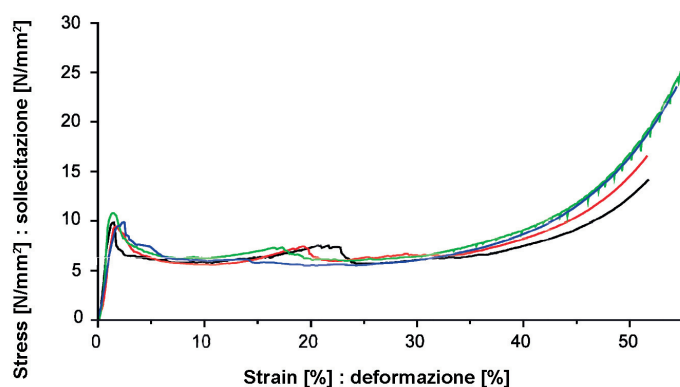


Fig. 10 – Comportamento sollecitazione-deformazione degli elementi in calcestruzzo cedevole. *Stress-strain behaviour of yielding concrete elements.*

picco di circa 10 MPa, si perviene ad uno stato di cedimento praticamente costante con un livello di sollecitazione di circa 7.5 MPa, che, dopo circa il 40% di compressione, è seguito da incrudimento. Questo tipo di elemento non presenta una repentina fragilità – al raggiungimento della piena capacità di deformazione, la resistenza dell'elemento cresce.

4. Applicazioni in presenza di roccia spingente

Come è stato già sottolineato in precedenza nell'ambito della costruzioni sotterranee, si osserva di frequente che lo scavo di una galleria conduce, in alcune circostanze, a deformazioni della roccia di breve o lunga durata importanti, che causano una progressiva contrazione dell'apertura [2].

Se il fenomeno si sviluppa completamente, la roccia penetra nell'apertura da tutte le direzioni ed anche dal pavimento della galleria. In tali casi il compito principale è limitare le deformazioni della roccia per mezzo di un sostegno temporaneo. Spesso questo fenomeno non si verifica, in quanto il sostegno temporaneo non è sempre in grado di sopportare le deformazioni della roccia e si danneggia o si distrugge completamente. Senza appropriate contromisure la roccia, per così dire, spinge lentamente il rivestimento distrutto antistante fino a che i movimenti si stabilizzano o portano al collasso del foro. Una delle contromisure consiste nell'introdurre centine cedevoli in acciaio (Fig. 5) insieme ad ancoraggi da roccia. Un'altra soluzione consiste in un sostegno cedevole con rivestimento in calcestruzzo spruzzato, combinato con un sostegno leggero cedevole in acciaio. Nel seguito sono forniti esempi per entrambi i tipi di applicazione.

5. Galleria di base del Gottardo con centine cedevoli in acciaio

Nella parte centrale della galleria di base a doppia canna del Gottardo che attraversa le Alpi Svizzere, di lunghezza pari a 57 km, è localizzato un tratto di 1150 m della cosiddetta formazione TZM che fu predetto essere altamente spingente (Fig.11). Infatti un numero di pozzi di esplorazione profondi di lunghezza fino a 1750 m hanno rivelato una roccia di resistenza molto bassa e di elevata deformabilità, composta da scisti e falliti.

In questa parte della galleria (diametro di scavo $\varnothing=13$ m) la copertura era approssimativamente di 800 m. Da prove di laboratorio e da calcoli statici di dettaglio, risultò chiaro che la galleria poteva essere costruita solo se fossero stati ammessi spostamenti radiali fino a 0.70 m [14].

10 MPa, there is a practically constant yielding state with a stress level of approx. 7.5 MPa, which after roughly 40% compression is followed by strain hardening. This type of element does not exhibit sudden brittle failure - on reaching the full deformation capacity, the strength of the element increases.

4. Applications in squeezing rock

As has already pointed out above in underground construction, it is frequently observed that the excavation of an opening leads in some circumstances to major short- or long-term rock deformations, which cause a progressive contraction of the opening [2]. If the phenomenon develops completely, the rock penetrates the opening from all sides including the tunnel floor. In such cases the main task is to limit the rock deformations by means of a temporary support. Often this does not succeed because the temporary support is not able to withstand the rock deformations and is either damaged or completely destroyed. Without appropriate countermeasures the rock, so to speak, slowly pushes the destroyed lining in front of it until the movements come to a standstill or lead to a collapse of the opening. One of the countermeasures consists of introducing yielding steel ribs (fig. 5) together with rock anchors. Another concept consists of a yielding sprayed concrete lining support combined with a light yielding steel support. In the following, examples will be given for both types of application.

