Vårsleppet NBG 12. mars 2009

Armerte sprøytebetongbuer Bakgrunn og dimensjonering

Eystein Grimstad
NGI

FORUTSETNING FOR DIMENSJONERING

- For å kunne dimensjonere tung sikring riktig må en kjenne lastene fra bergmassen både under driving og over lengre tid
- Gjelder både støp mot forskaling og armerte buer
- Ønsker vi optimal sikring eller en jevn ekstrem oversikring som holder i **nesten** alle tilfeller?
- Planlagt dimensjonering forutsetter at bergmassen er under kontroll, dvs.
  - ✓Unngå ras
  - ✓Beholde profil
  - ✓Kontrollere deformasjon
  - ✓Akseptere deformasjon i arbeidssikring ved høye bergrykk og skvising
  - ✓Gå inn med stivere sikring når deformasjonen har avtatt

Tunneldriving og sikring etter ras i Lærdalstunnelen

Hvilke laster kan bergmassen gi mot sikringen?

- Det er en empirisk sammenheng mellom målt sikringstrykk og bergmassekvalitet i oppsprukketbergmasse
- Høyeste målte svelletrykk (2 MPa) er nesten på samme nivå som høyest tenkelige sikringstrykk i oppsprukket bergmasse, dvs. ca. 2-4 MPa
- Ved høye spenninger i harde bergarter (sprakefjell) og i svake bergarter (skvising) finnes ingen sikring som kan stoppe bevegelsene. Utstøping blir knust

Sikringstrykk fra bergmassen basert på Q og J_r

Deformasjonsmålinger i svakhetssone i Frøyatunnelen

De tre spennviddene (5, 10 og 20 m) med ulik geometri, som har blitt brukt for beregning av RRS i STAAD. De beregnede deformasjonene er visualisert med piler og en linje nummer to. Skissen ned til høyre illustrerer de 22 elementene i STAAD-modellene.

Dimensjonering av sprøytede, armert buer
Beregnet ved Statikkprogrammet Stad

Armerte sprøytebetongbuer med ett eller to lag armering dimensjonert etter bergmassekvalitet

Første lag armering. 12 stk. Ø 16 mm i påhugget i Fatlatunnelen i Sogn.
3 stk Ø 25 mm bolter nederst i veggen på begge sider

Ferdig sprøytet dobbelt armert bue i påhugget i Fatlatunnelen i Sogn. Skjev belastning 12 + 10 stk. Ø 16 mm jern

St. v.v. nye Håndbok 21/ Rapport 2538

- **Kraftig økning i sikringsnivå primært for øket levetid**
- Hittil noe ustrukturert
  - ✓delvis basert på Q-systemet, som er basert på systematisk innsamling av erfaringsdata fra mange tunnelanlegg
  - ✓Delvis basert på synsing
- **Sikrere og jevnere sikringsnivå** dersom en i stedet bare senker ESR-verdien fra 1,0 for hovedveier som gjelder i Q-systemets sikringsdiagram til for eksempel ESR = 0,5
- ESR= 0,5 gir en **9 m bred** tunnel en ekvivalent spennvidde på **18 m**
- ESR = 0,5 fører til at vi går opp en hel sikringsklasse med hensyn til
  - ✓Sprøytebetongtykkelse
  - ✓Dimensjonering av armerte buer (RRS)

BERGKLASSER
G
F
E
D
C
B
A
Eksepsjonelt dårlig
Ekstremt dårlig
Svært dårlig
Dårlig
Mid-dels
Godt
Svært godt
Ekstremt godt
Eks. godt
Bolteavstand i sprøytet område
Bolteavstand i usprøytet område
D70/10 c/c 1,0
D70/8 c/c 1,7
D55/8 c/c 2,3
D55/6 c/c 2,9
D40/4 c/c 3,2
E30/3 c/c 4
D55/6 c/c 1,2
D45/6 c/c 1,7
D45/5 c/c 2,3
D40/4 c/c 2,9
E30/3 c/c 3,2
D40/4 c/c 1,2
D35/5 c/c 1,7
E35/5 c/c 2,3
E25/3 c/c 2,9
8 CCA
7 Sfr+RRS+B
6 Sfr+B
5 Sfr+B
4 Sfr+B
3 Sfr/S+B
2 sb
1 Usikret
E = 1000 J
E = 700 J
E = 700 J
25 cm
15 cm
12 cm
9 cm
6 cm
5 cm
1,0 m
1,2 m
1,3 m
1,5 m
1,7 m
2,1 m
2,3 m
2,5 m
1,0 m
1,3 m
1,6 m
2,0 m
3,0 m
4,0 m
Spennvidde eller høyde i m / ESR
Boltelengde i m ved ESR = 1
Bergmassekvalitet Q = RQD/Jn x Jr/Ja x Jw/SRF
100
50
20
10
5
2
1
0,001
0,004
0,01
0,04
0,1
0,4
1
10
100
1000
20
11
7
5
3
2,4
1,5

