

SPERIMENTAZIONI SU RIVESTIMENTI DI GALLERIE AUTOSTRADALI (*)

G. OBERTI - L. GOFFI (**)

SOMMARIO: Gli Autori discutono il problema della determinazione delle tensioni prodotte dalla spinta della roccia sul rivestimento delle gallerie autostradali.

Alcuni metodi estensimetrici proposti a tal fine sono qui illustrati e vengono forniti i dati sperimentali riferentisi a certi casi di applicazione pratica.

1 - Generalità

Una recente notevole attività in Italia nel settore dei trafori autostradali alpini ha posto in luce l'attualità dei problemi concernenti la progettazione razionale dei rivestimenti nonché la verifica ed il controllo della loro efficienza statica in rapporto alle spinte esercitate dal mezzo circostante.

In particolare taluni casi di dissesti, crolli, lesioni, etc., verificatisi su tratti di rivestimenti già ultimati a breve distanza di tempo dalla loro realizzazione, hanno richiamato l'attenzione sull'aspetto della sicurezza che le opere in esame esigono e sui criteri che consentono di stabilire le condizioni statiche cui le opere stesse sono soggette.

Il problema della sicurezza delle gallerie autostradali è sensibilmente diverso rispetto a quello che si pone per altre opere quali condotte per acqua, ecc.

Nel caso della galleria autostradale il quesito della sicurezza si pone con particolare pertinenza alla salvaguardia della incolumità personale di quanti transitano, e non semplicemente sotto l'aspetto tecnico di evitare un arresto nell'esercizio dell'opera.

È giusto pertanto (ed è auspicabile) che una cura particolare venga prestata nella realizzazione dei trafori autostradali e che le moderne tecniche sperimentali vengano impiegate nelle indagini concernenti la determinazione dei parametri geomeccanici connessi alla questione della sicurezza statica delle opere di rivestimento.

2 - Problemi connessi alla progettazione di un rivestimento autostradale

Il problema della progettazione di un rivestimento di un tunnel è riconducibile a quello della determinazione delle spinte che la roccia (o comunque il mezzo) circostante esercita sul rivestimento stesso.

Le trattazioni teoriche rigorose del problema, pur di grande interesse per la comprensione generale dei fenomeni concernenti il meccanismo delle spinte della roccia sul rivestimento, di norma non forniscono indicazioni veramente attendibili nè in sede di progettazione, nè in sede di verifica delle condizioni di sicurezza.

Le trattazioni teoriche in effetti partono per lo più da premesse di ordine generale secondo le ipotesi di isotropia, di elasticità in un certo ambito di sforzi e successivamente di plasticità secondo schematizzazioni innegabilmente arbitrarie.

In particolare le schematizzazioni teoriche non possono tener conto dei fenomeni complessi ed irreversibili che intervengono nella roccia al momento dello scavo, il quale di norma procede dalla calotta ai piedritti ed all'arco rovescio, producendo un rimaneggiamento nelle condizioni del mezzo roccioso tale da influenzare la distribuzione delle spinte al contorno del rivestimento.

La ricerca sperimentale consente senza dubbio una approssimazione al problema di ben altra attendibilità e rigorosità, sia che si proceda ad un'indagine diretta al reale, sia che si proceda a prove su modello.

Nell'ambito dell'attività sperimentale dell'Istituto a cui appartengono, gli scriventi hanno avuto l'opportunità di occuparsi direttamente di numerosi e singolari problemi connessi ad opere di primaria importanza quali i trafori alpini del Monte Bianco e del Gran San Bernardo ed il traforo appenninico della Cisa.

(*) Comunicazione presentata al VII *Convegno di Geotecnica* (Trieste, 1-2 giugno 1965).

(**) Prof. Dr. Ing. GUIDO OBERTI - Direttore dell'*Istituto di Tecnica delle Costruzioni* del Politecnico di Torino.

Prof. Ing. LUIGI GOFFI, assistente all'*Istituto di Tecnica delle Costruzioni* del Politecnico di Torino.

Le esperienze condotte hanno consentito un affinamento ed una verifica delle più svariate tecniche sperimentali e hanno convinto del rilevante apporto che può fornire la sperimentazione per chiarire i molti interrogativi sui problemi della sicurezza delle gallerie.

3 - La ricerca diretta in sito

a) La ricerca diretta si propone inizialmente una indagine di natura geognostica e geotecnica sulla roccia attraversata dalla galleria: questa prima indagine intende determinare le caratteristiche meccaniche della roccia (carichi di rottura, curva intrinseca, modulo elastico globale, ecc.) e le reali condizioni di sollecitazione pluriassiale dell'ammasso roccioso.

