

DOV lezingenavond 7 februari 2018, 18.30 – 20.30 uur

Boerderij De Middenhof, Duetlaan 1-3, 3438 TA NIEUWEGEIN

www.demiddenhof.nl

Bepaling onderhoudsintervallen stalen brug met orthotroop rijdek

Sjoerd Hengeveld (TNO)

Veel stalen bruggen uit de jaren 70 zijn bruggen met een orthotroop rijdek. Doordat de verkeersbelasting in de loop der jaren is veranderd, wordt het steeds belangrijker om inzicht te krijgen in de vermoeiingsterkte van deze bruggen.

Een orthotrope brug bestaat uit een aantal langsdragers, dwarsdraggers, troggen en een dek. Voor het bepalen van de vermoeiingsterkte is een aantal kritische locaties aangewezen die zich bevinden bij de verbinding tussen het trogbeen en de dekplaat. De vermoeiingsterkte is onder andere een functie van de spanningen op deze locaties en daarom is er een eindige elementen model ontwikkeld om hier inzicht in te krijgen.

Binnen het gehele areaal aan stalen bruggen zijn er verschillen in het aantal langsdragers, dwarsdraggers en troggen en daarom is er binnen het project voor gekozen om een parametrisch model te maken. Door middel van de python-DIANA interface is het genereren van verschillende soorten geometrieën geautomatiseerd. Dit betekent dat de complete geometrie, gemodelleerd met kwadratische schaal elementen, automatisch wordt gegenereerd en de verschillende constructieonderdelen op de juiste locatie worden gezet.

De verkeersbelasting is gemodelleerd door een oppervlakte belasting te verplaatsen over het rijdek. Door middel van verschillende loadcases is het globale en het lokale effect op de constructie beschouwd. Vanuit de invloedslijnen die hieruit volgen, kunnen kritische locaties bepaald worden, waarna er inzicht is verkregen in de vermoeiingsterkte van de brug.

Door de grote hoeveelheid data is ervoor gekozen om zo veel mogelijk te automatiseren in zowel het pre- als het postprocessen.

Geomechanical modelling to minimize the risk of induced seismicity during underground gas storage operations in a depleted gas field in the Netherlands

B. Orlic, B.B.T. Wassing (TNO, Applied Geosciences)

A geomechanical modeling study was conducted to investigate stability of major geological faults during past gas production and future underground gas storage operations in a depleted gas field in the Netherlands. The field experienced induced seismicity during gas production, which was most likely caused by the reactivation of an internal Central fault separating the two reservoir blocks. A 3D field scale finite element geomechanical model of the gas field was developed using DIANA. The model was calibrated to match the subsidence data and the approximate location of the critically stressed, reactivated part of the fault in agreement with the seismological localization of the hypocenters of the past major seismic events. The model predicted a maximum shear slip of up to 2 cm associated with gas production. Additional, but a smaller, fault slip of up to 0.5 cm could be expected during the subsequent phase of cushion gas injection. During annual cycles of gas injection and production, the Central fault is not critically stressed and the predicted stress changes lie in the elastic region. Although the fault slip is unlikely, continuous monitoring of induced seismicity is essential.

Crack pattern observations to finite element simulation, an exploratory study for detailed assessment of existing reinforced concrete structures

Saurabh Dhanmeher

Uncertainties regarding structural safety of reinforced concrete structures may warrant a need for a detailed assessment. A detailed assessment using nonlinear finite element analysis is one of the alternatives which could help in decision-making about maintaining, upgrading or even demolishing and rebuilding of the structure. A reliable assessment should account for the existing damage in the structure, which may cause re-distribution of stresses within the structure, giving rise to unexpected failure modes. The existing approaches in nonlinear finite element analysis which account for the effect of already undergone damage in concrete, pose a number of limitations which either makes structural analysis ambitious or the uncertainty of concrete damage is not effectively accounted for. An alternative approach is adopted in this thesis, which is phenomenological and probabilistic in nature. Existing damage in concrete is conceived as a statistical field, which can be input into a finite element model, such that the existence of damage is taken as the starting point of the structural analysis. Focusing on indications of damage on the surface of concrete, i.e. crack patterns, an exploratory methodology based on image analysis is developed, to account for information obtained from crack pattern observation into nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures. The methodology is implemented on MATLAB and validated on damaged experimental specimens. Results of the computational analyses indicate good efficiency in predicting residual load carrying capacities and failure modes, alongside insightful numerical crack patterns. Through a critical examination of the obtained results and reflection upon the assumptions and simplification made in the methodology, recommendations for future research are provided.

