

Markstötståg och utformning av passivt skydd

Leo Laine
ANKER - ZEMER Engineering AS

24 juli, 2002

1 Inledning

I Sverige finns existerande Radningscentraler (RC) och skyddsrum. De ska skydda människor och utrustning mot konventionella vapenlaster.

RC används till ledning av radningstjansten under höjd beredskap och i krig. Dessa byggs alltid i samband med brandstationer. Detta ger RC en meningsfull användning under fred. Radningscentralerna konstrueras som en- eller tvåvåningsbyggnader, där bottenvåningen ar i regel belägen under marknivå. Byggnadsstommen består huvudsakligen av armerad betong, där vaggtjocklekar ofta utförs tjockare än i normala bostadshus. Normal väggtjocklek hos en RC brukar vara 300 till 800 millimeter. En RC ar av kostnadsskäl inte utförd fulltraffsaker. De är dimensionerade för konventionella vapenlaster som detonerar på ett visst avstånd från strukturen.

Skydd av installationer och nyckelpersoner mot vibrationer och accelerationer är mycket viktigt för att radningscentralen skall kunna upprätthålla sin ledningsfunktion vid och efter den här typen av laster.

Luft- och markstotsvagor samt splitter är vanligt förekommande vapenlaster. Dessa laster introducerar stötvågor in i den skyddande byggnadsstommen.

Här diskuteras markstotvagor i lösa jordarter som genereras från en sprängladdning. Faktorer som påverkar markstotvagens styrka ar sprangladdningens massa och typ av spranggamne, laddningsavstandet från byggnaden, och på vilket djup under markytan laddningen befinner sig vid detonation. Om laddningen är fullt nergrävd i

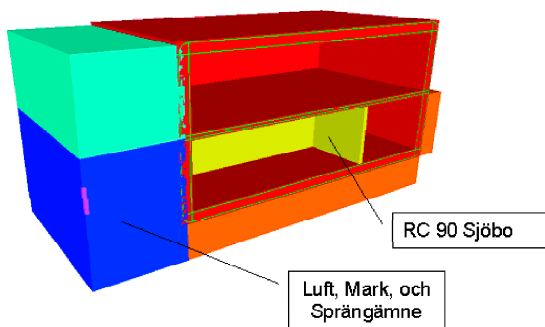
marken kommer den största delen av den frigjorda energin från detonationen överföras till marken och därmed uppnås en maximal markstotvag. Det typiska hotet som har studerats ar 110 till 125 kg trotyl med laddningsavstandet varierat mellan 3 till 5 meter och laddningsdjupet 1,5 meter under markytan.

En annan faktor som påverkar ar vad det är för jord och fyllnadsmaterial kring byggnaden. Om den omkringliggande jorden är fullt vattenmättad och har hög in situ densitet så transporteras markstotvagen längre och utan några större energiförluster. Här har jordarter från torr sand till fullt vattenmättad lera studerats. I lösa jordarter sprids huvudsakligen en tryckvåg och en skjuv vag, dessa sprids sfäriskt och avtar därmed med potensen på $radien^3$, det vill säga den störda sfärens ökade volym. Tryckvagen ar dominerande.

2 Datorsimulering av markstotvagor

Med hjälp av explicita finita elementlosare ar det möjligt att simulera hela förloppet från detonation av sprängladdning, hur markstotvagen genereras och propagerar genom den lösa jorden samt hur kratern i jorden bildas till hur byggnadsstommen rör sig som funktion av tid och rum. En tredimensionell parametriserad modell av en tvåvånings RC med omkringliggande jord, luft och laddning har byggts upp för att kunna simulera olika hot med hänsyn till luft- och markstotvag. Detaljerad beskrivning av modellen och beräkningsresultat återfinns i [10],[7], [8], och [6]. Den numeriska lösare

