

¿Cómo evaluar la capacidad de puentes de hormigón existentes?

Lantsoght, Eva

Publication date

2019

Document Version

Accepted author manuscript

Published in

Proceedings of the III Conferencia Iberoamericano de Ingenieria Civil

Citation (APA)

Lantsoght, E. (2019). ¿Cómo evaluar la capacidad de puentes de hormigón existentes? In *Proceedings of the III Conferencia Iberoamericano de Ingenieria Civil*

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

¿Cómo evaluar la capacidad de puentes de hormigón existentes?

Prof. dr. ir. Eva O.L. Lantsoght
Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador
Delft University of Technology, Delft, the Netherlands

Abstract

Después de la expansión de la red vial del país, la comunidad de ingenieros civiles y el gobierno tienen un número mayor de puentes existentes a manejar. En el futuro, esos puentes necesitarán mantenimiento y adopciones a los cambios en términos de las cargas vivas. En ese artículo vamos a ver como en Europa y América del Norte se está evaluando la capacidad de puentes de hormigón existentes. Típicamente, la evaluación es primero analítico, y después, dependiendo de la necesidad, experimental. En caso de concluir que no hay capacidad suficiente, diseñamos un refuerzo estructural para el puente. Revisaremos diferentes métodos de cálculo, inspección, pruebas de carga, y reforzamiento para puentes de hormigón existentes.

1. Introducción

Después de la expansión de la red vial del país, la comunidad de ingenieros civiles y el gobierno tienen un número mayor de puentes existentes a manejar. Mientras el enfoque en los últimos años ha sido en la construcción de obras nuevas, el nuevo paradigma de la construcción tendrá que incluir los aspectos de mantenimiento y manejo de puentes existentes. En las siguientes décadas, los puentes existentes necesitarán mantenimiento y adopciones a los cambios en términos de las cargas vivas. Manejo de los puentes es importante desde la punta de vista de la seguridad: la seguridad del puente (la seguridad estructural y la seguridad de los pasajeros), la seguridad de la red vial (la confiabilidad de la red vial y el transporte de personas y productos) y la seguridad de las comunidades (acceso a comunidades aislados y el impacto social de retrasos).

Al mismo tiempo, el cambio climático y la escasez de recursos impiden pensar de manera diferente sobre la construcción. Dentro de la industria, el sector de la construcción es responsable para 39% de las emisiones de CO₂. Para cumplir con la meta estipulado por el IPCC [1] de limitar el calentamiento global a 1.5°C, es necesario reducir las emisiones de CO₂ de una manera rápida. Hay que tomar en cuenta que sin cambios las emisiones, llegaremos a un calentamiento global de 4.1 – 4.8°C en el año 2100 [2], lo que significará el colapso de la sociedad humana [3]. Para limitar el calentamiento global a 1.5°C, medidas inmediatas y de largo alcance son necesarios. El sector de la construcción tiene la responsabilidad de mostrar su liderazgo en frente de ese desafío.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad de la sociedad, tenemos que tomar decisiones sobre el manejo y mantenimiento de puentes existentes a base de la economía, ecología y el impacto social [4]. En términos económicos, un buen manejo de puentes resulta en evitar costos asociados con reparación, o demolición y reciclaje de un puente a final de su vida y el costo de un puente nuevo. En términos ecológicos,

tenemos que calcular el impacto ambiental de una reparación, o demolición y reciclaje de un puente a final de su vida con el impacto de una nueva construcción. Ese impacto puede ser el impacto directo en el lugar de construcción del puente, el uso de agua y materiales, y el pie de carbono del proyecto en términos del uso de materiales, el transporte de materiales y el equipo laboral y el uso de recursos en el sitio de construcción. En términos de impacto social [5], tenemos que medir y evaluar el efecto visual del puente, el efecto de retrasos de personas y productos y el efecto al empleo local a través del proyecto.

En ese artículo, revisaremos el estado del arte de inspección, mantenimiento y evaluación de puentes existentes en Norteamérica y Europa. Además revisaremos como implementar esas estrategias para lograr el manejo de los puentes, que forman una parte importante de la red vial, desde el punto de vista de la sostenibilidad.

