
Instorting voetgangersbrug Miami

Hoe een opeenstapeling van fouten heeft geleid tot bezwijken
van een brug in aanbouw



Tijdens de uitvoering, op 15 maart 2018, stortte in Miami een betonnen vakwerkliggerbrug in. Hierbij kwamen tien mensen om en raakte er nog eens zes gewond. Wat waren de oorzaken? Kritische ontwerpkeuzes, rekenfouten, kortetermijnbeslissingen en het ontbreken van de collegiale toets speelden een grote rol.

Het ontwerp van de Florida International University (FIU) pedestrian bridge in Miami bestond uit twee overspanningen:

een grote overspanning van circa 53 m (voorgebouwd naast de brug) en een kleinere overspanning van 35 m (in het werk gestort). Belangrijk constructief onderdeel in het ontwerp was een betonnen vakwerk, dat in het hart van de brug was geplaatst (fig. 2).

Tijdens de aanbouw stortte de grote overspanning in; op dat moment was de kleine overspanning nog niet in aanbouw. De instorting was het gevolg van het bezwijken van een van de einddiagonalen van de vakwerkligger. De onderzoeken naar de oorzaak concentreerden zich op het detail van de aansluiting van deze einddiagonaal.

Het ontwerp van de brug

De onderrand van de brug wordt gevormd door het dek en de bovenrand door een luifel (fig. 3). Op de brug is een tuiconstructie aangebracht die geen constructieve functie heeft. De diagonalen van het vakwerk corresponderen met de oriëntatie van de tuien. De diagonalen sluiten hierdoor elk onder een andere hoek aan op het dek. Hierdoor maken met name de buitenste diagonalen een scherpe hoek met het dek.

De dikte van het dek varieert en bedraagt maximaal circa 625 mm. De diagonalen variëren eveneens in afmeting en meten maximaal circa 500 x 900 mm² (fig. 4). De diagonaal die is bezweken, heeft een afmeting van circa 500 x 600 mm. Het gewicht

auteur



**ING. ARNE
MIDDELDORP PMSE**

Hoofdconstructeur
Aronsohn Raadgevende
Ingenieurs

van het ingestorte brugdeel bedraagt circa 950 short ton (ca. 850 ton). Het beton heeft een druksterkte van 58 N/mm².

Het dek van de brug is voorgespannen in langsrichting met 12 VMA-kabels (fig. 5) en in dwarsrichting met 65 VMA-kabels. In de luifel zijn totaal 4 VMA-kabels aangebracht.

Tweede draagweg De ontworpen constructie heeft geen mechanisme dat functioneert bij het uitvallen van een van de diagonalen. Ook is niet gerekend met hogere veiligheidsfactoren voor de constructieonderdelen (benadering met *key elements*).

Bouwfase

De lange overspanning is voorgebouwd naast de weg en later op zijn plaats gereden. In het ontwerp wordt daarom ook wel gesproken over ABC: *Accelerated Bridge Construction*.

Tijdens het transport wijzigden de ondersteuningsposities. Hierdoor wisselt de kracht in de diagonalen van druk naar trek (fig. 6). Een aantal diagonalen is daarom voorzien van voorspanstaven. Eenmaal op zijn plaats, is deze voorspankracht afgelaten en werden alle diagonalen in het vakwerk op druk belast, mede doordat de brug in langsrichting was voorgespannen.