5. Gotthard base tunnel with yielding steel ribs

In the central part of the 57 km long twin tube Gotthard Base Tunnel driven through the Swiss Alps a stretch of 1150 m of the so called TZM Formation was

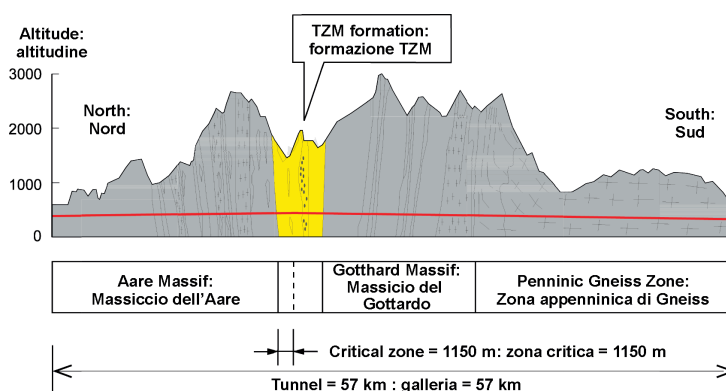


Fig. 11 - Galleria di base del Gottardo: rappresentazione schematica della sezione geologica longitudinale con la formazione spingente TZM. *Gotthard Base Tunnel: schematic representation of the longitudinal geological section with the squeezing TZM-Formation.*

Al fine di stabilizzare il foro, la resistenza del rivestimento deve essere incrementata fino a 2 MPa. La Fig. 12 illustra la relazione tra la copertura H , gli spostamenti radiali u e la resistenza del rivestimento p per i parametri rappresentativi della massa rocciosa elencati in figura.

Si può vedere che per una copertura di 500 m gli spostamenti radiali sono pari a 0.25 m ($p = 1.0$ MPa) e a 0.15 m ($p = 2.0$ MPa), rispettivamente. Raddoppiando l'altezza di copertura fino a 1000 m gli spostamenti radiali a $p = 1.0$ MPa aumentano il loro valore di cinque volte, cioè 1.2 m. Per una resistenza del rivestimento di 2 MPa gli spostamenti decrescono a 0.6 m. Il sistema di sostegno dello scavo (fig. 13) ha interessato un profilo quasi circolare ($\varnothing=13$ m) scavato a sezione piena [15] che sosteneva sistematicamente il fronte della galleria per mezzo di lunghi ancoraggi di acciaio riempiti con iniezioni di cemento.

Per quanto riguarda il sostegno nella sezione trasversale, l'attenzione fu posta sulle centine cedevoli in acciaio di tipo più pesante (TH44/58) con un distanziamento di 0.33-1.25 m. In aggiunta, furono inseriti ancoraggi, riempiti con iniezioni di cemento, radiali alla roccia, per una lunghezza complessiva fino a 300 m. Un sottile rivestimento in calcestruzzo spruzzato, applicato immediatamente dopo una fase di scavo, ha la sola funzione di sigillare la superficie della roccia. Questo concetto di rivestimento temporaneo ha consentito spostamenti radiali fino a 0,70 m in modo regolare. Per dare spazio a questa convergenza della roccia, fu necessario effettuare un sovrascavo. Questo tratto, particolarmente critico, di 1,1 km della galleria di base del Gottardo fu completato senza la necessità di riprofilature.

6. Imbocco di accesso di Saint Martin "La Porte" con elementi cedevoli in calcestruzzo

Questo imbocco – ora completato – garantirà l'accesso per la costruzione della galleria di base a doppia canna di 53 km di lunghezza della nuova tratta ad alta velocità Torino-Lione [16]. Si sono registrate convergenze eccezionalmente gravose nelle formazioni carbonifere con scisti neri,

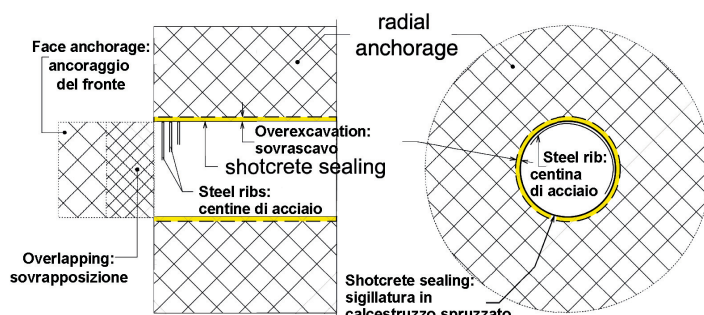


Fig. 13 – Rappresentazione schematica del metodo di sostegno dello scavo (KOVÁRI e EHRBAR, 2008). Schematic representation of the excavation-support concept (KOVÁRI and EHRBAR, 2008).

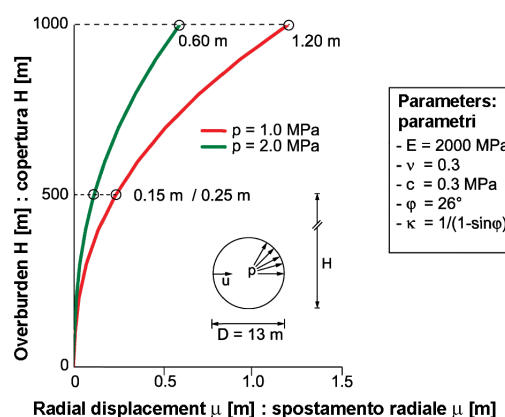


Fig. 12 – Spostamento radiale u in funzione dell'altezza di copertura H per due valori della resistenza del rivestimento p (KOVÁRI e EHRBAR, 2008). Radial displacement u versus height of overburden H for two values of lining resistance p (KOVÁRI and EHRBAR, 2008).

predicted to be highly squeezing (fig. 11). In fact, a number of deep exploratory boreholes with lengths up to 1750 m have revealed a rock of very low strength and high deformability, consisting of schist's and phyllites.