2. Métodos de inspección

Inspección frecuente de los puentes es la manera más adecuada para revisar el estado de un puente [6]. La inspección típicamente es de manera visual y se enfoca en ver signos de corrosión, daños en las juntas y soportes, evidencia de fractura y el estado general del puente. En los últimos años, se han desarrollado diferentes métodos no-destructivos, que permiten al inspector tener más información sobre el estado de los elementos estructurales del puente de una manera más profunda. Problemas como delaminación, corrosión, fisuras, falta de cobertura, concentraciones de agregados y otros pueden ser detectados con esos métodos [7]. Se recomienda combinar diferentes métodos para tener un análisis más completo. Después de la inspección, es necesario evaluar los efectos de posibles daños a la capacidad estructural del puente y actualizar la información dentro del sistema de manejo de datos de los puentes.

3. Métodos de mantenimiento

El mantenimiento regular de los puentes significa pintar la estructura, remplazar juntas y soportes y remplazar la capa de asfalto entre otros. Cuando un puente ya no cumple con los requisitos de la norma, rehabilitación del puente puede ser necesario. Desde el punto de vista de sostenibilidad, se debe tomar la decisión óptima entre remplazar o rehabilitar un puente – la mejor solución depende de muchos factores y hay que analizar caso por caso.

Cuando se puede mostrar que rehabilitación es la opción más sostenible para asegurar que un puente cumple con los requisitos de seguridad, tenemos diferentes opciones:

- reforzamiento con hojas de fibra de carbono. Se puede usar para incrementar la capacidad a flexión y cortante. El problema con ese método es que el elemento puede fallar por delaminación entre el hormigón y la fibra de carbono [8-10].
- pretensado externo, que se puede usar después de perder pretensión por efectos dependientes de tiempo (fluencia, contracción y relajación) [11].
- encamisado de columnas con acero y/o pretensión, que pone el hormigón en un estado tri-axial, aumentando capacidad y ductilidad [12,13]. Es una solución interesante para regiones con sismos.
- El uso de cubiertas de hormigón de ultra alta performance (UPHC, ultra high performance concrete [14]), materiales compuestas (ECC, engineered cementitious composites [15]) y materiales con endurecimiento por deformación

(SHCC, strain hardening cementitious composites [16]) para añadir resistencia a la sección.

4. Métodos de evaluación

La primera etapa de una evaluación de un puente siempre es la evaluación a través de análisis. Cuando los métodos de los códigos no toman en cuenta todos los mecanismos de carga, es necesario desarrollar métodos más finos a través de la investigación. En los últimos años se ha desarrollado en Holanda diferentes métodos de análisis a base de investigación experimental para cuantificar esos mecanismos de carga:

- modelo para cortante en vigas sin estribos desarrollado a base de la teoría y verificado con pruebas en el laboratorio en vigas de tamaño real, con diferentes posiciones de carga y con una red de sensores y fotogrametría [17]. Ese método se llama el Critical Shear Displacement Theory [18].
- modelo para puentes tipo losa a base de la teoría de plasticidad y verificado con experimentos en el laboratorio [19], ver Figura 1 en donde se puede ver la variedad de modos de falla en losas de hormigón.
- modelos para la fatiga de hormigón en compresión [20], unificando modelos para hormigón normal y hormigón de alta resistencia.
- modelos para la capacidad de puentes de vigas pretensado y la losa con pretensión transversal bajo cargas estáticas y dinámicas [21,22]. Esa investigación demostró que el factor característico de aumento de la capacidad de la losa es de 1.622 gracias al mecanismo de acción de membrana compresivo.
- modelos desarrollado a base de la inteligencia artificial (redes neuronales) para problemas por los cuales todavía no tenemos una descripción de los mecanismos de carga [23,24].

Además de los métodos analíticos desarrollado a base de pruebas en el laboratorio, podemos hacer el análisis de una manera probabilística. Para un análisis probabilística completo necesitamos información sobre la variabilidad de los propiedades de materiales, la variabilidad de cargas y la variabilidad de los dimensiones. Para la variabilidad de las cargas, se necesita datos sobre el peso y número de camiones en la red vial [25]. En combinación con modelos de elementos finitos se puede modelar la variabilidad espacial de las propiedades de los materiales [26]. El resultado de un análisis probabilístico es la probabilidad de falla de la sección y/o de la estructura [27]. A base de métodos probabilísticos se puede derivar los factores de carga. Para puentes existentes que ya tienen años de servicio, se puede bajar el requisito del código en términos de probabilidad de falla. Eso significa que se puede disminuir los factores de carga para el análisis de puentes existentes. En Holanda, los códigos para estructuras existentes están basado en ese análisis [28,29].