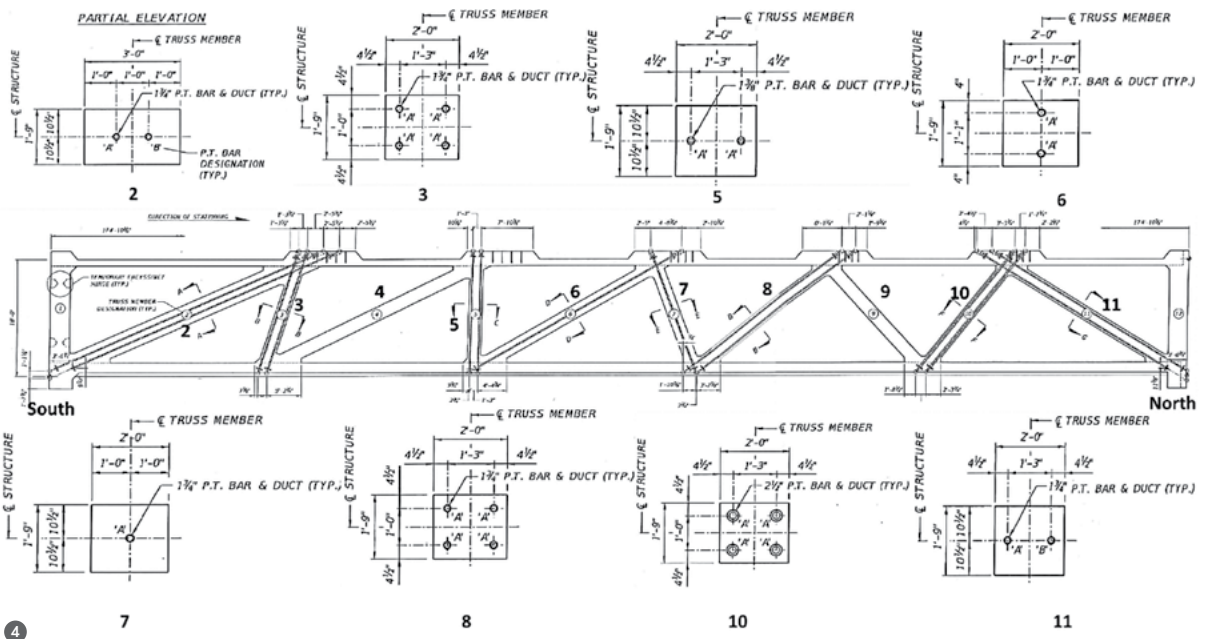
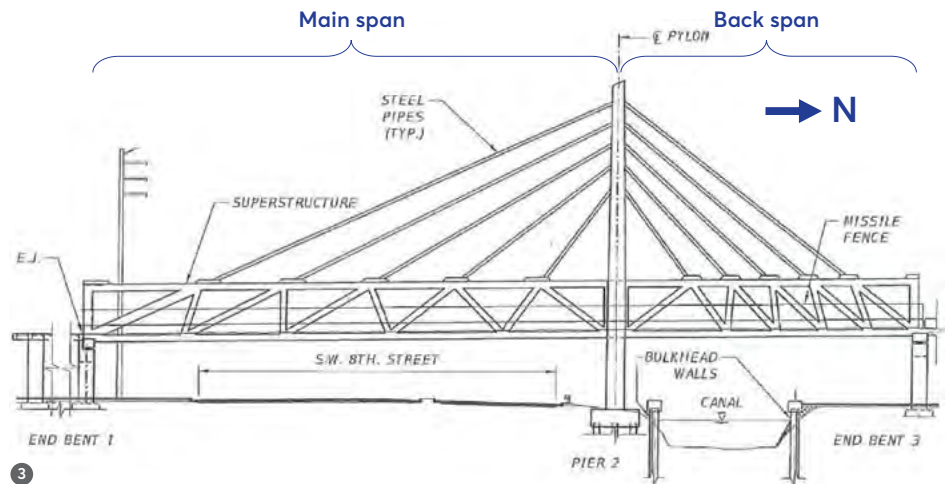
Het grote brugdeel is gestort in drie fasen: eerst het dek, daarna de diagonalen van het vakwerk (foto 7) en ten slotte de luifelconstructie. Na het storten is begonnen met het aanbrengen van de voorspanning. Eerst de langsvoorspanning in het dek en →

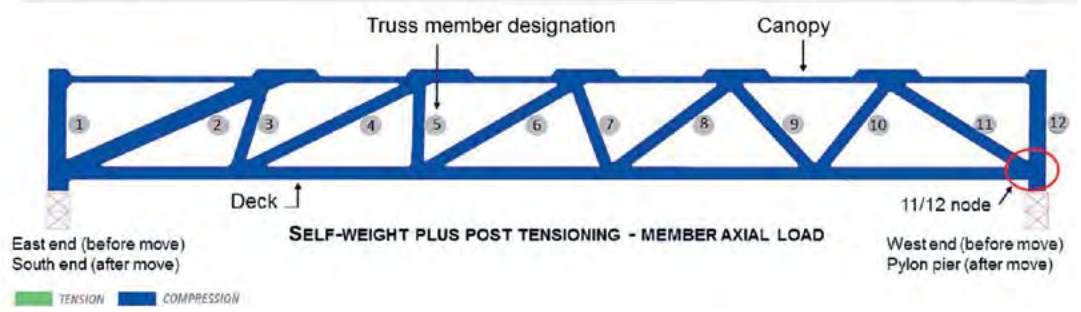
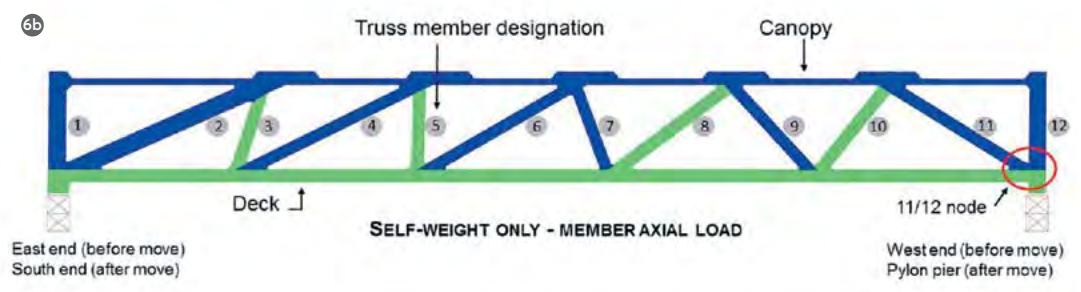
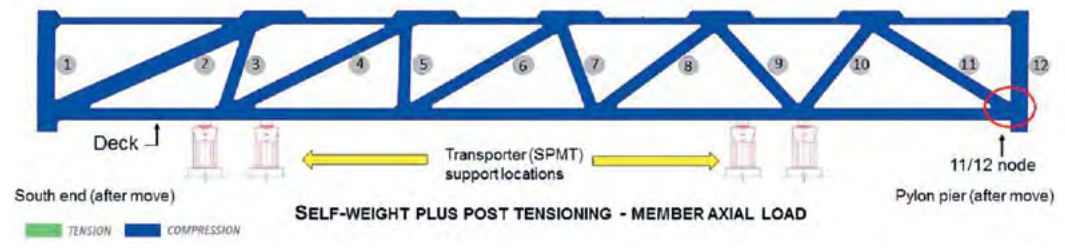
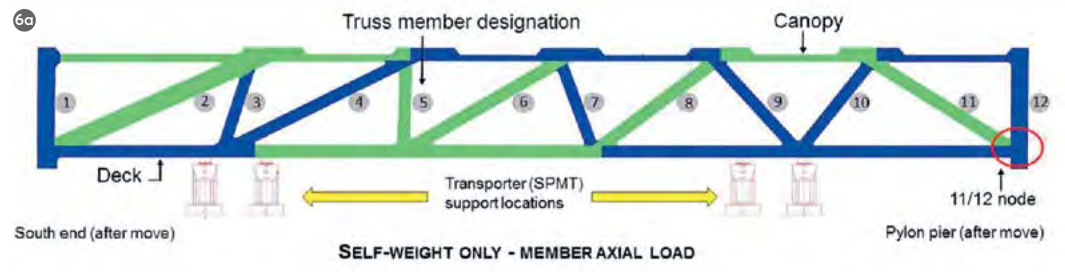
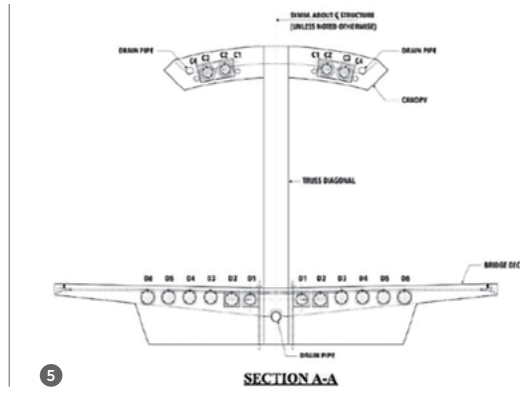
**BETROKKEN PARTIJEN,
CONTRACTVORM
EN COLLEGIALE TOETS**

