

Voegdetail en versterkingsmethode geanalyseerd
met niet-lineair FEM-model (2)

Versterken met CFRP-lamellen



- 1 Voorbeeld toepassing CFRP over een kritische voeg
- 2 Overzicht model met CFRP-lamel

In vervolg op de instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport moeten diverse andere gebouwen constructief worden versterkt. Een van de oplossingen is het toepassen van uitwendig gelijmde koolstoflamellen (CFRP). Deze oplossing is geanalyseerd aan de hand van een niet-lineair FEM-model.

CFRP-wapening (CFRP staat voor carbon fibre reinforced polymer) wordt gevormd door CFRP-vezels met hoge treksterkte – via een pultrusieproces – in voorgevormde strippen te produceren. Deze strippen worden op het voorberewte betonoppervlak gelijmd met een pasteuze epoxylijm. De capaciteit van deze uitwendige wapening wordt niet bepaald door de sterkte van de CFRP, maar door de hechting op het beton die kan worden gerealiseerd.

Door korte CFRP-lamellen uitwendig te verlijmen over de kritische voeg, kan de breedplaatvloer worden versterkt (foto 1). Uitgangspunt hierbij is dat de functie van de oorspronkelijke koppelwapening, die in de druklaag aanwezig is, geheel of gedeeltelijk wordt vervangen door de CFRP-lamellen. Door het aanbrengen van de alternatieve koppelwapening wijzigt de krachtswerking in het voegdetail. Hiermee wordt vermeden dat de trekkracht uit de wapening in de prefab breedplaat, via het relatief gladde stortvlak, naar de koppelwapening moet worden overgebracht.

Niet-lineair-model CFRP-lamellen

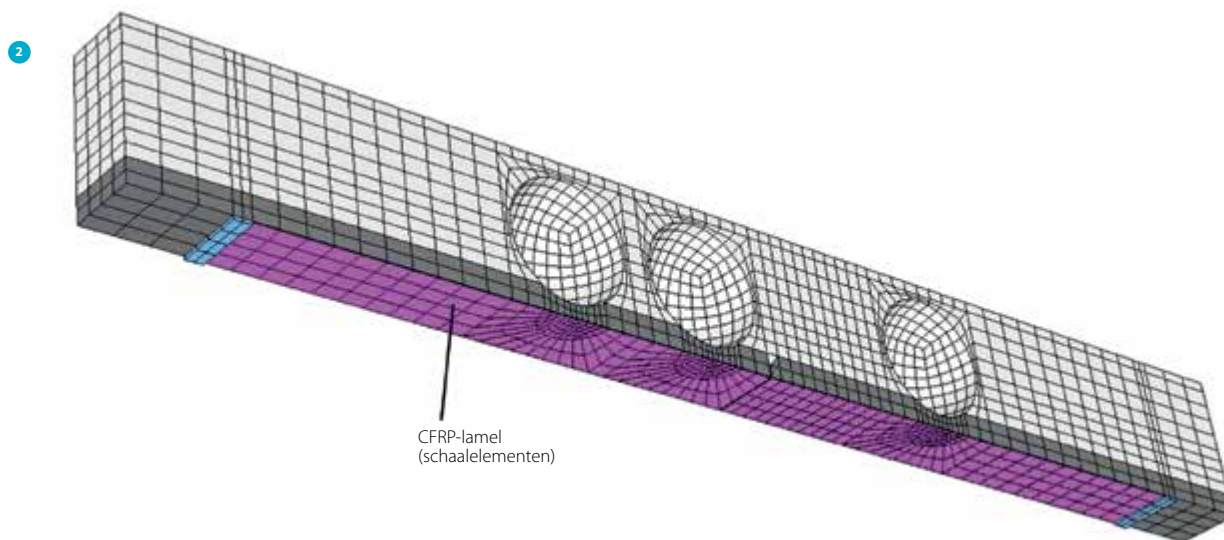
Voor de niet-lineaire analyse van de versterking met CFRP-lamellen is een basismodel gebruikt dat is opgezet om een eerder uitgevoerd experimenteel onderzoek op de TU Eindhoven na te bootsen. Over dit basismodel is het artikel 'Niet-lineaire analyse breedplaatvloeren' verschenen.

Samen met het artikel 'Versterken met bolankers', elders in dit nummer, vormen deze artikelen een drieluik.