Otra técnica avanzada para el análisis de puentes existentes es el análisis con modelos de elementos no-lineales. Esos modelos tomen en cuenta modelos avanzados de materiales, la capacidad a tensión del hormigón, y efectos de agrietamiento gradual en la estructura [30-32]. Para ese método se necesita potencia computacional, aunque con el desarrollo de las computadores ese requisito se vuelve cada vez menos importante. Según el código internacional Model Code del *fib* [33] el uso de modelos de elementos finitos no-lineales es el método de análisis más avanzado, el “Level of Approximation IV” [34]. Para ese caso, la filosofía de seguridad tiene que estar incorporado en el

modelo. El método usual de usar factores de carga no es suficiente, se necesita una filosofía de seguridad que está relacionado al tipo de análisis usado. Las opciones son usar un factor global (GFR – global resistance factor safety philosophy), usar factores parciales ajustados (PRF – partial resistance factor safety philosophy) o estimar la variabilidad a base de los característicos de los materiales (ECOV – estimation of the coefficient of variation safety philosophy). Ese método facilita una mejor estimación de la capacidad de la infraestructura crítica [35,36].

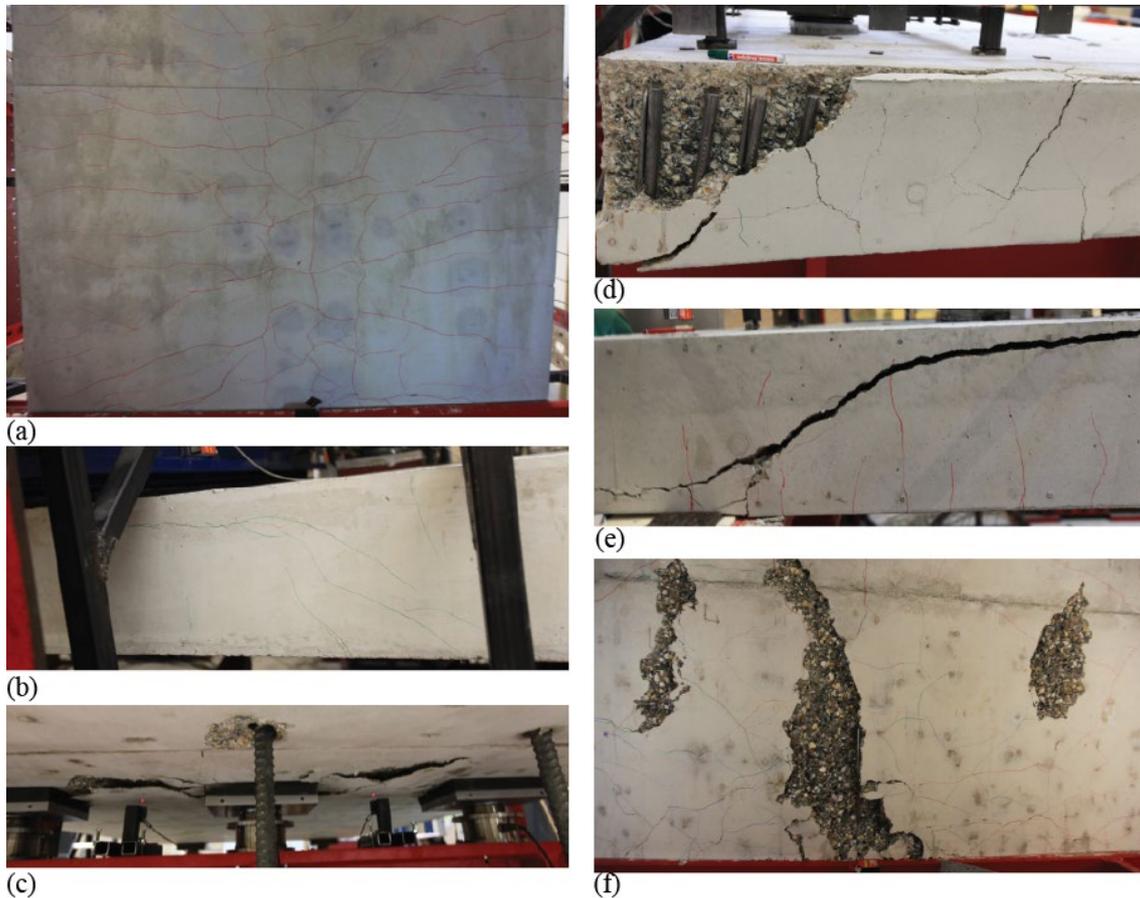


Figura 1. Diferentes modos de falla en losas de hormigón: (a) flexión, (b) cortante unidireccional entre dos puntos de carga, (c) punzonamiento del soporte, (d) falla por anclaje, (e) cortante uni-direccional, (f) punzonamiento de la losa.

Un método experimental para evaluar puentes existentes es la ejecución de una prueba de carga. Cuando los métodos analíticos no son suficientes para demostrar la confiabilidad de un puente y/o cuando los incertidumbres del puente son bastante grandes [37], una prueba de carga puede demostrar de una manera directa que un puente es capaz de sostener la carga viva con sus factores de carga. Como una prueba de carga necesita cargas largas, Figura 2, es necesario monitorear el puente durante la prueba. Típicamente, se monitorea las deflexiones, fisuras y deformaciones del puente [38]. Adicionalmente se puede monitorear las emisiones acústicas para evaluar fisuras al nivel microscópico [39]. Después de la prueba de carga, tenemos una respuesta directa sobre la seguridad del puente.



Figura 2. Prueba de carga en el puente Zijlweg.