De opdrachtgever van de brug was de FIU (Florida International University). De aannemer, MCM (Munilla Construction Management), verwierf de design & construct-opdracht en schakelde FIGG Bridge Engineers in voor het ontwerp van de brug tot en met de realisatiefase. Vanuit FIGG werd een Engineer of Record (EOR) verantwoordelijk voor het ontwerp en de uitvoering. De Louis Berger Group toetste het ontwerp in opdracht van FIGG.

Toezicht op de uitvoering van de werkzaamheden werd uitgevoerd door Bolton Perez.

Aanvullend forensic engineering voor FIGG is uitgevoerd door Wiss, Janney, Elstner Associates (WJE).





In het D-gebied ter plaatse van de aansluiting van de diagonaal waren diverse versturende elementen aanwezig



in de luifel, daarna de voorspanwapening in dwarsrichting van het dek. Als laatste zijn de tijdelijke voorspanstaven in de diagonalen op spanning gebracht.

Na het voorspannen zijn de bekisting en de onderstempeling van de brug weggehaald. Circa twee weken later is het brugdeel door SPMT's (*Self Propelled Modular Transporter*) op zijn plaats gereden (foto 8).

Ontwerp van de knoop

In de knoop waar de brug is bezweken (bij diagonaal 11), sluit de diagonaal onder een scherpe hoek van circa 31 graden aan op het dek. De diagonalen zijn na het dek gestort, waardoor er een stortnaad aanwezig is ter plaatse van de aansluiting met het dek. Dit is een cruciaal onderdeel in het ontwerp.