Voordeel van deze methode is dat er niet in de vloer geboord hoeft te worden. Dit is met name een voordeel bij vloerconstructies waarbij veel leidingen of kanalen in de vloer zijn aangebracht. Bij bollenplaatvloeren ontbreken de bollen veelal bij de naad. Hierdoor worden er juist in het invloedsgebied van de voegen relatief veel leidingen en kanalen geplaatst. Ook de toepassing van thermische betonactivering in de vloer kan ervoor zorgen dat het boren in de vloer ongewenst is. In deze situaties is de toepassing van CFRP goed mogelijk. Voor het verlijmen van de strippen wordt het betonoppervlak geschuurd om een goede aanhechting te verkrijgen. Het schuren wordt uitgevoerd met een haakse slijper voorzien van komschijf en stofafzuiging.

FEM-model

Voor het testen van de versterkingsoplossing met CFRP-lamellen is een eerder opgezet FEM-model uitgebreid (fig. 2). Dat



¹⁾ Han Schijffelen heeft het artikel gereviewd namens VNconstructeurs.

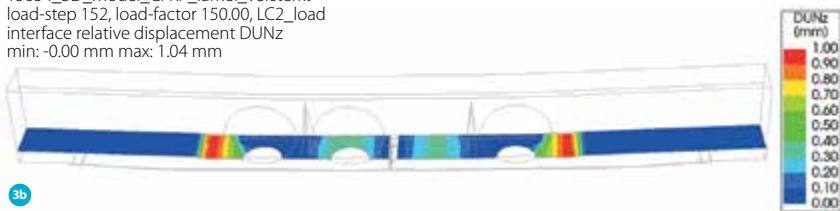
- 3a Zakking bij 300 kN
- 3b Opening interface tussen prefab schil en druklaag bij 300 kN
- 3c Staalspanning bij 300 kN
- 3d Scheurvorming bij 300 kN
- 3e Kracht in CFRP bij 300 kN

15654_3D_model_CFRP_lamel_versterkt
load-step 152, load-factor 150.00, LC2_load
displacements TD+Z
min: -5.0 mm max: 1.3 mm



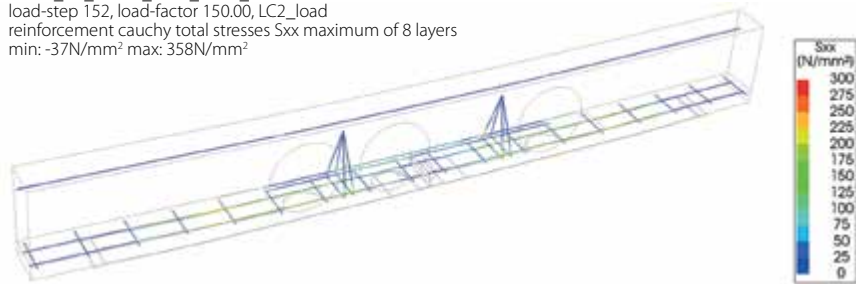
3a

15654_3D_model_CFRP_lamel_versterkt
load-step 152, load-factor 150.00, LC2_load
interface relative displacement DUNZ
min: -0.00 mm max: 1.04 mm



3b

15654_3D_model_CFRP_lamel_versterkt
load-step 152, load-factor 150.00, LC2_load
reinforcement cauchy total stresses Sxx maximum of 8 layers
min: -37N/mm² max: 358N/mm²



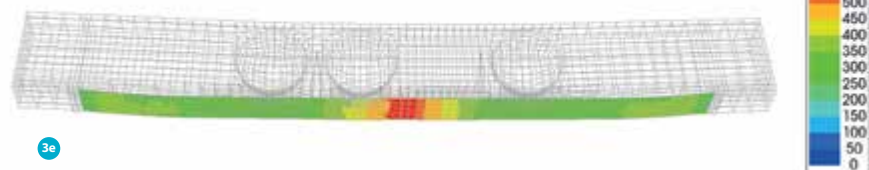
3c

15654_3D_model_CFRP_lamel_versterkt
load-step 152, load-factor 150.00, LC2_load
crack-widths Ecw 1
min: -0.0 mm max: 5.4 mm



3d

15654_3D_model_CFRP_lamel_versterkt
load-step 152, load-factor 150.00, LC2_load
distributed forces Nxx
min: 241.4 N/mm max: 619.6 N/mm



3e

basismodel is opgezet om een oorspronkelijke proefopstelling aan de TU Eindhoven na te bootsen (zie kader 'Niet-lineair-model CFRP-lamellen'). Uitgegaan is van het toepassen van een CFRP-lamel aan de onderzijde van het proefstuk over de gehele lengte tussen de steunpunten. De CFRP-lamel is met zogenoemde schaalelementen gemodelleerd met lineair-elastische eigenschappen en een E-modulus van 170.000 N/mm². De ingevoerde dikte van de CFRP-lamel is 2,4 mm en is gebaseerd op het uitgangspunt van een equivalente stijfheid van het wapeningsstaal in de prefab schil zodat $EA_{\text{wap_staal}} = EA_{\text{CFRP_lamel}}$.