5. Manejo integral de puentes

Para el manejo integral de puentes, se recomienda los siguientes acciones a los propietarios de puentes del país y acciones de investigación dirigido a la situación en el país:

- usar sistemas de administración de puentes, para acoplar la información disponible de los puentes existentes del país. La información debería incluir los planos, informes de inspección, informes de cálculo original e informes de análisis.
- analizar la red vial entera y tomar decisiones sobre el manejo de los puentes a base del impacto a la red vial.
- tomar decisiones sobre los mejores acciones de los puentes existentes a base del costo económico, ecológico y social y hacer ese análisis en función del tiempo para determinar el momento ideal dentro de la vida útil del puente para hacer una intervención [40-44].
- monitorear puentes en regiones aislados o puentes importantes a través de sensores y desarrollar métodos de análisis para los datos medidos por los sensores, para crear un alerta cuando cambia el comportamiento estructural del puente.
- medir las cargas y frecuencia de camiones en la red vial a través de WIM (weigh in motion) para estudiar la variabilidad de carga representativa del país.
- desarrollar factores de carga para puentes existentes en el país a base de las cargas vivas medidas.
- desarrollar un plan para el fin de vida útil de los puentes. Se podría reusar materiales como agregados reciclados en pavimentos y cimentaciones.

6. Conclusiones

El sector de la construcción en el país tiene la responsabilidad de volverse en una industria sustentable. En el campo de los puentes, es necesario tener un mejor manejo de los puentes como parte de la red vial y en función del tiempo de la vida útil de la estructura. Entonces, podemos ampliar la vida útil de los puentes existentes:

- con mejores métodos de inspección
- mejores métodos de mantenimiento y rehabilitación, y
- mejores métodos de evaluación.

En términos de mejores métodos de evaluación, ese artículo demuestra los métodos desarrollados a base de la investigación actual. Finalmente, el artículo recompila sugerencias para los propietarios de los puentes y los investigadores en el país para temas que resultaran en una vida útil más larga de los puentes existentes, una red vial más segura y una mejor sustentabilidad de la red vial nacional.