The spalling mechanism of fire exposed concrete

Bas Lottman (Witteveen en Bos)

Samenvatting proefschrift

Dit proefschrift heeft als onderwerp de na een ernstige brand waargenomen schade aan een betonelement of betonconstructie. Vooral de mogelijkheid tot het optreden van (explosief) spatten, als beschreven voor grootschalige branden in de tunnels gedurende de afgelopen decennia (CTSA, 1997; BEA-TT & RAIB, 2010), is in detail besproken. Spatten van beton kenmerkt zich door het afbreken van lagen aan het verhitte betonoppervlak, waar de term "explosief" duidt op het soms plotselinge en heftige karakter van het waargenomen fenomeen (Khoury & Anderberg, 2000). Algemeen gesteld zijn er twee hoofdtheorieën die het spatten verklaren, waarbij de eerste zich richt op het ontstaan van de poriëndrukken (Harmanthy, 1965) terwijl de tweede uitgaat van de thermische spanningen die ontstaan ten gevolge van de temperatuurgradiënt (Dougill, 1972). Op dit moment is de relatie tussen deze fysische en mechanische processen onvoldoende bekend. Bovendien, experimenteel onderzoek (RILEM TC-HTC, 2004) en recentelijke numerieke analyses (Tenchev, et al., 2001; Gawin, et al., 2003) waren voornamelijk gericht op het gedrag van beton bij verhoogde temperaturen. Het daadwerkelijke spatten wordt op dit moment alleen onderzocht door het doen van brandproeven op betonelementen (Dehn, et al., 2010). Echter, deze bleken onvoldoende te zijn om het mechanisme te identificeren.

In dit proefschrift is een conceptueel, op eindige elementen gebaseerd, spatmodel afgeleid dat gebruik maakt van een gekoppelde benadering tussen de poriëndruk en de breukmechanica. Voor een eenzijdig door brand belast betonelement wordt een verband gelegd tussen de lokale poriëndrukken, het globale constructieve gedrag en de ontwikkeling van het scheurpatroon. Om een theoretische basis te leggen zijn eerst de fysische en mechanische hoofdprocessen inzichtelijk gemaakt door afleiding van verschillende eenvoudige modellen. Door middel van de definitie van een gesloten systeem (Hettema, 1996) is de fysische relatie tussen temperatuur en poriëndruk ontwikkeling verduidelijkt. Een vergelijkbare benadering staat toe om de reductie van de gasdruk te kwantificeren, gebaseerd op de plotselinge toename van het volume gedurende de scheuropening. Ten behoeve van de mechanica is eerst het statische evenwicht van krachten gebaseerd op een temperatuurgradiënt (van Breugel, et al., 1998; Hartsuiker & Welleman, 2007). Hiermee