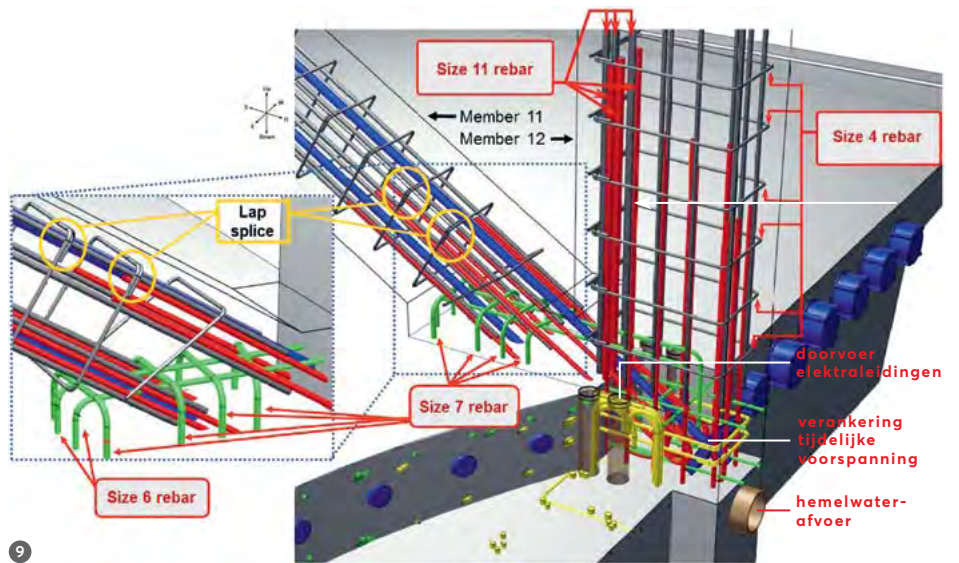
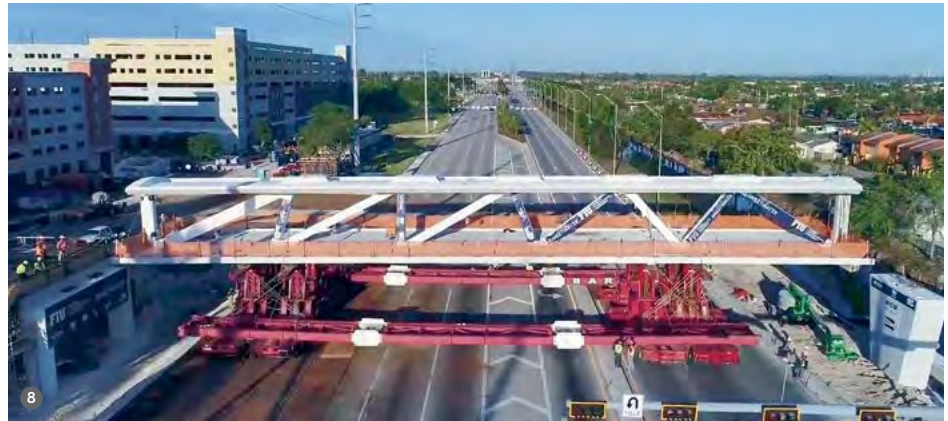
Ter plaatse van de diagonaal zijn diverse sparingen in het dek aangebracht, voor afvoer van hemelwater en doorvoer van elektra (fig. 9). De hemelwaterafvoer is centrish onder de diagonaal geplaatst. De tijdelijke voorspanstaven van de diagonalen zijn verankerd met ankerplaten boven deze regenpijp (foto 10). De elektraleidingen zijn naast de diagonaal in het dek aangebracht. In het D-gebied, ter plaatse van de aansluiting van de diagonaal, waren daardoor diverse versturende elementen aanwezig die invloed hebben op de krachtsoverdracht.

Oorspronkelijk waren geen oplegplaten aanwezig direct onder de diagonaal. Deze zijn later alsnog aangebracht (zie onder 'Verslag instorting').

De knoop is gewapend om de kracht in te leiden in het dek. De beugels vanuit het dek naar de diagonaal omsluiten de diagonaal echter niet geheel. Ook is er weinig horizontale wapening aangebracht aan de kopse zijde van het dek. De verankering van de voorspankabels in het dek begint naast de diagonaal.

Verslag instorting

Nadat de voorspanning was aangebracht en de onderstempeling was weggehaald, zijn de eerste scheuren geconstateerd in beide knopen aan de uiteindes (bij diagonaal 2 en 11, waarvan 11 uiteindelijk is bezweken) (foto 12 en 13). Bij het weghalen van de stempels hoorde men een hard kraakgeluid. Voor het transport had de toezichthouder naar aanleiding van de scheuren al om een reactie gevraagd van de aannemer MCM. En MCM heeft dezelfde dag nog om reactie gevraagd aan de constructeur, FIGG. FIGG antwoordde dat de scheuren geen veiligheidsissue waren. Behalve de genoemde scheuren, waren er bijna geen andere scheuren in het brugdeel voordat het naar de definitieve plek werd gereden. →