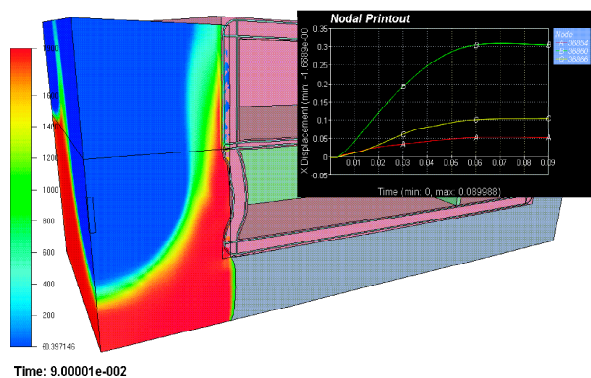
som har använts för 3D modellen är LS-DYNATM [5]. I Figur 1 visas en vy av modellen.



Figur 1: Vy av simuleringsmodell

Resultaten från simuleringarna, dvs rörelser, hastigheter och accelerationer hos RC:ns väggar, golv och tak har vidare analyserats för att studera skaktåligheten hos komponenterna inuti en RC, se vidare i [2]. Från 3D modellen kan resultat tas ut från valfri punkt och riktning, samt att även skador på byggnadsstomme kan studeras.

I Figur 2 visas kraterbildningen och strukturrensen från en av beräkningarna.



Figur 2: Kraterform vid 90 millisekunder och utböjning hos källarvägg för vattenmättad lera, laddningsvikt 110 kg Trotyl, laddningsavstånd 3,5 meter, och laddningsdjup 1,5 meter. Maxutböjning hos källarvägg > 0,3 meter.

3 Materialprovning, en viktig del vid simulering

Materialprovning är en viktig del av arbetet för att kunna bygga upp tillförlitliga simuleringsmodeller. Inom projektet markstötväg har utförlig materialprovning på torr porös sand utförts. Där utfördes triaxiell provning på cylinderprovkroppar av sand. Från provningen kunde sandens porösa tillståndsekvation (Equation Of State, (EOS)) tas fram. Skjuvprover utfördes för att ta fram sandens tryckhårdnande flytyta. Vid provningen mättes också de elastiska longitudinal- och skjuvvågorna hos sanden vid olika spännings- och densitetstillstånd. Från dessa data kunde kompressionsmodul och skjuvmodul bestämmas för flera olika tillstånd.

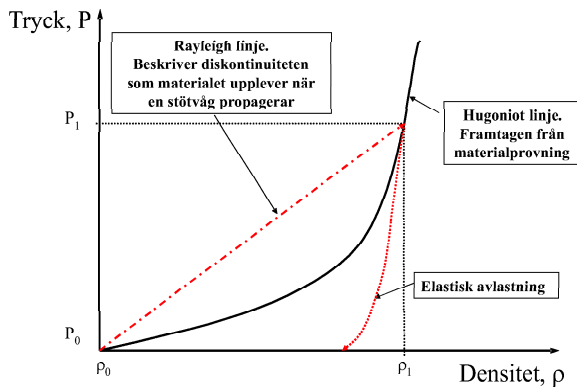
En torr sand packas ihop vid isotropiskt tryck, därmed absorberas volymetrisk energi av materialet. När sedan sanden avlastas kommer den inte expandera till ursprunglig volym, om detta jämförs med motsatsen, en elastisk fjäder, så lagras bara energin vid ihoptryckning och vid avlastning frigörs den lagrade energin. Att volymetrisk energi absorberas av jordmaterialet är en positiv egenskap och leder till att en markstötväg som propagerar i en torr porös jord har stora energiförluster på grund av detta.

Tillståndsekvationen är viktig för att korrekt kunna beskriva stötvågens fronthastighet (U_s), tryck (P) och partikelhastighet (U_p). När en stötväg passerar i ett material propagerar det en diskontinuitet när det gäller tryck, densitet, och energi i materialet. Man kan säga att materialet 'hoppar' mellan dessa tillstånd vid stötvågsfronten. Detta illustreras av Rayleighlinjen, se Figur 3 där Rayleighlinjens lutning är proportionell mot kvadraten på stötvågens fronthastighet. Fronthastigheten kan beräknas ur ekvation 1.

$$U_s^2 = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{P - P_0}{\rho - \rho_0} \quad (1)$$

Skjuvhållfastheten spelar en viktig roll för hur skjuvvågen propagerar i materialet samt hur stor kraterstorleken blir vid den här typen av belastning.