In this part of the tunnel (excavation diameter $\varnothing=13$ m) the overburden was approx. 800 m. From laboratory tests and comprehensive statical calculations it became clear that the tunnel could only be constructed if radial displacements up to 0.70 m were permitted [14].

In order to stabilize the opening, the corresponding lining resistance had to be increased to 2 MPa. fig. 12 illustrates the relation between the overburden H , the radial displacements u and the lining resistance p for the representative rock mass parameters listed in the figure.

It can be seen that for an overburden of 500 m the radial displacements amount to 0.25 m ($p = 1.0$ MPa) and 0.15 m ($p = 2.0$ MPa), respectively. Doubling the height of the overburden to 1000 m the radial displacements at $p = 1.0$ MPa increase their value five-fold, i.e. 1.2 m. For a lining resistance of 2 MPa the displacements decrease to 0.6 m. The excavation-support system (fig. 13) involved a nearly circular profile ($\varnothing=13$ m) excavated in full face [15] and systematically supporting the tunnel face by means of long fully-grouted steel anchors.

As to the support in the cross section, the emphasis was placed on yielding steel ribs of the heaviest type (TH44/58) with a spacing of 0.33-1.25 m. Additionally, fully-grouted radial rock anchors with a

arenarie, scisti di argilla inframezzate con strati di carbone con una copertura da 250 a 350 m. Il profilo dello scavo andava da 77 m² a 125 m², per un profilo interno finale da 54 m² a 63 m². Il sostegno temporaneo consisteva inizialmente di fitte bullonature radiali attorno al profilo, includendo l'arco rovescio assieme alle centine cedevoli in acciaio (TH44/58) e ad un rivestimento in calcestruzzo spruzzato di 200 mm di spessore interrotto da 4 o 5 fessure longitudinali. Per effetto di tali fessure il rivestimento in calcestruzzo spruzzato non poteva sviluppare alcun effetto di sostegno della roccia. La convergenza maggiore si verificò dopo 145 giorni ad una distanza di 60 m dal fronte di scavo e superò i 2 m. I tassi di convergenza variavano da 30-50 mm/giorno al fronte, con il 50% della deformazione totale che si registrava nei primi 20 m.[16]. Al fine di controllare meglio le deformazioni della roccia, cioè di evitare la necessità di scomode, costose e lunghe riprofilature, fu implementato un nuovo sistema di sostegno. Questo ha richiesto una sezione quasi circolare con l'inserimento degli elementi in calcestruzzo cedevoli sopra descritti in 9 fessure ricavate sul rivestimento in calcestruzzo spruzzato (fig. 14). La scelta di questa contromisura si basava su una precedente esperienza acquisita nella galleria di base profonda e lunga 37 km di Löttschberg [17].

Gli elementi a forma di trave (altezza 400 mm, lunghezza 800 mm e spessore 200 mm) furono progettati per cedere a circa il 40% di compressione [18]. Questo imbocco – ora completato – garantirà l'accesso per la costruzione della galleria di base a doppia canna di 53 km di lunghezza della nuova tratta ad alta velocità Torino-Lione. Fu verificato, per mezzo di un vasto programma di monitoraggio in campo, che gli elementi incorporati nel rivestimento erano in grado di accorciarsi, in condizioni di sollecitazione tangenziale quasi costante di 8.5 MPa. Il sistema adottato nell'imbocco di accesso di Saint Martin La Porte ebbe un grande successo.

7. Applicazioni in condizioni di roccia rigonfiante

Le rocce contenenti minerali di argilla o anidrite aumentano di volume quando vengono in contatto con l'acqua. Questo fenomeno è denominato rigonfiamento della roccia. Lo scavo di gallerie in roccia rigonfiante causa normalmente due differenti tipologie di danno. La prima tipologia determina la rottura dell'arco rovescio per effetto della pressione della roccia rigonfiante circostante. La seconda tipologia si verifica in condizioni di bassa copertura, nelle quali il rivestimento comporta un sollevamento dell'intera galleria ed inizialmente esso può rimanere solo leggermente danneggiato. Il pavimento e la chiave di

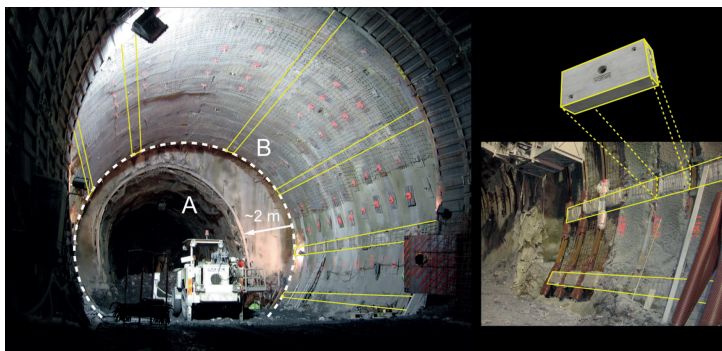


Fig. 14 - Tratta ad alta velocità Torino-Lione, imbocco di accesso: convergenza fino a 2 m (Profilo A), Ri-profilatura ed applicazione di elementi cedevoli in calcestruzzo (Profilo B).
Lyon-Turin high speed rail link, access adit: convergence up to 2 m (Profile A), Re-profiling and application of yielding concrete elements (Profile B).

total length of up to 300 m were placed. A thin shotcrete lining applied immediately after an excavation step had the sole function of sealing the rock surface. This temporary lining concept permitted radial displacements up to 0.70 m in a regular manner. To accommodate this rock convergence, it was necessary to provide space by means of over excavation. This most critical 1.1 km long stretch of the Gotthard base tunnel was completed without the necessity of re-profiling.