Tussen de schaalelementen van de CFRP-lamel en onderzijde prefab schil zijn interface-elementen aangebracht om de lijm te modelleren. Hierbij is ingevoerd een normaalstijfheid van $k_{\text{normaal}} = 1666 \text{ N/mm}^3$ en een schuifstijfheid van $k_{\text{schuif}} = 695 \text{ N/mm}^3$ op basis van $E = 5000 \text{ N/mm}^2$, $G = 2083 \text{ N/mm}^2$ en een dikte van 3 mm. Overige eigenschappen en belastingen zijn gelijk aan die van het basismodel.

Resultaten

De resultaten van de analyse ten aanzien van zakking, opening interface, staalspanning, scheurvorming en kracht in de lamel, zijn weergegeven in figuur 3a t/m 3e.

Onthechting

Een belangrijke reden om de FEM-analyse uit te voeren, was de vrees voor vroegtijdige onthechting van de CFRP-lamellen door ongelijkmatige verticale vervorming van de prefab schil nabij de voeg. Dit zou kunnen leiden tot hoge trekspanningen haaks op het hechtvlak. De lijmverbinding is hiertegen niet goed bestand en hierdoor zou onthechting kunnen plaatsvinden. Op basis van de FEM-modellen blijkt echter dat de excentrische plaatsing van de CFRP, ten opzichte van de zwaartelijns van de prefab schil, voor een tegengestelde kromming van de schil zorgt (fig. 4). De prefab schil onthecht plaatselijk nog wel maar wordt door de CFRP weer tegen de druklaag aan gedrukt.

Ontwikkeling belasting

Uit de resultaten van de FEM-berekening en uit het last-zakkingdiagram (fig. 5) is te zien dat de CFRP-lamelversterking significant bijdraagt aan de capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 84 kN treedt voor het eerst onthechting op in de interface links van de naad tot aan de tralieligger.

Bij een belasting van 136 kN (loadfactor 68) treedt ook onthechting op in de interface rechts van de naad tot aan de tralieligger. Er is dan sprake van een beperkte reductie in stijfheid van de constructie.

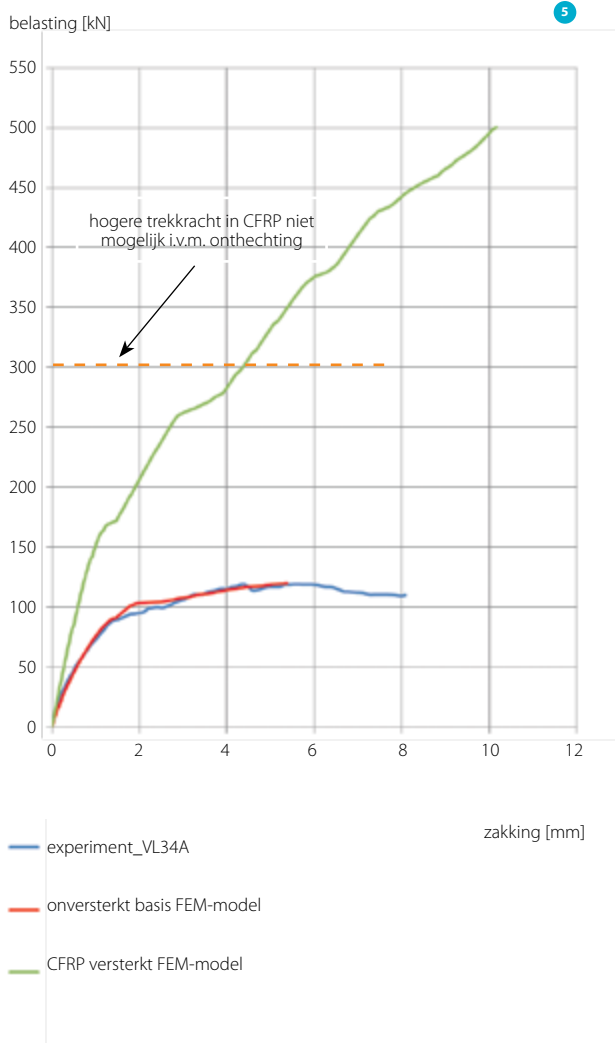
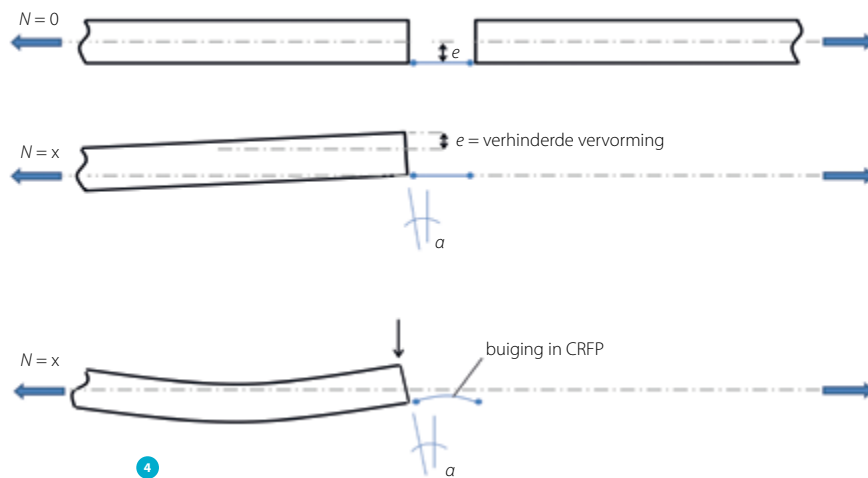
Vervolgens treedt bij een belasting van 172 kN (loadfactor 86) ook onthechting op in de interface tussen opstort beton en