Tillvägagångssätt och resultat från materialprovningen är beskrivet i Norges Geotekniska Institutts rapport [3]. Framtagna mekaniska materialegenskaper hos sanden för att användas i explicita



Figur 3: Schematisk figur av tillståndsekvation, EOS, för ett poröst material.

lösare är beskrivna i [11] och [7].

Liknande provning utfördes också för materialet 'Light Expanded Clay Aggregates' (LECA) med aggregatstorlek på 10 till 20 millimeter. Detta material är mycket poröst och har en mycket lägre densitet än jord. Beskrivning av materialprovningen och framtagna mekaniska materialegenskaper återfinns i [4] och [10]. Detta material har föreslagits att användas som passivt skydd mot markstötvågor.

4 Utformning av passivt skydd

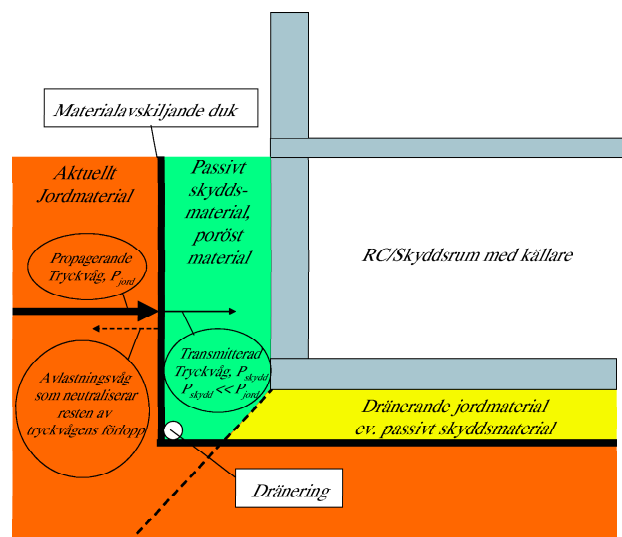
Ett skikt av poröst material såsom LECA framför byggnaden är fördelaktigt för att användas som skydd emot en propagerande markstötvåg och därmed minimera skador och rörelser hos den skyddade byggnadsstommen.

Det finns tre huvudsakliga orsaker varför LECA kan fungera som ett bra passivt skyddsmaterial mot den här typen av laster:

- Den första är hur spänningsvågorna transmittas och reflekteras mellan två olika material. När en markstötvåg, som huvudsakligen är en tryckvåg ($P_{jord}(t)$), når fram till det passiva skyddsskiktet bildas en transmitterad våg ($P_{skydd}(t)$) som går in i LECA'n och en avlastningsvåg det vill säga en dragvåg som går tillbaka in i jordlagret. Dessa vågor bildas på grund av att det är stor skillnad på densitet (ρ) och ljudvågshastighet (C) hos materialen.

LECA:n har mycket lägre impedans ($\rho \cdot C$) och därmed kommer den transmitterade tryckvågen ha mycket lägre amplitud. Dessutom rusar en avlastningsvåg tillbaka in i jordlagret och helt enkelt 'nollar ut' resterande tryckförlopp som annars hade fortsatt mot byggnadsstommen.

- Den andra är att den del av tryckvågen som har lyckats transmittas in i LECA:n kommer ha stora energiförluster när den propagerar genom LECA-skiktet. Kulorna som LECA:n består av packas ihop och dessutom krossas de redan vid små trycknivåer.
- Den tredje är när jordmassorna pressas mot byggnaden, på grund av kraterbildningen. Då kommer en del av denna last också kunna tas upp av det deformerbare passiva skyddet. Detta genom att det passiva skyddsskiktet deformeras uppåt och därmed minimeras skadan på byggnadsstommen.