worden de drukspanningen in de opgewarmde oppervlaktelaag en de trekbelasting in het midden van de doorsnede bepaald. De thermische uitzetting van het toeslagmateriaal wordt daarbij bevestigd als een belangrijke materiaal parameter (Eurocode 2, 2011b). Ook van belang zijn de doorsnede dimensies als mede de constructieve verhindering en belasting. Onder deze omstandigheden treedt een verzwakking van het beton op bij temperaturen hoger dan 500 oC (Dmitriyev, et al., 1969/1972). Daarna is een op de continuïteit gebaseerde benadering gebruikt voor de definitie van de partiële differentiaalvergelijkingen die de fysische processen beschrijven. De ontwikkeling van de temperatuur en de poriëndruk zijn gekenmerkt door de conservering in een representatief elementair volume van de thermische energie en de massa's van de water fasen respectievelijk (Bear, 1972/1988; Hassanizadeh & Gray, 1979b). Dit laatste gaat uit van een instantane ontwikkeling van een thermodynamisch evenwicht tussen de gas- en de vloeistof fasen (Tenchev, et al., 2001; Gawin, et al., 2003) als gedefinieerd door een desorptie isotherm (Pel & Huinink, 2007). Neumann randvoorwaarden beschrijven de interactie met de omliggende omgeving (Tenchev, et al., 2001; Gawin, et al., 2003). Verscheidene typerende en tijdsafhankelijke oplossingen worden bepaald met behulp van de eindige differentie methode. Deze resultaten illustreren het geforceerde drogen bij een constante temperatuur. Het mechanische continuüm is algemeen bekend in de civiele techniek en derhalve alleen kort samengevat, beginnend met de balans van het lineaire moment (Spencer, 1980/2004; Wells, 2006). Deze translatie evenwichtsvergelijking is uitgebreid met de aanname van lineaire elasticiteit en het opleggen van de temperatuurrek als initiële verlenging (Timoshenko & Goodier, 1970). Zowel de aanname van een toestand met vlakke spanningen als vlakke rekken (Timoshenko & Goodier, 1970) worden besproken, waar het laatste wordt geacht van toepassing te zijn voor het constructieve element. Dit continuüm is daarna opnieuw gedefinieerd in polaire coördinaten om een simpele relatie tussen de druk in een porie en de spanningstoestand in het omringende materiaal te illustreren (Timoshenko & Goodier, 1970). In het vervolg van dit proefschrift zijn beide continuüm-gebaseerde theorieën aangevuld om het spatmodel te vormen. Ten eerste is de temperatuur en de poriëndruk als deel van het spatmodel afgeleid. Beide conserveringsvergelijkingen zijn gekoppeld door de consumptie van thermische energie ten behoeve van de verdamping. Vervolgens wordt door minimalisatie van energie de zwakke vorm van dit systeem verkregen (van Kan, et al., 2008; Zienkiewicz, et al., 2005). Door Galerkin's methode ligt de eindige elementen definitie vast (van Kan, et al., 2008; Zienkiewicz, et al., 2005), met als aanname dat het poreuze materiaal zich kenmerkt als isotroop en homogeen. Voorts maakt de tijdsintegratie gebruik van een impliciete Euler achterwaartse methode (van Kan, et al., 2008) met de variabelen, temperatuur en capillaire druk, vastgelegd met een incrementele definitie. Neumann en periodieke randvoorwaarden worden gedefinieerd, waarbij de laatste zijn opgelegd langs de boven- en onderkant om een continu materiaal te verkrijgen (Segal, 2008). Ruimtelijke integratie maakt gebruik van willekeurig georiënteerde 2D driehoekige elementen met een lineaire basis (Felippa, 2004a). Voor de berekening van de verschillende brandscenario's is eerst het eindige elementen model gevalideerd. Een goede overeenkomst is gevonden bij vergelijking van de afzonderlijk bepaalde temperatuur- en capillaire drukverdelingen met resultaten verkregen door middel van de eindige differentie methode. Daarna is de invloed van de betonsterkteklasse, het type brandbelasting en de omgevingsomstandigheden onderzocht. De hoogste gasdrukken, die een waarde bereiken van ongeveer 4.0 MPa, zijn gevonden voor beton C90/105 blootgesteld aan een koolwaterstofbrand. Bewijs van de vaak genoemde verstopping door vochtophoping (Harmanthy, 1965; Zeiml, et al., 2006) is alleen gevonden voor voornamelijk normale sterkte beton, zoals C25/30, initieel onderworpen aan een binnenklimaat. Dezelfde omstandigheden geven ook een kleine toename aan in de verzadigingsgraad aan de voorzijde van de poriëndruk golf in C90/105. De laatste belangrijke observatie is dat in een open systeem de hoogste gasdrukken worden bereikt bij een minimale verzadigingsgraad tussen 0.2 en 0.4. Het temperatuur- en gasdrukmodel is vervolgens uitgebreid om een anisotroop en heterogeen materiaal te verkrijgen. Zowel dichte- als poreuze materiaal schematiseringen zijn gedefinieerd waarbij de eerste het toeslagmateriaal beschrijft. De stenen zijn benaderend als ondoorlatend geschematiseerd, hetgeen eigenlijk materiaal discontinuïteiten introduceert aan de randen van de korrels. Het poreuze materiaal, dat de mortel en het grensvlak met het toeslagmateriaal beschrijft, wordt gekenmerkt door het proces van geforceerd drogen en blijft isotroop totdat zich een scheur ontwikkelt. Daarna wordt de stroming door de scheuren beschreven door middel van een substantiële toename van de permeabiliteit die is gerelateerd aan de opening en de richting (Bear, 1972/1988). Beide dienen te worden bepaald door breukmechanica gekoppeld aan de fysische parameters. Dit leidt tot materiaal discontinuïteiten in de beschrijving, welke de numerieke

stabiliteit beïnvloeden. Variërende tijdstappen (Söderlind & Wang, 2006) en het invoegen van een vermindering van het anisotropische niveau langs de scheuren zijn gebruikt om de snelheid van de convergentie te verhogen. Boven de kritische temperatuur van water zorgt een verdere stabilisatie ervoor dat het droogproces continueert.