- 4 Verklaring opkrommend effect
- 5 Last-zakkingsdiagram proefstuk, onversterkt FEM-model en met CFRP versterkt model

schil achter de tralieliggers, waarna de stijfheid verder reduceert.

Bij een belasting van circa 270 kN treden er in de prefab schil diagonale scheuren op bij de overgang van niet-lineaire interface naar lineaire interface. Gesteld kan worden dat aangezien de onthechting in het model zich niet verder kan ontwikkelen in de stijve lineaire interface, de onthechting zich als het ware verder voortzet in de prefab schil.

Dit laatste fenomeen wordt zodoende gezien als een gevolg van de wijze van modellering. Bij toepassing van doorgaande ankers die prefab schil en druklaag tegen elkaar drukken, zoals in de oorspronkelijke proefopstelling het geval was, zal het gedrag naar verwachting gunstiger zijn. Desalniettemin wordt in het model een belasting van 300 kN gehaald zonder dat de wapening vloeit. Hogere belastingen worden niet opneembaar geacht door onthechting van de lijm tussen CFRP en beton.



Onthechtingsmechanismen

De toegepaste FEM-modellen zijn niet geschikt om de mogelijke onthechtingsmechanismen tussen betonoppervlak en CFRP nauwkeurig te voorspellen. De controle op onthechting is uitgevoerd op basis van de krachten in de CFRP zoals deze in het FEM-model optreden en een berekening op basis van 'fib Bulletin 14'. De grenswaarde waarbij onthechting nog net niet optreedt is in figuur 5 weergegeven als gele stippellijn.

Toepassing

Het toepassen van de versterkingsmaatregel met gelijkde CFRP-lamellen aan de onderzijde met een equivalente stijfheid gelijk aan die van de breedplaatwapening, levert een significante bijdrage aan de capaciteit. Op basis van de resultaten komt deze maatregel als een geschikte principeoplossing naar voren.

De versterkingsoplossing met CFRP-lamellen is bij een aantal projecten toegepast. Voor specifieke projecten moeten altijd projectspecifieke modellen worden gebruikt, gebaseerd op de werkelijke afmetingen en voorgestelde detaillering van de versterking. Daarbij kan er ook voor worden gekozen de berekening gefaseerd uit te voeren. Daardoor wordt de versterking pas aangebracht in het model nadat eerst de permanente belasting is aangebracht in de onversterkte situatie, zoals dat in een bestaande situatie het geval zal zijn.

Hoewel de FEM-studie veel inzicht heeft gegeven in de werking van de versterkingsoplossingen, zijn wij van mening dat de effectiviteit van deze oplossingen alsnog moet worden geverifieerd met proeven. ☒