La determinazione dei parametri geomeccanici si ottiene con noti metodi sperimentali, dei quali numerosi studiati ed affinati dagli scriventi.

Un cunicolo sperimentale di diametro ridotto, realizzato in fregio al futuro scavo, consente di pervenire alla determinazione di questi parametri che possono in questa fase intendersi riferiti alle condizioni preesistenti alla perturbazione indotta dallo scavo della galleria.

Ma la determinazione diretta degli effetti della pressione della roccia sul rivestimento del tunnel non può attendibilmente ottenersi che attraverso ad una indagine estensimetrica sul rivestimento stesso.

In altri termini questa ricerca finisce di essere condotta in termini di verifica « a posteriori », allorchè cioè il rivestimento è ormai realizzato.

Giova notare che, in genere, non risulta possibile condurre ricerche di effetti di pressioni della roccia su tunnel sperimentali realizzati nella stessa roccia e tali da riprodurre in similitudine geometrica il prototipo in studio, per la difficoltà di risalire ai parametri che condizionano la similitudine meccanica tra i fenomeni nelle due scale.

Al tempo stesso occorre notare l'impossibilità e la inattendibilità del rilievo di pressioni al contorno dell'anello di rivestimento mediante capsule manometriche; questo per la estrema irregolarità delle distribuzioni delle pressioni e per il fatto che la spinta della montagna può, in taluni casi, svilupparsi con azioni di carichi concentrati.

Le letture estensimetriche sull'anello di rivestimento non solo sono più attendibili e più significative per rapporto alle sollecitazioni che esse significano ma parimenti sono la conseguenza di distribuzioni anche irregolari di spinte il cui effetto viene ad essere così mediato su di una certa dimensione in senso longitudinale del rivestimento stesso.

Lo studio estensimetrico può condursi mediante estensimetri rimovibili che consentono di seguire le deformazioni nel tempo conseguenti alla progressiva azione della spinta della roccia sin dal momento del getto e del primo consolidamento dell'anello di rivestimento.

Per questa ricerca possono utilmente impiegarsi basi « a coppie » cioè doppie (Fig. 1) da murarsi nel rivestimento, le quali recano a due differenti quote,

per rispetto al lembo d'intradosso del rivestimento, le sedi per un estensimetro rimovibile ad esempio tipo « GALILEO - OBERTI » su base $50 \div 70$ cm.

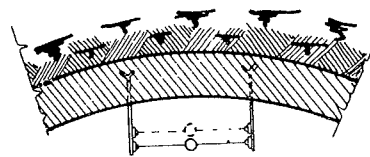


Fig. 1.

L'accorgimento di operare con misure ripetute alle due differenti quote consente di apprezzare l'entità dell'accorciamento assiale e della rotazione fra le due sezioni ove sono infisse le basi di misura, per cui è possibile valutare l'entità delle azioni di sforzo normale e di momento flettente sviluppate dalla progressiva azione spingente, effettuando letture ad intervalli opportuni di tempo a partire, se possibile, dal momento del primo indurimento del getto, allorchè è lecito supporre che il rivestimento non sopporti ancora sforzi statici.

Una collocazione di basi a catena come indicato in fig. 2 consente di studiare e controllare tutti i punti di una sezione del tunnel.

L'interpretazione delle letture estensimetriche esige cautele particolari, specie allorchè le basi vengono inserite nel getto del calcestruzzo fresco, per cui le prime letture possono denunciare le deformazioni dovute al ritiro del conglomerato (¹).

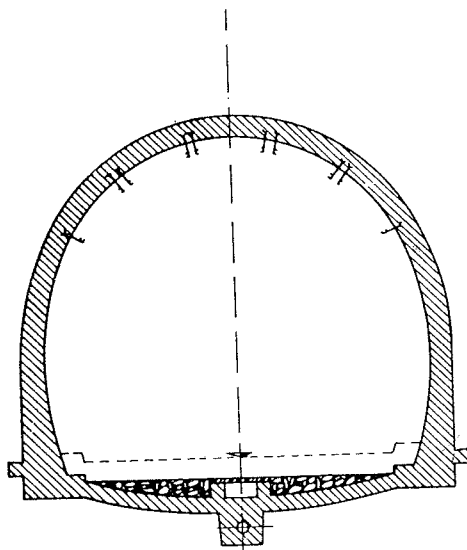


Fig. 2.