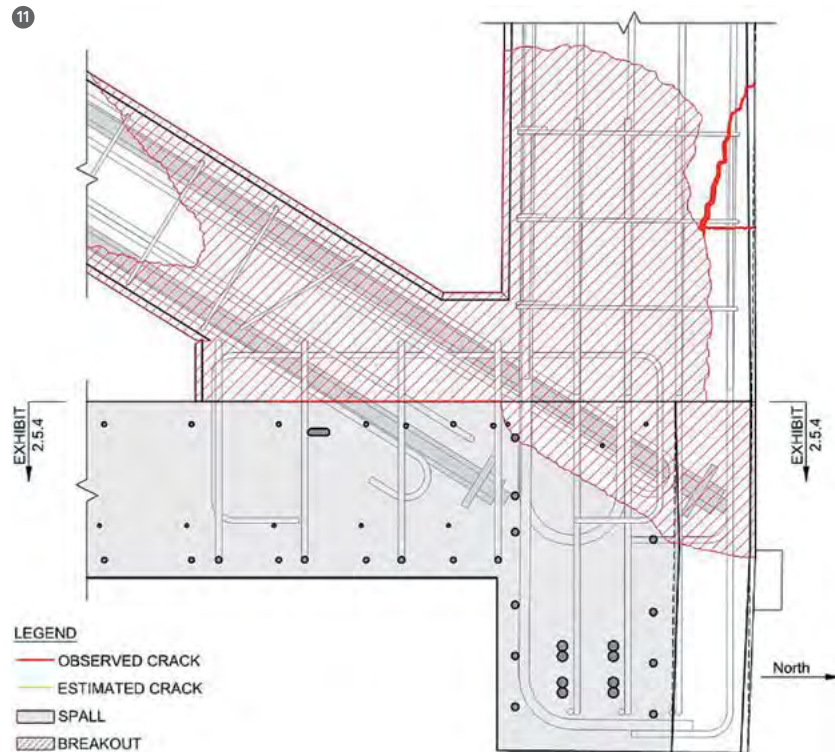


8 Transportfase [2]

9 Detaillering van de knoop; de spelingen in het dek en onder de diagonaal zijn goed zichtbaar [1]

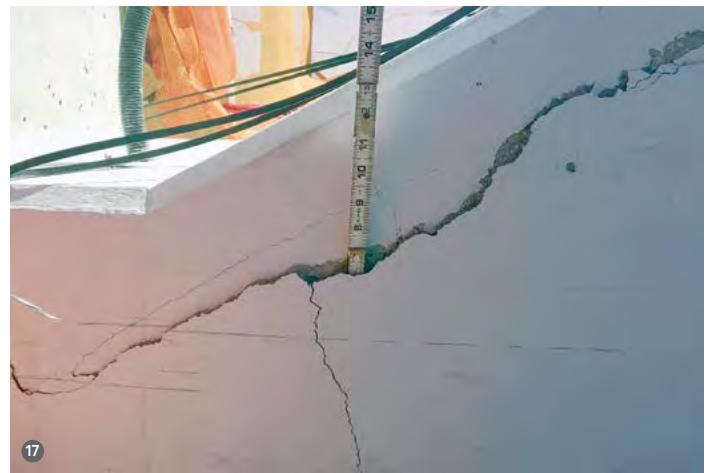
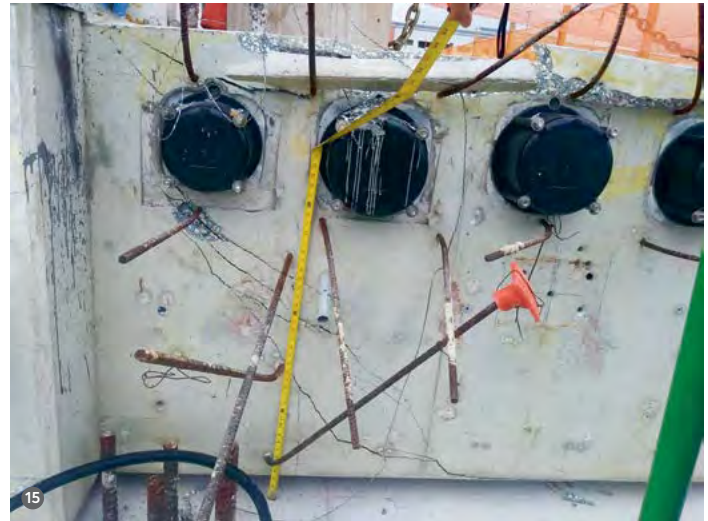
10 Door het uitbreken van de diagonaal zijn de ankerplaten en de regenpijp goed te zien [2]

Volgens de onderzoekers had het opruiven van de voeg niet kunnen voorkomen dat de brug zou instorten



Vlak nadat de brug op zijn definitieve opleggingen werd geplaatst (vijf dagen voor bezwijken), zijn er geen nieuwe scheuren geconstateerd. Direct na het plaatsen zijn de tijdelijke voorspanstaven afgelaten. Tijdens dit aflaten begonnen er zich nieuwe scheuren te vormen bij beide einddiagonalen

(2 en 11) (foto 14 en 15). Ook was zichtbaar dat ter plaatse van de stortnaad tussen de diagonaal en het dek een plastische vervorming had plaatsgevonden (foto 16). De diagonaal was zichtbaar losgekomen van het dek. Ook waren in de diagonaal zelf scheuren zichtbaar (foto 17).



De voorspanploeg waarschuwde de aannemer en twee dagen na plaatsing is een bericht gestuurd naar FIGG, met de melding dat de scheuren groter waren geworden en dat men zich hier zorgen over maakte. Onmiddellijke reactie was noodzakelijk vond de aannemer. Dit bericht werd pas de volgende dag gelezen.

FIGG heeft de foto's beoordeeld en op basis hiervan geconstateerd dat de scheuren inderdaad wat groter waren geworden. Naar het oordeel van FIGG was er echter geen sprake een veiligheidsissue. Wel adviseerde men een oplegplaat aan te brengen direct onder de diagonaal, gelijk aan de situatie naast de weg.