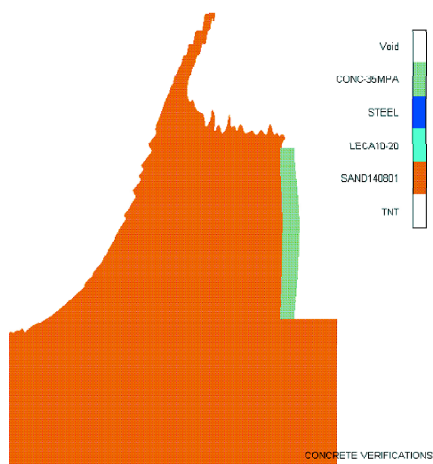


Figur 4: Skiss över hur det passiva skyddet kan utformas för en RC/skyddsrum med källarvåning.

I [9] studerades vilken tjocklek på det passiva skyddet som krävs för att speciellt impulstätheten (integralen av tryckkurvan) skulle bli så minimal som möjligt. Beräkningarna visade att för aktuell belastning (125 kg TNT, laddningsavstånd 5

meter, och laddningsdjup 1,5 meter) räcker cirka 1,25 meters skyddsskikt oavsett jordtyp.

För att få en idé hur stor sänkning i strukturspons det passiva skyddet kan erbjuda för samma belastning som tidigare utfördes tvådimensionella axi-symmetriska (2D -axi) beräkningar med hjälp av AUTODYNTM [1]. Jordmaterialet var torr sand. Den armerade betongväggens tjocklek varierades mellan 250 och 500 millimeter. I Figur 5 visas materiallokalisering vid tiden 100 millisekunder för fallet utan passivt skydd. Källarväggens ändrar var fast inspända.



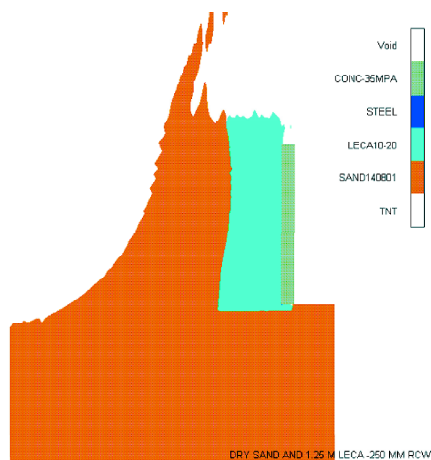
Figur 5: Resultat från 2D -axi beräkningar utan passivt skydd. Max mittutböjning 62 millimeter.

I Figur 6 visas materiallokalisering från beräkningar med passivt skydd. Lagg märke till hur skyddslagret har deformerats uppåt när jordmassorna från kraterbildningen kommer.

Beräkningarna visade att den maximala mittutböjningen hos 250-millimetersväggen minskade med cirka 96 procent och maxhastigheten med cirka 79 procent. För 500-millimetersväggen var det ännu större minskning när med och utan passivt skydd jämfördes. För mera utförlig beskrivning av beräkningsmodellen och resultat se vidare i [10].

5 Slutsatser och kommentarer

Avancerade beräkningsmodeller ger möjlighet att studera belastningar såsom markstötväg, från hur



Figur 6: Resultat från 2D -axi beräkningar med passivt skydd. Max mittutböjning 2,4 millimeter.

de bildas till hur byggnadsstommen reagerar vid aktuellt hot. Vid den här typen av simuleringar är framtagning av materialdata för de olika materialen en viktig del av arbetet. Här har utförlig materialprovning utförts på sand och LECA för att ha relevanta data till simulering. En annan aspekt är att den här typen av simuleringar bör verifieras med enklare handberäkningsmetoder såsom empiriska formler samt mot experiment. Om endast experiment utfördes vore detta mycket kostsamt. Beräkningsmodeller lämpar sig väldigt bra för parameterstudier, det vill säga geometri hos byggnadsstommen, placering av laddning och dess storlek kan lätt ändras och se hur detta påverkar resultaten.