Inoltre per quanto concerne l'interpretazione delle letture successive alla fase di ritiro del conglomerato, occorre tener presente il peso delle deforma-

(¹) È possibile porre strumenti « spia » su blocchi gettati contemporaneamente e lasciati liberi di deformarsi.

zioni plastiche e viscosi sulle letture strumentali e l'impossibilità di una loro interpretazione nell'ambito della elasticità del materiale.

Peraltro la difficoltà di esprimere in termini quantitativi di sforzi le letture strumentali non costituisce una limitazione importante nell'interesse della descritta sperimentazione, dacchè la determinazione esatta dello stato di deformazione assiale e flessionale dell'anello di rivestimento della galleria consente di per sé di trarre elementi di previsione sulle condizioni della struttura in rapporto ai limiti di sicurezza, adottando i criteri di rottura su considerazioni di deformazione.

b) Un caso particolare di applicazione delle predette basi estensimetriche si ha allorchè si voglia conoscere l'entità delle azioni (normali e flettenti) nel rivestimento di una galleria in cui non sia stato possibile effettuare inizialmente le misure secondo le modalità precedentemente descritte.

È il caso che si presenta allorchè si verificano crolli o lesioni nel rivestimento di una galleria; il quesito consiste allora nel conoscere in un certo numero di punti l'entità delle azioni normali e flettenti nella sezione del rivestimento, per dedurne le condizioni in rapporto ai limiti di sicurezza.

In questo caso si può ricorrere alla tecnica dei tagli che liberano le tensioni di una porzione di rivestimento ove sono state precedentemente murate le basi estensimetriche in precedenza descritte ⁽²⁾ (Fig. 3).

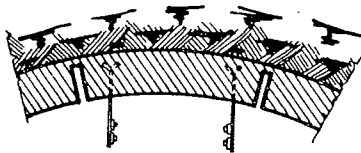


Fig. 3.

Ove non si voglia procedere a tagli troppo profondi da compromettere la stabilità locale della galleria, si può impiegare un'altra tecnica che consiste nell'apportare al rivestimento della galleria una riduzione di rigidità nei tratti compresi tra le singole basi.

La riduzione di rigidità del rivestimento può essere provocata ad esempio da una serie di tagli come indicato in fig. 4; una taratura in laboratorio su un elemento in scala ridotta può stabilire lo spessore equivalente che può attribuirsi al tratto di rivestimento in cui sono stati apporati i predetti tagli.



Fig. 4.

⁽²⁾ Giova rilevare che con questa tecnica sperimentale si opera su misure di deformazione « al ritorno » e quindi essenzialmente elastiche, non inquinate pertanto da quote plastiche, viscosi o termiche.

Semplici considerazioni consentono di risalire, dalle deformazioni provocate dalla variazione di rigidità del rivestimento, all'entità delle azioni assiali e flettenti preesistenti nel punto.

c) La tabella qui appresso reca i valori delle sollecitazioni riscontrate con la tecnica degli intagli parziali in alcuni punti del rivestimento della Galleria del Gran San Bernardo, in corrispondenza di una sezione normale al suo asse, nell'ipotesi di prevalente regime flessionale (confermato da esperienze su modelli) che ha consentito di operare con basi semplici.

n. estensimetro	sollecitazioni (Kg cm ⁻²)	
	intradosso	estradosso
1	+ 83	- 83
2	+ 18	- 18
3	+ 21	- 21
4	- 134	+ 134
5	+ 40	- 40

Questi risultati consentono alcune osservazioni; innanzi tutto risulta chiara la netta prevalenza di notevoli dissimmetrie nella distribuzione delle pressioni sul rivestimento. Questa considerazione trova riscontro nelle inversioni di segni nelle letture di estensimetri contigui.

Un valore eccessivo negli sforzi di trazione va evidentemente corretto; in tale punto deve presumersi una probabile fessurazione all'estradosso della galleria con una corrispondente riduzione della sua rigidità.

L'esempio sopra riportato dà un'idea dell'interesse e parimenti dei limiti e delle approssimazioni del procedimento impiegato; evidentemente i rilievi estensimetrici esigono un approfondito esame critico per ricavarne un'interpretazione attendibile.

L'interesse che deriva dalla applicazione delle tecniche descritte non è soltanto connesso al caso singolo in esame, dacchè esse consentono, allorchè si disponga dei dati relativi a numerose esperienze, di ricavare nozioni di ordine generale sul meccanismo delle spinte dei vari tipi di roccia sul rivestimento delle gallerie.