6. Saint Martin la porte access adit with yielding concrete elements

This adit – now completed – will provide construction access to the 53 km long twin tube base tunnel of the new Lyon -Turin high speed rail link [16]. Exceptionally severe convergences have occurred in carboniferous formations with black schists, sandstones, clay-like shales interspersed with layers of coal, with an overburden of 250 to 350 m. The excavation profile is 77 m² to 125 m² for a final internal profile of 54 m² to 63 m². The temporary support consisted initially of dense radial bolting around the profile including the invert together with yielding steel ribs (TH44/58) and a 200mm thick shotcrete lining interrupted by 4 or 5 longitudinal slots. Due to these slots the shotcrete lining could not develop any support effect for the rock. The greatest convergence occurred after 145 days at a distance of 60 m from the working face and exceeded 2 m. Convergence rates varied from 30-50 mm/day at the face with 50% of total deformation taking place in the first 20 m [16]. In order to better control the rock deformations, i.e. to avoid the necessity of cumbersome, costly and time-consuming re-profiling a novel support system was implemented. This involved a near circular cross section with the insertion of the yielding concrete elements described above into 9 longitudinal slots in the sprayed concrete lining (fig. 14). The choice of this countermeasure was based on earlier

volta della galleria registrano uno spostamento verso l'alto che conduce alla limitazione o anche alla perdita della funzionalità [3].

La galleria stradale Chienberg in Svizzera, lunga 1.5 km, penetra una formazione di anidrite fortemente rigonfiante (Gipskeuper) e ben illustra questa situazione.

Essa fu progettata con una sezione circolare ed un rivestimento finale in calcestruzzo di 1.0 m di spessore, per resistere ad elevate pressioni di rigonfiamento, e fu scavata con il metodo "heading and bench". Poiché l'estremità terminale della galleria era prossima al completamento in due tratti singoli, il rigonfiamento causò lo spostamento dell'intero profilo di galleria fino a 100 mm. La copertura era modesta e la roccia situata al di sopra della galleria era molto soffice. Il danno interessò un tratto iniziale di galleria di 60 m ed un altro tratto di 370 m [19]. Queste due sezioni di galleria furono progettate in accordo alla teoria del "Sostegno Modulare Cedevole" [20]. Ciò ha comportato l'applicazione di elementi di fondazione cedevoli in calcestruzzo, collocati al disotto dei pilastri di rivestimento (Fig. 15). Altri elementi cedevoli in calcestruzzo sono stati utilizzati per le teste degli ancoraggi di tipo "tie-back", montati sul pavimento della galleria.

Per implementare questo progetto, si dovette rimuovere per fasi il pavimento in calcestruzzo del rivestimento di galleria nelle due sezioni interessate. Si dovette scavare una trincea di 6 m di profondità al di sotto del pavimento originale per costruire un nuovo pavimento per il sistema modificato.

La soletta della nuova sede è 4m al di sopra del nuovo pavimento ed ha connessioni resistenti alla flessione ver-

experience made in the 37 km long deep Lötschberg base tunnel [17].

The beam-shaped elements (height 400 mm, length 800 mm and thickness 200 mm) were designed to yield at approx. 40% compression [18] This adit – now completed – will provide construction access to the 53 km long twin tube base tunnel of the new Lyon -Turin high speed rail link. It was verified, by means of an extensive field monitoring programme, that the elements incorporated into the lining were capable of shortening under a nearly constant tangential stress of 8.5 MPa. The system adopted in the Saint Martin La Porte access adit proved to be very successful.

7. Applications in swelling rock

Rocks containing clay minerals or anhydrite increase in volume when they come into contact with water. This phenomenon is referred to as rock swelling. Tunnelling in swelling rock normally causes two different types of damage. The first type results in the failure of the invert arch due to the pressure from the surrounding swelling rock. The second type occurs under low overburden conditions, in which the tunnel lining results in heave of the entire tunnel and initially may remain only slightly damaged. The tunnel crown and floor experience an upward displacement which leads to limitations or even loss of serviceability [3].

The 1.5 km long Chienberg Road Tunnel in Switzerland, penetrating a heavily swelling anhydrite formation (Gipskeuper), well illustrates this situation. It was designed with a circular cross section and a 1.0 m thick concrete final lining to resist high swelling pressure and excavated with the heading and bench method. As the heading was nearing completion in two individual stretches swelling caused the entire tunnel profile to heave by up to 100 mm. The overburden was modest and the rock located over the roof was very soft. Damage first affected a 60 m long tunnel section and another 370 m section of tunnel [19]. These two tunnel sections were re-designed according to the concept of "Modular Yielding Support" [20]. This involved the application of yielding concrete foundation elements placed under the lining pillars (fig. 15). Other yielding concrete elements were used for the heads of tie-back anchors mounted on the tunnel floor.