Beide aspecten zijn onderzocht door het blootstellen van een heterogene betondoorsnede aan verschillende brandscenario's. De invloed van het toevoegen van het toeslagmateriaal is beperkt en is alleen waargenomen bij een betonsterkteklasse C90/105 en voor de grootste korreldiameters. Onder deze omstandigheden wordt de gasdruk geschat toe te nemen aan de tegenoverliggende zijde van het brand belaste oppervlak. Echter, het meenemen van een initieel scheurpatroon met een constante opening beïnvloedt het geforceerde droogproces. De verkregen resultaten geven aan dat naast de transportmogelijkheden van de scheuren ook de permeabiliteit van het omliggende materiaal de mate van invloed bepaald. De simulaties voor C90/105 laten zien dat de dichtere microstructuur hogere beperkingen oplegt aan de stroming van de water fasen naar de scheuren. Het tweede gedeelte van het spatmodel richt zich op het mechanische gedrag van op brand belast beton. Eerst is voor het mechanische continuüm, door middel van energie minimalisatie, de zwakke vorm van de partiële differentiaalvergelijking bepaald (van Kan, et al., 2008; Zienkiewicz, et al., 2005). De eindige elementen definitie is verkregen door middel van Galerkin's methode (van Kan, et al., 2008; Zienkiewicz, et al., 2005), waarbij het materiaal initieel als isotroop en homogeen is gedacht. Het constructieve gedrag is benaderd door een vlakke rek toestand (Timoshenko & Goodier, 1970) met starre lichamen (Hartmann & Katz, 2007) gedefinieerd langs de boven- en onderkant om Bernoulli's hypothese (Hartsuijker & Welleman, 2007) op te leggen. Dit laatste introduceert geometrische niet lineariteiten hetgeen vergt dat de variabelen, horizontale en verticale verplaatsingen, in incrementele vorm moeten worden gedefinieerd. Dirichlet en Neumann randvoorwaarden beschrijven de centraal geplaatste oplettingen, beiden gebaseerd op een vaste horizontale verplaatsing en constructieve interactie door veren en krachten (Bouma, 2000). Ruimtelijke integratie is verkregen door vergelijkbare 2D driehoekige elementen toe te passen.

De eindige elementen discretisatie is gevalideerd door vergelijking van de spanningen in de doorsnede en de verplaatsingen van de bovenste opletting met de op het statisch evenwicht gebaseerde resultaten. Een afdoende benadering is gevonden bij inachtneming van een toestand van vlakke spanningen. Op basis van de aanname van een toestand met vlakke rekken zijn de gevonden spanningen ongeveer 20 procent hoger. De incrementele definitie van de variabelen is ook gevalideerd, waarbij naast de bijkomende temperatuurrekken ook de herverdeling van de op stijfheid veranderingen gebaseerde spanningen worden beschouwd. Verschillende numerieke resultaten geven de invloed van de hoofdparameters weer met speciale aandacht voor de opgelegde starre lichamen. Voor C25/30 kan de uiterste drukspanning variëren tussen 60 en 100 MPa, bepaald door de materiaal eigenschappen, geometrie, brandcurve en constructieve omstandigheden.

Het breukmechanica model heeft een andere basis en discretiseert een deel van het constructieve element door een anisotroop en heterogeen materiaal. Drie driehoekig georiënteerde 1D staven benaderen samen de globale rekken (Prezemieniecki, 1968/1985; Blaauwendraad, 2004; Felippa, 2004a) waarbij hun doorsneden worden gedefinieerd door de interne hoogte. Een lineair elastische materiaal definitie, met in acht neming van zowel de temperatuurrekken als de door druk geïnitieerde spanningen, is gecombineerd met de constructieve randvoorwaarden. Deze 1D staven worden ook beschouwd als geometrisch niet-lineair, waardoor de incrementele vervormingen de statische evenwichtsvergelijkingen beïnvloeden (Bathe, 1986; Gavin, 2014). Bij de breukmechanica benadering wordt vervolgens aangenomen dat de initiatie en ontwikkeling van de scheuren ontstaat door het bros breken van de 1D staven (Schlangen, 1993; Vervuurt, 1997). Echter, gevonden werd dat voor herverdeling van de incrementele breukkrachten aanvullende gebogen vervormingen dienen te zijn inbegrepen, opgelegd door de definitie van 1D Bernoulli-Euler liggers, hetgeen leidt tot een traditioneel staafmodel (Schlangen, 1993; Vervuurt, 1997). Bij validatie van het anisotrope eindige elementen model is een voldoende accurate benadering voor verschillende basis belastingsgevallen door middel van de 1D staven gevonden. Ten aanzien van het introduceren van de 1D liggers is waargenomen dat een verstijvend effect kan ontstaan in de mechanische respons in het geval dat te veel buigstijfheid is toegevoegd. Daarna is het breukmechanica gedrag uiteengezet door eerst alleen de temperatuurrekken als interne belasting te beschouwen. Onder deze omstandigheden werd gevonden dat het niveau van de constructieve verandering uitermate belangrijk is. Zonder verandering ervaart de