I dati in nostro possesso consentono sin d'ora di distinguere nettamente il comportamento delle rocce isotrope da quello delle rocce scistose, soprattutto per l'aspetto delle rilevanti azioni flettenti che le rocce scistose esercitano sul rivestimento allorchè il loro piano di giacitura sia inclinato sull'orizzontale. Le azioni flettenti in questo caso sono da ricondursi a probabili carichi concentrati secondo un meccanismo analogo a quello indicato sul modello fotoelastico di fig. 5.

4 - Prove su modelli strutturali

Le prove al reale consentono soprattutto una verifica « a posteriori » delle condizioni di sicurezza della struttura; le prove su modello permettono invece lo studio « a priori » della sagoma e degli spessori del

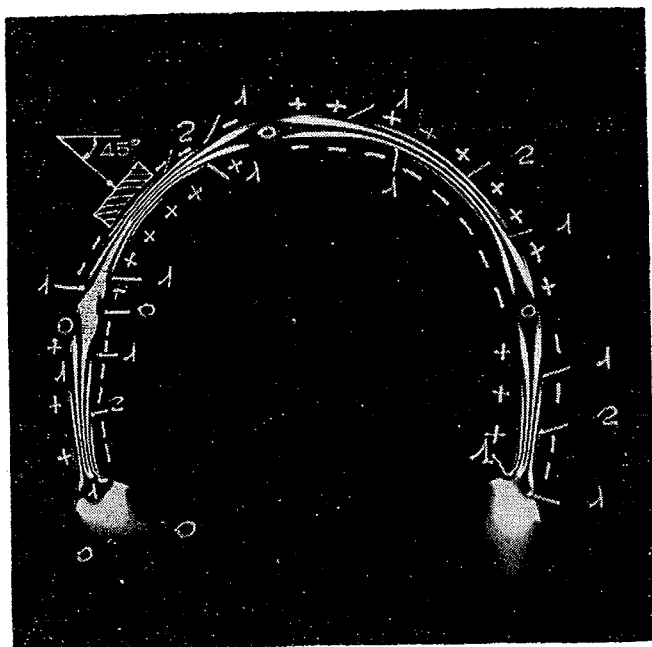


Fig. 5.

rivestimento al fine di ottenere la massima efficienza statica ed il più elevato grado di sicurezza, con riferimento a determinate ipotesi di distribuzioni di carichi all'estradosso del rivestimento.

L'impostazione delle prove su modello deve essere preceduta da ricerche sulle caratteristiche meccaniche e sulle sollecitazioni preesistenti nell'ammasso roccioso; queste caratteristiche vengono riprodotte su

modello con la realizzazione di strati di materiali le cui proprietà meccaniche obbediscano alle note leggi di similitudine e con l'applicazione di precarichi opportuni.

La modellazione che fa ricorso per lo più a modelli bidimensionali può agevolmente riprodurre le stratificazioni, le anisotropie, eventualmente le faglie e le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso. Opportune misurazioni estensimetriche consentono di valutare gli stati di tensione sia sul rivestimento, sia nei punti circostanti della roccia.

Una sperimentazione recentemente effettuata all'ISMES di Bergamo si propone di valutare l'importante influenza dei rimaneggiamenti e delle alterazioni che lo scavo della galleria induce nella roccia circostante.

In altri termini viene realizzato un modello piano dell'ammasso roccioso indefinito: su di esso si induce uno stato di tensione in similitudine con quello riscontrato con le prove in sito nella roccia indisturbata. In queste condizioni viene effettuato lo scavo della sezione del tunnel ed il getto del rivestimento con analogia alle operazioni che si verificano al reale.

Opportune misure estensimetriche forniscono tutti gli elementi per seguire i complessi meccanismi elastici, plastici e viscosi della distribuzione delle tensioni e delle spinte sulla roccia.

La ricerca descritta deve considerarsi tra le più complesse e delicate della tecnica modellistica; essa tuttavia si propone di rispondere nella maniera più esauriente al nocciolo della questione connesso ai problemi della sicurezza per la progettazione e verifica delle opere di rivestimento delle gallerie autostradali.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EXPRESSWAY TUNNEL LININGS

Summary: The authors discuss the problem of determining the stresses produced by rock pressure against expressway tunnel linings.

Some extensometric methods are proposed and the testing results obtained in practical cases are presented.

ETUDES ET EXPERIENCES SUR LES REVETEMENTS DES TUNNELS D'AUTOROUTES

Sommaire: Les auteurs discutent le problème des efforts produits par la poussée du rocher sur le revêtement des tunnels d'autoroutes.

Certaines méthodes extensométriques proposées à cette fin sont illustrées ici en même temps que les données expérimentales se référant à certain cas d'application pratique.