Att skydda byggnader med källarvåning mot markstötväg med hjälp av porösa material är mycket gynnsamt. Det är i huvudsak tre faktorer som spelar roll:

- På grund av stor skillnad i impedans hos den omkringliggande jorden och den porösa LECA:n kan inte markstötvägen propagera utan att en avlastningsväg bildas när den når fram till LECA-skiktet som förstör uppbyggnad av resterande tryckförlopp. Dessutom har den transmitterade tryckvägen som passerar in i det passiva skyddet mycket lägre amplitud.
- Den del av markstötvägen som passerar in i LECA'n absorberas till stor del genom att ku-

lorna packas och krossas, redan vid låga trycknivåer påbörjas energiabsorptionen.

- Slutligen kommer kraterbildningen skapa att jordlasten på byggnadsstommen men dessa kan tas upp av det passiva skyddet genom att hela skyddslagret deformeras uppåt och därmed tar upp även en del av denna energi.

Det föreslagna passiva skyddet kan enkelt appliceras även på befintliga byggnader. Speciellt intressant för byggnader där fyllnadsmaterial med mindre gynnsamma egenskaper har använts, det vill säga vattenmättade jordarter med hög densitet. Om så är fallet för en specifik byggnad kan konstateras med ett par enkla jordprov där in situ densitet och vattenmättnadsgrad tas fram. Detta bör göras på medeldjupet av källarväggen, till exempel 1,5 meter under markytan och på några olika avstånd från byggnaden till exempel 1, 3, 5 och 10 meter. Därefter kan man avgöra om det aktuella fyllnadsmaterialet är mindre gynnsamt vid markstöt vågor och därmed behöver utökas med ett passivt skyddskikt närmast källarväggen.

Detta är en förhållandevis enkel metod att höja den aktuella skyddsnivån mot markstöt vågor hos en byggnad med källarvåning som behöver skydda personer och utrustning mot den här typen av belastningsfall.

Referenser

- [1] *AUTODYN Theory Manual Revision 4.0*. Century Dynamics Inc., San Ramon, CA, USA, 1998.
- [2] R. Forsén and P. O. Sandberg. *Skaktålighet hos komponenter i skyddade anläggningar vid påverkan av markstöt vågor från konventionella vapen*. Räddningsverket, Karlstad, Sverige, januari 2002. B54-217/02.
- [3] Heyerdahl H. and Madshus C. *EOS-data for sand, Triaxial tests on sand from Sjöbo*. Norges Geotekniske institutt, Oslo, Norge, augusti 2000. 20001157-1.
- [4] Heyerdahl H. and Madshus C. *EOS-data for LECA, Triaxial tests on LECA under high pressures*. Norges Geotekniske institutt, Oslo, Norge, november 2001. 2001157-2.
- [5] J. Hallquist. *LS-DYNA THEORETICAL MANUAL*. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, CA, USA, 2000.
- [6] L. Laine. *Räddningscentral (RC 90) utsatt för explosionslast vid markytan, etapp II, Fluid / struktur koppling med FE-programmet ANSYS/LS-DYNA*. Räddningsverket, Karlstad, Sverige, oktober 2000. B54-219/02.
- [7] L. Laine. *Räddningscentral (RC 90) utsatt för explosionslast vid markytan, Sjöbo sand*. Räddningsverket, Karlstad, Sverige, november 2000. B54-221/02.
- [8] L. Laine. *Räddningscentral (RC 90) utsatt för explosionslast vid markytan, White Sand*. Räddningsverket, B54-220/02, Karlstad, Sverige, januari 2000. B54-220/02.
- [9] L. Laine. Numerical simulations of ground shock attenuation layers for swedish rescue centres and shelters. *4th Asian-Pacific conference on Shock and Impact Loads on Structures*, 4:361–368, november 2001.
- [10] L. Laine. *Datorsimulering av markstöt våg i lösa jordarter, samt utformning av passivt skydd mot markstöt vågor*. Räddningsverket, Karlstad, Sverige, januari 2002. B54-222/02.
- [11] L. Laine and A. Sandvik. Derivation of mechanical properties for sand. *4th Asian-Pacific conference on Shock and Impact Loads on Structures*, 4:353–360, november 2001.