Store krefter i sprøytet bue i dårlig fjell

- I jordaktig svakhetssone er det sprøytet buer i undersjøisk tunnel på Finnfastanlegget øst for Stavanger
- En av disse buene er instrumentert
- Ringtrykket er målt opptil 2 MPa = 200 tonn/ m^2 i det ene vederlaget
- Tilsvarende ringtrykk i bue under 4 m fjelloverdekning + 5 m jord i Bærumstunnelen vest for Oslo er maks. 30 tonn/m^2
- De radiære lastene er små i forhold til ringtrykkene
- Maks last mot hengen i Finnfast etter lang tids omlagring var 0,5 MPa = 50 tonn/m^2
- Maks last mot hengen i Bærumstunnelen etter lang tids omlagring var 0,0 MPa = 0 tonn/m^2. Arbeidssikringen med Sfr + B tok hele lasten fraoverlagringstrykket

Finnfasttunnelen

Borkjerner fra den instrumenterte svakhetssona

Installerte instrumenter

Spenninger og tøyninger i Finnfast fra 1. mars til 25. mai 2008.

Bærumstunnelen Sandvika -Lysaker

Forinjeksjon nådde området

Stuffen passerte ca. 1. mars

Ekstensiometermålinger fra terrengoverflaten over Bærumstunnelen

Spenninger og tøyninger i Bærumstunnelen fra 1. mars til 7. juni 2008.

Konklusjon og erkjennelser

- Lasten fra bergmassen (sikringstrykket) er betydelig lavere enn ventet ut fra overlagringstrykk. Dette kan ha flere årsaker.
- Arbeidssikringen med Sfr + bolter tar betydelige laster før installasjon av buer.
- Både spenningsmålingene og numerisk simulering indikerer tensjon i bergmassen nærmest tunnelperiferien
- Høye horisontalspenninger i bergmassen på Finnfast kan også forklare at sikringstrykket mot buen er betydelig høyere i vederlagene enn i hengen.
- Svinn i betongen under herding (≈0,5-1,0 ‰ =10-20 mm i 20 m buelengde) kan gi tensjon i kontakten mellom buen og hengen. Særlig gjelder dette i Bærumstunnelen, hvor spennvidden er 14 m og buelengden er ca. 26 m
- Maks målt sikringstrykk er 0,5 MPa i svakhetssone på Finnfast med teoretisk spenning fra overliggende bergmasser på 2,9 MPa

Konklusjon og erkjennelser forts.

- Kryp i betongen over lang tid kan gi spenningsomlagring, som er observert etter ca. 2-4 måneder i begge anleggene
- Ujevn bue kan gi store anomalier i spenningene i buene, og skal unngåes
- Sprøytede buer har stor kapasitet og kan brukes selv i de dårligste bergmasser
- Sprøytede buer har stor overkapasitet for alle typer svakhetssoner og de høyeste svelletrykk (Svelletrykk in situ er ca. 1/5- 1/9 av målt i lab).
- D.v.s. at kraftige buer kan ta minst 5 ganger så høye laster som de høyest tenkelige svelletrykkene kan gi.
- Sprøytede buer som er dimensjonert etter forholdene kan erstatte all utstøping med hensyn til bæreevne

Entydige resultater, men ønske om flere målinger

- Det er ønske om å utføre instrumentering av flere tunneler for å får sikrere verifikasjon av størrelse og fordeling av krefter mot armerte buer.
- Sålestøp er ofte helt nødvendig både for armerte buer og for utstøping i eksepsjonelt dårlig bergmasse, samt ved skvising