Omdat de scheuren groter waren geworden, nadat de tijdelijke voorspanning in de diagonalen was weggehaald, adviseerde

FIGG om de diagonaal (diagonaal 11) weer aan te spannen. Men hoopte door het aanspannen de scheuren te verkleinen. In de communicatie heeft FIGG herhaaldelijk aangegeven de optredende scheuren niet te zien als veiligheidsissue. FIGG gaf wel aan dat het aanspannen direct moest stoppen als de scheuren groter zouden worden.

Dit was twee dagen voor het bezwijken van de brug. De verantwoordelijk ingenieur van FIGG, de EOR (*Engineer Of Record*), had de scheuren toen nog uitsluitend gezien op foto's.

De EOR heeft op de dag van bezwijken de scheuren zelf pas gezien. Hij gaf aan dat de scheuren erger waren dan de foto's deden vermoeden. Er volgde een overleg tussen de betrokken partijen. FIGG had de dag →

14 en 15 Scheuren kort na transport (foto's gestuurd naar FIGG) [2]

16 Plastische vervorming op de stortnaad [2]

17 Scheuren in de diagonaal, één dag voor de instorting [2]

Het opnieuw voorspannen van diagonaal 11 heeft het bezwijken waarschijnlijk versneld

ervoor berekeningen gemaakt van de betreffende knoop en gezocht naar een mogelijke verklaring voor de scheuren. In het overleg gaf FIGG aan dat de berekeningen de scheuren niet konden verklaren. Toch zag men de scheuren nog steeds niet als veiligheidsissue.

Tijdens het overleg heeft men niet voorgesteld om het brugdeel direct te ondersteunen en de weg af te sluiten. Controleberekeningen toonden immers aan dat er geen probleem was.

Door het opnieuw aanspannen van diagonaal 11 hoopte men dat de scheuren zouden afnemen. Er werd echter geen afname van de scheuren waargenomen. De berekeningen waarop werd gebaseerd de brug weer opnieuw aan te spannen, waren niet onafhankelijk getoetst omdat het voorspannen direct werd uitgevoerd. De toezichthouder (Bolton Perez) en de inspecteur die toezicht hield op het voorspannen waren ook niet betrokken bij de beslissing om diagonaal 11 weer opnieuw voor te spannen.

Tijdens het uitvoeren van de voorspanwerkzaamheden bezweek de brug. De weg was op dat moment niet afgesloten.

Aanpak onderzoek oorzaken instorting

Door de NTSB (*National Transport and Safety Board*) en de OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) is na de instorting direct een onderzoek gestart. In beide onderzoeken heeft men alle gebeurtenissen in een tijdlijn geplaatst. Naast het onderzoek naar de gebeurtenissen, hebben beide organisaties een herberekening gemaakt van het brugdeel op basis van het ontwerp en fasering van FIGG.

Uit de herberekeningen bleek dat de optredende schuifkrachten in de diagonalen ter plaatse van de opleggingen veel hoger waren dan berekend door FIGG. De conclusie was dat er rekenfouten waren gemaakt in de belastingen én bij de bepaling van de capaciteit van de verbinding. Bij de beschouwing van de afschuifcapaciteit heeft men het eigen gewicht van de brug te gunstig aangenomen. Dit resulteerde in een te grote normaaldrukkraft op het afschuifvlak en dus een te grote schuifcapaciteit in de voeg.

FIGG heeft na de instorting zelf onderzoek uitgevoerd naar het opruwen van de

stortnaden. Daarbij is aangegeven dat de aanstortvlakken niet in overeenstemming met de opgave waren opgeruwd. Forensisch onderzoek (uitgevoerd door WJE) in opdracht van FIGG toonde aan dat de afschuifcapaciteit van de voeg inderdaad verbeterd had kunnen worden door de aansluitvoegen goed op te ruwen.

Naast de officiële organisaties is ook onderzoek uitgevoerd door onderzoekers Ran Cao (PhD universiteit New York), Sherif El-Tawil (universiteit Michigan) en Anil Kumar Agrwal. Zij hebben gebruikgemaakt van zogenoemde *crash simulation software*. In het model is het volledige brugdeel gemodelleerd in het eindige-elementenpakket LS-DYNA. Het werkelijke gedrag van de materialen is nagebootst en in het model zijn de diverse stadia beschouwd.