To implement this plan the concrete floor of the tunnel lining in the two affected sections had to be removed in stages. A 6 m deep trench had to be excavated below the original floor to build the new floor for the modified system. The new carriageway slab is 4m above the new floor and has bending-resistant connec-

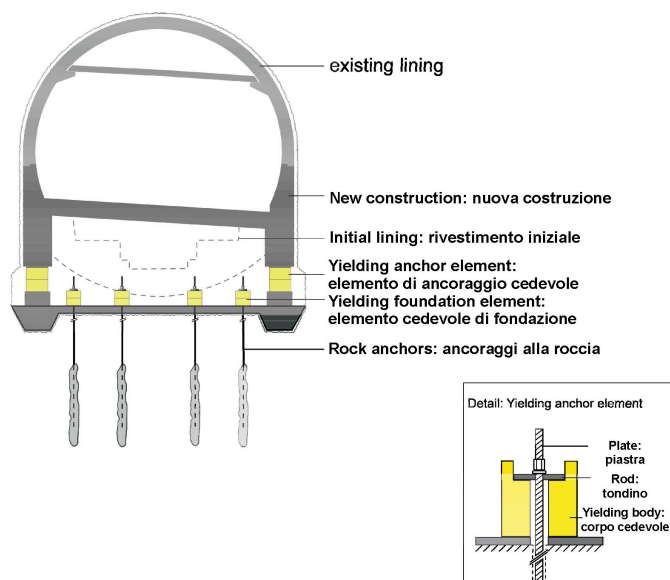


Fig. 15 - Galleria Stradale Chienberg in roccia fortemente rigonfiante: "Sostegno Modulare Cedevole". Chienberg Road Tunnel in heavily swelling rock: "Modular Yielding Support".

so la restante struttura della galleria (in fig. 15 la linea tratteggiata mostra il profilo originale).

Il concetto di "Sostegno Modulare Cedevole" è basato sulla diminuzione della pressione di rigonfiamento dovuta al sollevamento ammissibile del pavimento. La Figura 16 illustra la relazione qualitativa tra innalzamento del pavimento u_a e resistenza del rivestimento p_a della roccia rigonfiante [3]. Consentire un innalzamento di lunga durata del pavimento u_a mediante l'uso di elementi deformabili determina sollecitazioni verticali inferiori p_a .

Gli elementi di fondazione – applicati alla Galleria Stradale di Chienberg – aventi un'altezza di 1000 mm e un diametro di 900 mm sono stati progettati secondo 3 differenti classi di carico per copertura variabile lungo i due tratti fortemente rigonfianti. Ogni tipologia ha livelli minimi e massimi definiti della resistenza di carico. Il livello minimo impedisce i cedimenti della galleria; il livello massimo protegge la galleria dalle sovra-sollecitazioni e dal sollevamento.

All'interno dei limiti specificati, può svilupparsi un intervallo di deformazione del 30-40% dell'altezza originaria degli elementi (sulla base della sollecitazione di snervamento scelta). La capacità di carico di ogni tipo di elemento è stata specializzata variandone i componenti e l'armatura all'interno.

Per configurare i differenti tipi di elementi con i loro parametri di progetto, si sono dovute effettuare diverse prove in un laboratorio di scienza dei materiali su un'apparecchiatura di prova di carico assiale pari a 20 MN.

La Fig. 17 mostra i risultati delle prove di compressione mono-assiale in laboratorio, effettuate su elementi cilindrici di fondazione.

Gli elementi per l'ancoraggio del sostegno al pavimento sono stati installati al fine di ridurre il tasso d'innalzamento del pavimento. Gli elementi per le teste di ancoraggio sono basati sul principio della penetrazione della piastra di ancoraggio con un diametro inferiore di quello dell'elemento di

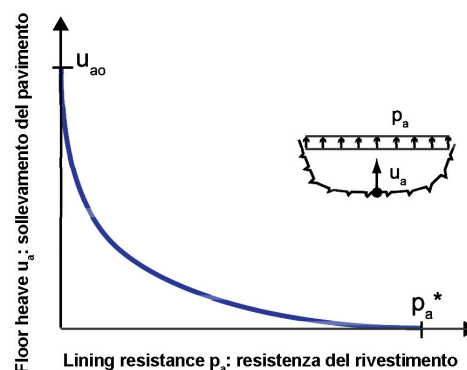


Fig. 16 – Curva caratteristica della roccia rigonfiante.
Characteristic line of swelling rock.

tions to the remaining tunnel structure (in fig. 15 the dashed line shows the original profile).

The concept of "Modular Yielding Support" is based on the diminution of swelling pressure due to permitted floor heave. Figure 16 shows the qualitative relationship between floor heave u_a and the lining resistance p_a of swelling rock [3]. Permitting long term floor heave u_a by using deformable elements results in less vertical stress p_a .

The foundation elements - applied at Chienberg Road Tunnel - having a height of 1000 mm and diameter of 900 mm were designed in 3 different load classes for the variable overburden along the two heavily swelling stretches. Each type has defined minimum and maximum levels of load resistance. The minimum level prevents tunnel settlements; the maximum level protects the tunnel against overstress and heave.

Within the specified limits, a deformation range of 30-40 % of the original height of the elements can develop (depending on the selected yielding stress). The load capacity of each element type was customized by varying the constituents and the reinforcement within the elements.

To configure the different types of element for their design parameters, several tests had been conducted in a material science laboratory on an axial 20 MN load testing equipment. Fig. 17 shows the results of uniaxial compression tests in the laboratory carried out at cylindrical foundation elements.