Bæreevne for åpen og lukket ring

Eksempler på oppsprekking og kollaps ved full utstøping

- Bøtunnelen i Vesterålen. Kontinuerlig utstøpt over mer enn 200 m lengde. Hestesko-profil
  - ✓Svelleleir presset veggen inn på begge side av tunnelen i 200 m lengde.
  - ✓Ble reparert med 6 m lange bolter satt inn over og under de langsgående horisontale sprekkene midt i veggene
- Ertan i Kina. Kabeltunneler mellom kraftstasjon og trafohall støpt ut med massiv armering
  - ✓Høye spenninger knuste betongen. Alt måtte rives og settes opp på nytt etter at deformasjonene hadde gått fra seg.
- Forsøkstunnel i Canada
  - ✓Full utstøping ved høye spenninger ga knusning av betongen og kollaps.

Skærbrudd i Sfr + Armert bue 95 cm tykk + bolter c/c <1 m. Skvising i Lærdalstunnelen

Støping på stuff er farlig, kostbart og tidkrevende

STØPING PÅ STUFF ER HISTORIE

- Støping på stuff uten å sprøyte først ble forlatt da fiberarmert sprøytebetong kom på markedet i begynnelsen av 1980-tallet
- Med alkalifri akselerator kunne det legges på meget tykke lag i en operasjon og sprøytes armerte buer (Fra ca. 1996)
- Støping på stuff ble gradvis forlatt som drivemetode for 25 år siden
- I meget dårlig bergmasse raste det alltid på støpeskjoldet, som ble fylt opp med rasmasser
- Dette førte til meget dårlig støp som måtte pigges og repareres
- Støping på stuff er kun aktuelt der hvor det har gått ras, og stuffen (tunnelen) må støpes igjen
- I svake bergarter og i løsmasser brukes det alltid sprøytebetong +RRS som arbeidssikring kombinert med forbolting/jetpeling også der ustøping er permanent sikring

Hvordan kontrollere bergmassen <u>før</u> sprengning?

- Kartlegge og dokumentere bergmassekvaliteten
  - ✓MWD, geofysikk, kjerneboring, sonderboring
- Variere salvelenge med bergmassekvalitet
- Eventuelt ta delsnitt-salver, som sikres trinnvis
- Bruk av forbolting (c/c 20-50 cm) med støtte i bakkant
- Eventuelt forinjeksjon
- Sprøyting og bolting av selve stuffen
  - ✓Ved for eksempel skvising, sterk svelling, total knusning og kraftig bergslag

Hvordan kontrollere bergmassen <u>etter</u> sprengning?

- Rensk før sprøyting dersom det er tilrådelig
- Avpasse rensken etter forholdene for å unngå ujevnt profil før sikring dersom det skal sprøytes bue
- Sprøyte 12-25 cm fiberarmert og evt. stuffen før bolting og setting av armering for buer
- Installasjon av lastcelle i noen utvalgte tilfeller for å ytterligere dokumentere hvilke laster som opptrer

Hvordan kontrollere bergmassen etter sikring?

- Målinger
  - ✓Konvergensmålinger
  - ✓Ekstensiometermålinger
  - ✓Fiberoptiske kabler
  - ✓Lasermålinger
- Tiltak dersom fortsatt konvergens
  - ✓Sålestøp
  - ✓Sprøyting av flere buer (red. avstand)
  - ✓Forsterke eksisterende buer
  - ✓Sette lange, forspente bolter gjennom støp
  - ✓Rive støp og armere ny støp+ lange bolter

Sprøytede, armerte buer ved Nationaltheateret Stasjon. 22 m spennvidde, 80cm tykke, c/c 2 m. Som permanent sikring. Min. 3 m fjell + 15 m løsmasser under Arbiens gt. Ville ikke ha bli bygget etter HB 21

Skille mellom ulike bruksområder med ulike behov for uavbrutt funksjon over lang tid.

- Full utstøping med membran gir trolig mindre behov for ettersyn, og kan være mer aktuelt i for eksempel høytraffiktunneler
- Full utstøping gir langt større kostnader enn bruk av armerte buer
- Støp, evt. med armering som ettersikring/permanent sikring vurderes ut fra trafikkmengde/økonomi og levetid.