heterogene doorsnede, vooral ten tijde van een koolwaterstof brandbelasting, heftige scheurvorming. Het niveau van de scheuren en vooral de scheuropening is voldoende om de thermische spanningen daarbij te relaxeren. Echter, toevoeging van constructieve partiële verandering verandert het breukgedrag en thermische instabiliteiten ontstaan aan het betonoppervlak. Gelokaliseerde gebogen vervormingen ontstaan hetgeen gebaseerd is op de drukspanningen die aanwezig blijven in de opgewarmde oppervlaktelaag. Geanalyseerd wordt de invloed van de betonsterkteklasse, het type brandbelasting en de mogelijkheid tot externe drukbelasting. Het is gevonden dat deze het scheurpatroon in de aan brand bloot gestelde doorsnede als ook de vorm van de aan het oppervlak gesitueerde instabiliteiten bepalen. Deze resultaten zijn derhalve van significante waarde voor het numeriek analyseren van het spatmechanisme. Uitbreiding van de koppeling tussen beide modellen om de door druk geïnitieerde spanningen toe te voegen onthult ook de invloed van de scheuren op het proces van geforceerd drogen. Het niveau van de scheurvorming in de opgewarmde oppervlaktelaag is voldoende om er voor te zorgen dat zich slechts beperkte gasdrukken ontwikkelen. Alleen in beton met als sterkteklasse C90/105 zijn verschillende drukpieken aanwezig, maar hun bijdrage aan de lokale spanningen kan worden beschouwd als gering. Ook is gevonden dat het geforceerde droogproces zich uitbreidt door de scheuren de doorsnede in. Dit wordt toegeschreven aan de capillaire drukgradiënt, welke het vloeibare water naar buiten drijft hetgeen de temperatuur toename beïnvloedt door de zich continuerende verdamping. Vooral in de dichte microstructuur van een beton C90/105 ontstaan scherpe overgangen tussen de droge scheuren en het omringende nog steeds gedeeltelijk verzadigde materiaal.

Het laatste deel van dit proefschrift bestaat uit een filosofie omtrent het door brand geïnitieerde spatten, waarbij op basis van de gepresenteerde numerieke resultaten de mogelijkheid tot een thermisch knikmechanisme (Timoshenko & Gere, 1961/2009) is geanalyseerd. Samendrukking van de opgewarmde oppervlaktelaag, door (constructieve) verandering, leidt tot scheurontwikkeling in de overgangszone naar het onverhitte deel van de doorsnede. Onder deze omstandigheden zal gedurende een brandbelasting een laag zich gedeeltelijk afscheiden door de vorming van een breukvlak, waardoor deze gevoelig wordt voor instabiele vervormingen. Spatten wordt verondersteld te gebeuren als de drukkracht de knikkracht bereikt voor deze specifieke laag, waardoor de opgeslagen elastische energie plotseling vrijkomt. Dit wordt onderbouwd door de schematisering van een conceptueel thermisch knikmodel. Weergegeven worden belangrijke aspecten, zoals de tijdsafhankelijke drukkracht, het niveau van de constructieve verandering en de thermische krommingen. Verschillende hoofdkenmerken, vaak waargenomen bij spatten (fib WP-4.3-1, 2007; Khoury & Anderberg, 2000), worden vervolgens besproken met het thermische knikmechanisme als uitgangspunt. De gevoeligheid van hoge sterkte beton voor spatten hangt samen met het vlakkere breukvlak, dat leidt tot een reductie van de dikte van een laag hetgeen het risico tot knikken vergroot. Een externe drukbelasting wordt ook geacht het risico op spatten te verhogen door de vorming van een initieel scheurpatroon parallel aan het verhitte oppervlak.

Een laatste bijdrage bespreekt verschillende mogelijkheden spatten te verminderen met een alternatieve redenering omtrent de positieve invloed van de toevoeging van polypropylene vezels aan het betonmengsel. Ook beschreven en geïllustreerd wordt het effect van een aanpassing van het oppervlak van een betonelement om de gevoeligheid voor het beschreven knikmechanisme te verminderen.

Afsluitend drankje