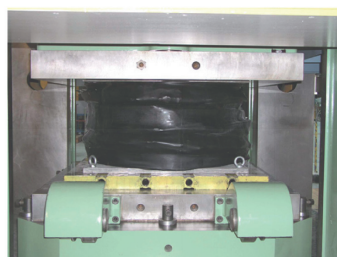
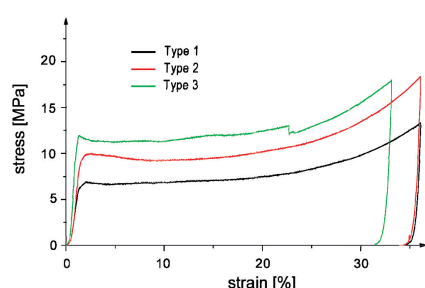


Fig. 17 - Prove di laboratorio degli elementi cilindrici di fondazione (altezza: 1000 mm / diametro 900mm). (a) Livelli di resistenza misurati. (b) Un elemento compresso al 30% (con rivestimento in gomma).
Laboratory tests of cylindrical foundation elements (height: 1000 mm / diameter 900mm).
(a) Measured strength levels. (b) An element compressed at 30% (with rubber skin).

sostegno (vedi anche il dettaglio di Fig. 15). Questo sistema funziona perfettamente, anche se c'è una qualche eccentricità della trasmissione della forza (forza di ancoraggio). La Fig. 18 illustra i risultati della prova effettuata con un tale elemento di ancoraggio.

Gli elementi in calcestruzzo altamente deformabili della Galleria Stradale di Chienberg sono progettati per una durata della deformazione di circa 25 anni. Il vantaggio del sistema ad "Appoggi Modulari Cedevoli" è di consentire l'osservazione e la sostituzione degli elementi in ogni momento senza influenzare il traffico nella galleria. Gli elementi possono essere sostituiti singolarmente dopo aver raggiunto la loro capacità di deformazione. La Fig. 19 mostra il fondo della galleria (sotto-galleria) dopo il completamento dei lavori.

8. Note conclusive

La necessità della costruzione di lunghe e profonde gallerie – come è il caso delle gallerie che attraversano le Alpi in Austria, Francia, Italia e Svizzera – ha reso particolarmente importanti le soluzioni progettuali con sostegno cedevole. Infatti, le zone rocciose fortemente spingenti sotto un'elevata copertura, nella Galleria di Base di Lötschberg lunga 34 km, nella Galleria di Base del Gotardo in Svizzera di lunghezza pari a 56 km e in una delle finestre di accesso alla galleria di base a doppia canna della nuova linea ad Alta Velocità Torino-Lione, potrebbero essere superate con successo introducendo queste tipologie di progetto del rivestimento. Nel caso della roccia rigonfiante contenente argilla e/o anidrite il problema deriva dalla capacità di queste tipologie di rocce di aumentare il proprio volume assorbendo acqua e conducendo così all'innalzamento della base della galleria.



Fig. 19 - Galleria Stradale di Chienberg dopo il completamento: "Sostegno Cedevole Modulare". Chienberg Road Tunnel after completion: "Modular Yielding Support".

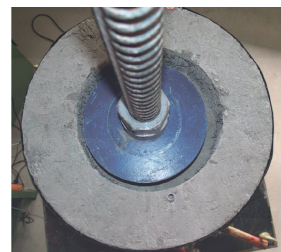
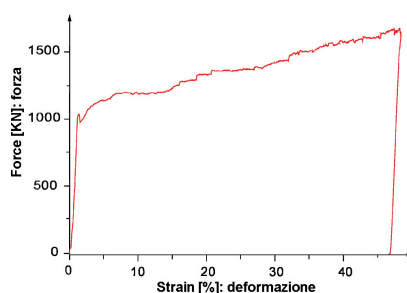


Fig. 18 – Prova di laboratorio di un elemento cilindrico di ancoraggio (altezza: 600 mm / diametro 600mm / diametro della piastra di carico 350 mm). (a) Diagramma Forza-deformazione di un elemento di ancoraggio. b) un elemento compresso al 40%. Laboratory test of a cylindrical anchor element (height: 600 mm / diameter 600mm / diameter load plate 350 mm). (a) Force-strain diagram of an anchor element. b) An element compressed at 40%.

The yielding anchor elements in the floor were installed in order to reduce the rate of the floor heave. The elements for the anchor heads are based on the principle of penetrating the anchor plate with a smaller diameter than that of the yielding element (see also the detail in fig. 15). This system also functions perfectly well if there is some eccentricity of the force transmission (anchor force). Figure 18 illustrates a test result carried out with such an anchor element.

The highly deformable concrete elements at the Chienberg Road Tunnel are designed for a deformation endurance of about 25 years. The advantage of the "Modular Yielding Support" system is that it enables observing and replacing the elements at any time without affecting the traffic in the tunnel. The elements can individually be replaced after reaching their deformation capacity. Fig. 19 shows the bottom of the tunnel after completing the work.

8. Closing remarks

The need for the construction of long deep tunnels - as is the case under the Alps in Austria, France, Italy and Switzerland - has made the design solutions with yielding support highly relevant. In fact, the heavily squeezing rock zones under high overburden in the 34 km long Lötschberg Base Tunnel, the 56 km long Gotthard Base Tunnel in Switzerland and in one of the access adits to the 53 km long twin tube base tunnel of the new Lyon -Turin high speed rail link could be successfully overcome by introducing these type of lining design.