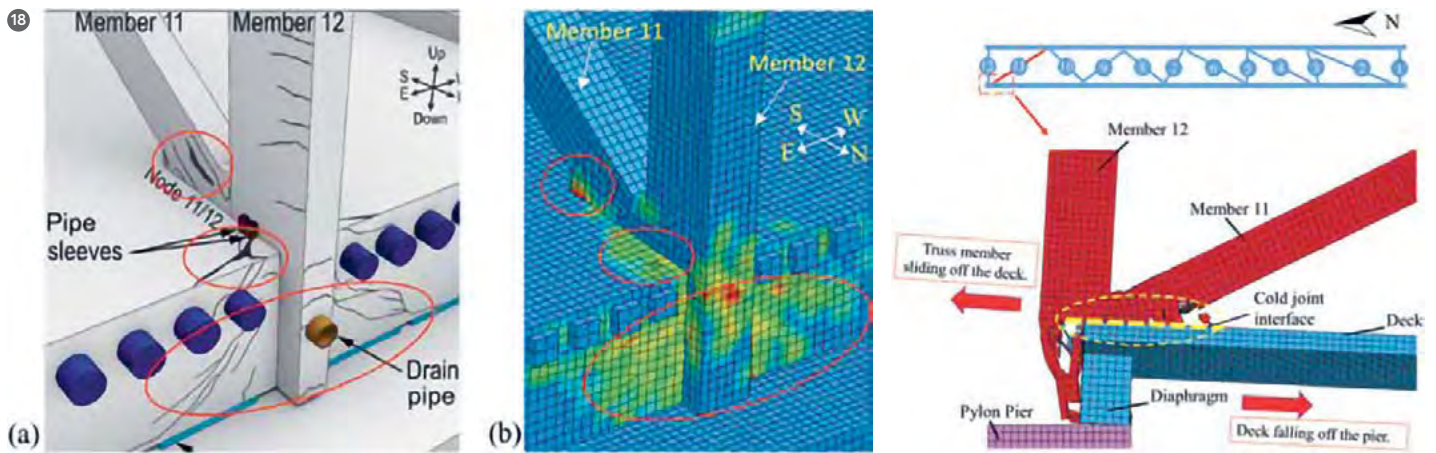
Het model, waarin de aanwezige wapening is meegenomen, laat een scheurenpatroon zien dat overeenkomt met de waargenomen scheuren (fig. 18). Volgens de onderzoekers had het opruwen van de voeg, in tegenstelling tot de bewering van FIGG, niet kunnen voorkomen dat de brug zou instorten. In de berekeningen heeft men immers ook modellen doorgerekend met een hogere afschuifweerstand van de stortnaad en dit maakte geen groot verschil.

Het model laat zien dat er waarschijnlijk interne scheuren zijn opgetreden rondom de ankerplaten van de tijdelijke voerspanning. Het afschuiven van de diagonaal over het stortvlak is duidelijk zichtbaar in het model.

Het opnieuw aanspannen van diagonaal 11, en het daarmee verhogen van de afschuifkracht in de stortnaad, veroorzaakte waarschijnlijk meer interne schade in de knoop. Men spreekt ook over het uitbreken aan de achterzijde van de oplegging (*punch-out failure*). Het rekenmodel laat duidelijk grote vervormingen zien aan de kopse kant van het dek. Het opnieuw voorspannen van diagonaal 11 heeft het bezwijken waarschijnlijk versneld.

Beschrijving 'officiële' oorzaken

In de officiële onderzoeken uitgevoerd door de NTSB en de OSHA wordt aangegeven dat



het bezwijken van de aansluiting van diagonaal 11 op het dek de oorzaak was van het instorten. Vooral de NTSB heeft erg ingezoomd op de afschuifcapaciteit van de staaf met het dek.

Belangrijkste conclusies uit de officiële onderzoeken zijn:

- Door een ontwerpfout is de brug ingestort. FIGG heeft de afschuifcapaciteit van de knoop overschat, doordat bij de berekening van de knoop verkeerde belastingen en belastingfactoren zijn gebruikt.
- De voegen zijn niet voldoende opgeruwd.
- De EOR heeft een inschattingfout gemaakt door diagonaal 11 opnieuw aan te spannen.
- De reviewwerkzaamheden hadden ook uitgevoerd moeten worden voor bouwfase en detaillering. De toetsers erkende dat omwille van het budget uitsluitend naar de eindfase is gekeken.

Andere opvallende zaken

Op basis van de informatie van het detail zijn er een aantal opvallende zaken te noemen.

De bijzonder schuine stand van de diagonaal Door de bijzonder scherpe hoek van de diagonaal met het dek, ontstaat een grote horizontaalkracht. Hierdoor wordt er een behoorlijke aanspraak gedaan op het aansluitvlak en de aanwezige wapening voor het overbrengen van de horizontaalkracht naar het dek. FIGG heeft het ontwerp gebaseerd op het overbrengen van deze horizontaalkracht door afschuifcapaciteit van de knopen. De vraag is of dit als ontwerpuitgangs-

punt voor een knoopverbinding een veilige benadering is. Door de scheuren verkleinde het oplegvlak verder en veranderde het krachtsverloop in de knoop.

Hoeveelheid wapening in de D-regio en staafwerkmodel voor evenwicht met de voorspanning in het dek Er is relatief weinig wapening in het D-gebied waar de kracht wordt overgedragen van de diagonaal naar de voorspanwapening in het dek. Onduidelijk is hoe de horizontale component van de drukkracht evenwicht maakt met de voorspankracht in het dek. Met andere woorden: is een goed staafwerkmodel te vormen waarbij de krachten evenwicht maken? Niet alleen verticaal, maar ook horizontaal. De verankering van de voorspanstaven bevindt zich naast de diagonaal. Slechts een deel van de voorspankabels in het dek ligt binnen de invloed van de drukdiagonaal.

Door het lage wapeningpercentage ontstaan relatief grote rekken in de wapening in het zijvlak/kopse kant van het dek. Het ontbreken van voldoende horizontale wapening was mogelijk aanleiding voor scheurvorming in het D-gebied. Uiteindelijk is de knoop bezweken op het stortvlak. Maar als het stortvlak voldoende afschuifcapaciteit had gehad, was de knoop dan niet ook bezweken?