In the case of swelling rock containing clay and/or anhydrite the problem stems from the capacity of these rock types to increase their volume by absorbing water and thus lead to heave of the

La soluzione al problema è fornita nuovamente dal progetto di un sistema di rivestimento nell'arco rovescio che consente un dato valore di sollevamento della base senza violare le prescrizioni operative. L'inserimento di materiali altamente comprimibili di specificata alta resistenza tra roccia e arco rovescio garantisce una soluzione soddisfacente.

base of the tunnel. The solution to the problem is provided again by designing a lining system in the invert that allows a given amount of base heave without violating operational requirements. Inserting highly compressible materials of a specified high resistance between rock and invert provides a satisfactory solution.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] WIESMANN E. (1914), "Über die Stabilität von Tunnelmauerwerk unter Berücksichtigung der Erfahrungen beim Bau des Hauenstein-Basistunnels", Schweiz. Bauzeitung 64, pp. 23-47.
- [2] KOVÁRI K. (2009), "Design Methods with yielding support in squeezing and swelling ground", Proc. ITA-AFTES World Tunnel Congress 2009, Budapest.
- [3] KOVÁRI K. (1998), "Tunnelling in Squeezing Rock", Tunnel 5/98, pp. 12-31.
- [4] KOVÁRI K., AMSTAD CH., ANAGNOSTOU G. (1988), "Design/construction methods – Tunnelling in swelling rocks", Key Questions in Rock Mechanics, Proc. of the 29th U.S. Symposium, Minneapolis, Cundall et al. Balkema, Rotterdam, pp. 17-32.
- [5] ANAGNOSTOU G. and CANTIENI (2007), "Design and analysis of yielding support in squeezing ground", Proceedings of 11th ISRM Congress, The second Half-Century of Rock Mechanics, July 9 – 13, 2007, Lisbon, Portugal, pp. XX.
- [6] HEISE F. and HERBST F. (1913), "Lehrbuch der Bergbaukunde", Berlin Verlag, V.J. Springer.
- [7] MOHR F. (1957), "Kraft und Verformung in der Gebirgsmechanik untertage", Tagungsberichte, Deutsche Baugrundtagung Köln, W. Ernst Verlag, pp. 52-65.
- [8] KOVÁRI K. (2003), "History of the sprayed concrete lining method – part I", Tunnelling and Underground Space Technology 18, Elsevier Science Ltd. pp. 57-69.
- [9] LENK K. (1931), "Der Ausgleich des Gebirgsdruckes in grösseren Teufen beim Berg- und Tunnelbau", Verlag Julius Springer, Berlin, pp.21.
- [10] FRÖHLICH K. (1948), "Die Verbindung stählerner Streckenbögen", Glückauf: 543.55.
- [11] SCHAECHTERLE K. (1926), "Tunnelbau in quellendem Gebirge", Die Bautechnik, Heft 30, pp. 28-65.
- [12] KOVÁRI K., EHRBAR H., THEILER A. (2005), "Druckhafte Strecken im TZM Nord: Projekt und bisherige Erfahrungen", Proceedings of Geologie und Geotechnik der Basistunnel am Gotthard und am Lötschberg, vdf Verlag ETHZ, pp.239-252.
- [13] MORITZ B. (1999), "Energy absorbing elements for tunnels in squeezing rock – design and experience", Anwenderbeiträge des 9. Österreichischen Abaqus Anwendertreffen, Graz, pp. 1-10.
- [14] THUT A., STEINER P., STOLZ M. (2006), "Tunnelling in Squeezing Rock – Yielding Elements and Face Control", 8th International Con. on Tunnel Constructions and Underground Structures, Ljubljana, Slovenia, pp. 150-157.
- [15] KOVÁRI K. and EHRBAR H. (2008), "Gotthard Basistunnel, Teilabschnitt Sedrun - Die druckhaften Strecken im TZM Nord: Projektierung und Realisierung", Swiss Tunnel Congress Luzern, Dokumentation D 0229, Vol. 7 Swiss Tunneling Society.
- [16] LUNARDI P. (1998), "Storia del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze", Gallerie e grandi opere sotterranee, No. 54, pp. 16-39.
- [17] MATHIEU E. (2008), "At the mercy of the mountain", Tunnels & Tunnelling, Focus on Europe (October), pp. 21-24.
- [18] KELLER M. (2005), "Die Beherrschung der Hohlraumverformungen in der Karbonzone (Lötschberg Basistunnel)", Swiss Tunnel Congress Luzern, Dokumentation D 0229, Vol. 4, Swiss Tunneling Society.
- [19] BARLA G., RETTIGHIERI M., FOURNIER L., FAVA A., TRICLOT J. (2008), "Saint Martin Squeeze", Tunnels & Tunnelling, Focus on Europe (May), pp. 15-19.
- [20] HOFER R., CHIAVERIO F., KOVÁRI K. (2007), "Chienbergtunnel, Sissach", Tunnelhebung infolge Quellen, Swiss Tunnel Congress, Luzern, Switzerland,
- [21] KOVÁRI K., CHIAVERIO F. (2007), "Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge", STUVA TA-GUNG'07, Forschung + Praxis 42, bau verlag, Gütersloh, pp. 195-200.