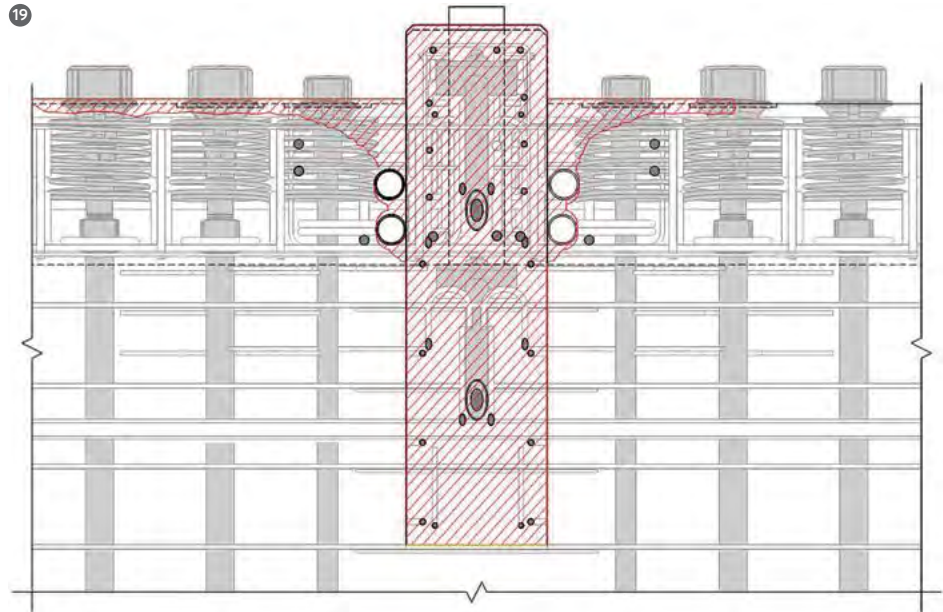
Leermomenten

FIGG Bridge Engineers is verantwoordelijk gesteld voor de ontwerpfout die uiteindelijk heeft geleid tot het bezwijken van de brug. →

HERSTEL

Inmiddels is een nieuwe brug ontworpen door BCC Engineering. De bouw van deze stalen brug staat gepland voor 2024.

19



LEGEND
 — OBSERVED CRACK
 — ESTIMATED CRACK
 ▨ SPALL
 ▨ BREAKOUT

LITERATUUR

- 1 Highway Accident Report NTSB/HAR-19/02, PB2019-101363 - Pedestrian Bridge Collapse Over SW 8th Street, Miami, Florida, March 15, 2018. National Transportation Safety Board. Washington, DC, Oktober 2019.
- 2 Report Investigation of March 15, 2018 Pedestrian Bridge Collpase at Florida International University, Miami, FL; Mohammad Ayub, PE, SE, Office of Engineering Services, Drectorate of Construction, OSHA National Office. Washington D.C., July 2019.
- 3 Ran Cao, Ph.D., A.M.ASCE, Sherif El-Tawil, Ph.D., P.E., F.ASCE, F.SEI, and Anil Kumar Agrawal, Ph.D., P.E., M.ASCE, F.ACI, Deadly Miami pedestrian bridge collapse – Why and how the structure failed. Oktober 2020.
- 4 Party Submission tot the National Transportation Safety Board - FIU UniversityCity Prosperity Pedestrian Bridge Construction Accident, Miami, Florida | March 15, 2018. Figg Bridge Engineers, Inc, September 2020.

Het bedrijf is 10 jaar uitgesloten van het uitvoeren van federale projecten. De verantwoordelijk ingenieur (EOR), die de bouw heeft begeleid namens FIGG, is voor 10 jaar uitgesloten van het uitvoeren van werkzaamheden binnen het vakgebied.

Het instorten van deze brug in aanbouw geeft veel inzicht in hoe zaken mis kunnen gaan in een project. In het ontwerp van de knoop werden diverse elementen toegepast die de lokale krachtswerking negatief beïnvloedde: diverse sparingen, weinig wapening en een gebrekkig staafwerkmodel. Op basis van een foutieve berekening werd de optredende belasting te laag ingeschat (verkeerde belastingfactor), werd de capaciteit van een knoopverbinding te hoog ingeschat (gebrekkige detailberekening bouwfase) en op basis van deze kennis werd een beslissing genomen die fataal was voor de brug (opnieuw aanspannen diagonaal). De optredende scheuren werden vervolgens ook niet gezien als risico, doordat men was verblind door de verkeerde berekeningen. Onduidelijk is waarom de MCM en Bolton Perez niet ingrepen en maatregelen voorstelde voor tijdelijke ondersteuning.

Niemand is foutloos en gezonde twijfel is een goede eigenschap voor een ingenieur. Een proces gericht op het reduceren van fouten door onafhankelijk toetsen en het stellen van out-of-the-box-vragen is noodzakelijk bij complexe constructies, maar eigenlijk voor alle constructies. Iedere ingenieur heeft hier recht op. ●