Sommaire

METHODES DE PROJET DES TUNNELS AVEC MOUVANT INSTABLE DANS LES ROCHES POUSSANTES ET REGONFLANTES

Quoique les processus qui ont lieu dans le terrain autour d'un tunnel creusé dans les roches poussantes et regonflantes diffèrent de façon fondamentale l'un de l'autre, il existe un aspect commun aux deux cas: plus la roche se déforme, plus sa pression diminue.

Ce phénomène est prouvé à la fois par l'expérience et par les investigations théoriques et a été clairement reconnu depuis le début du siècle dernier. "Pour chaque fraction de millimètre d'écartement de la masse rocheuse, la valeur de la pression qui agit sur le revêtement diminue" [1].

Sur la base de cette notion, un certain nombre de méthodes de projet ont été mises au point au profit des ingénieurs pour le contrôle de la pression de la roche aussi dans les roches hautement regonflantes et hautement poussantes. Le revêtement temporaire ainsi que celui définitif peuvent être construits de telle façon qu'ils exercent une pression stabilisatrice sur la roche et en même temps permettent à la masse rocheuse de se déformer. Dans plusieurs cas, cette action combinée, à savoir le soutien de la roche ainsi que sa propre liberté de déformation, constitue non seulement la solution la plus économique mais est, dans certains cas, la seule solution qui rend faisable la construction du tunnel.

Zusammenfassung

PLANUNGSVERFAHREN VON TUNNEL MIT NACHGIEBIGER VERKLEIDUNG IM SCHIEBENDEN ODER ANSCHWELLENDE GESTEINEN.

Die Phänomene, die in den obengenannten Zuständen stattfinden, sind ganz verschieden aber sie stellen ein gemeinsames Merkmal vor: desto grösser die Gesteinsdehnung desto niedriger sein Druck. Dies haben Erfahrungen und Theorien seit einem Jahrhundert nachgewiesen. Auf Grund von diesem Bewusstsein ist eine Menge von Verfahren entwickelt worden, die den Gesteinsdruck kontrollieren lassen, auch im Fall von hochdruckenden oder hochanschwellenden Gesteinen. Davon folgt es dass die zeitweilige und die endgültige Tunnelbekleidung gebaut werden können, in dem sie einen stabilisierenden Druck auf Gestein ausüben lassen und eine gleichzeitige Dehnung Möglichkeit dem Gestein erlauben. In vielen Fällen diese Möglichkeit - d. h. gleichzeitige Gesteinsstützung und Dehnung Möglichkeit - ist nicht nur die preisgünstigste aber auch die einzige die das Tunnelbau erlaubt.

LINEE GUIDA PER GLI AUTORI

(Istruzioni su come presentare gli articoli per la pubblicazione sulla rivista "Ingegneria Ferroviaria")

La collaborazione è aperta a tutti - L'ammissione di uno scritto alla pubblicazione non implica, da parte della Direzione della Rivista, riconoscimento o approvazione delle teorie sviluppate o delle opinioni manifestate dall'Autore - I manoscritti vengono restituiti.

La riproduzione totale o parziale di articoli o disegni è permessa citando la fonte.

La Direzione della Rivista si riserva il diritto di utilizzare gli articoli ricevuti e la documentazione ad essi connessa anche per la loro pubblicazione, in lingua italiana o straniera, su altre riviste del settore edite da soggetti terzi. In ogni caso, la pubblicazione degli articoli ricevuti, anche su altre riviste avverrà sempre a condizione che siano indicati la fonte e l'autore dell'articolo.

Al fine di favorire la presentazione delle memorie, la loro lettura e correzione da parte del Comitato di Redazione nonché di agevolare la trattazione tipografica del testo per la pubblicazione su "Ingegneria Ferroviaria", si ritiene opportuno che gli Autori stessi osservino gli standard di seguito riportati.

L'articolo dovrà essere necessariamente su supporto informatico, preferibilmente in formato WORD per Windows, accettato dalla redazione (e-mail, CD-Rom, DVD, pen-drive...).

Tutte le figure (fotografie, disegni, schemi, ecc.) devono essere progressivamente richiamate nel corso del testo. Le stesse devono essere fornite complete della relativa didascalia. Tutte le figure devono essere inserite su supporto informatico (e-mail, CD-Rom, DVD o Pen Drive) e salvate in formato TIF o EPS ad alta risoluzione (almeno 300 dpi). È richiesto inoltre l'invio delle stesse immagini in formato compresso JPG (max 50KB per immagine).

È consentito includere, a titolo di bozza di impaginazione, una copia cartacea che comprenda l'inserimento delle figure nel testo.

Si pregano i signori autori di utilizzare rigorosamente, nei testi presentati, le unità di misura del Sistema Internazionale (SI), utilizzando le relative regole per la scrittura delle unità di misura, dei simboli e delle cifre e di richiamare nel testo con numerazione progressiva tutti i riferimenti bibliografici.

All'Autore di riferimento è richiesto di indicare un indirizzo di posta elettronica per lo scambio di comunicazioni con il Comitato di Redazione della rivista e di sottoscrivere apposita liberatoria per la pubblicazione degli articoli.

Per eventuali ulteriori informazioni sulle modalità di presentazione degli articoli contattare la Redazione della Rivista - Tel. 06.4827116 - Fax 06.4742987 - redazioneif@cifi.it