Referencias

1. IPCC. *Special Report: Global Warming of 1.5°C*; 2018.
2. Ahmed, B. Who takes responsibility for the climate refugees? *International Journal of Climate Change Strategies and Management* **2018**, *10*, 5-26, doi:10.1108/IJCCSM-10-2016-0149.
3. Bendell, J. Deep adaptation: a map for navigating climate tragedy. *Institute for Leadership and Sustainability (IFLAS) Occasional Papers* **2019**, *2*.
4. Lantsoght, E.O.L.; van der Veen, C.; Walraven, J.C. Prolonging the service life of existing reinforced concrete slab bridges through experimental studies on the shear capacity. In Proceedings of Proceedings of the 1st International Conference Tokyo, Japan; p. 8.
5. Zinke, T.; Ummenhofer, T.; Pfaffinger, M.; Mensinger, M. The social dimension of bridge sustainability assessment - Impacts on users and the public. In Proceedings of Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Lake Maggiore, Italy; pp. 1836-1843.
6. Ryan, T.W.; Mann, E.; E., Z.; Chill, M.; Ott, B.T. Bridge Inspector's Reference Manual. US Department of Transportation, F.H.A., Ed. 2012; p. 2004.
7. Alampalli, S.; Jalinoos, F. Use of NDT Technologies in US Bridge Inspection Practice. *Materials Evaluation, Journal in Nondestructive Testing/Evaluation/Inspection, ASNT* **2009**, *67*, 1236-1246.
8. Deifalla, A.; Ghobarah, A. Strengthening RC T-Beams Subjected to Combined Torsion and Shear Using FRP Fabrics: Experimental Study. *Journal of Composites for Construction* **2010**, *14*, 301-311, doi:doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000091.
9. InSung Kim; Jirsa, J.O.; Bayrak, O. Anchorage of Carbon Fiber-Reinforced Polymer on Side Faces of Reinforced Concrete Beams to Provide Continuity. *ACI Structural Journal* **2013**, *110*, 1089-1098.
10. Astorga, A.; Santa Maria, H.; Lopez, M. Behavior of a concrete bridge cantilevered slab reinforced using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials* **2013**, *40*, 461-472, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.095>.

11. Herbrand, M.; Classen, M. Shear tests on continuous prestressed concrete beams with external prestressing. *Structural Concrete* **2015**, *16*, 428-437, doi:10.1002/suco.201400082.
12. Sayed-Ahmed, M. N-M Interaction for steel jacket retrofitting RC bridge column due to earthquake. **2012**.
13. Yang, C.-S.W.; Werner, S.D.; DesRoches, R. Seismic fragility analysis of skewed bridges in the central southeastern United States. *Engineering Structures* **2015**, *83*, 116-128.
14. Hadl, P.; Pietra, R.d.; Reichel, M.; Tue, N.V. "Integralization" with new UHPC decks for existing motorway bridges. In Proceedings of Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV Leipzig, Germany; pp. 581 - 586.
15. PCA. "Bendable Concrete" Replaces Bridge Expansion Joints. **2016**.
16. Zhang, H.; Šavija, B.; Figueiredo, S.C.; Lukovic, M.; Schlangen, E. Microscale Testing and Modelling of Cement Paste as Basis for Multi-Scale Modelling. *Materials* **2016**, *9*.
17. Yang, Y. Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement - A New Look at an Old Problem. Delft University of Technology, Delft, 2014.
18. Yang, Y.; Walraven, J.; den Uijl, J.A. Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams without Transverse Reinforcement Based on Critical Shear Displacement. *Journal of Structural Engineering* **2017**, *143*, 04016146-04016141-04016113.
19. Lantsoght, E.O.L.; van der Veen, C.; de Boer, A.; Alexander, S.D.B. Extended Strip Model for Slabs under Concentrated Loads. *ACI Structural Journal* **2017**, *114*, 565-574.
20. Lantsoght, E.O.L.; van der Veen, C.; de Boer, A. Proposal for the fatigue strength of concrete under cycles of compression. *Construction and Building Materials* **2016**, *107*, 138-156.
21. Lantsoght, E.O.L.; Van der Veen, C.; Koekkoek, R.; Sliedrecht, H. Capacity of prestressed concrete bridge decks under fatigue loading. In Proceedings of fib symposium 2019, Cracow, Poland.
22. Lantsoght, E.O.L.; Van der Veen, C.; Koekkoek, R.T.; Sliedrecht, H. Fatigue testing of transversely prestressed concrete decks. *ACI Structural Journal* **2019**, *116*, 143-154.
23. Abambres, M.; Lantsoght, E.O.L. Neural network-based formula for shear capacity prediction of one-way slabs under concentrated loads. *engrXiv* **2018**, doi: 10.31224/osf.io/5zst6, 1-33, doi:doi: 10.31224/osf.io/5zst6.
24. Abambres, M.; Lantsoght, E.O.L. ANN-based Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups. *fibers* **2019**, *in press*.
25. OBrien, E.J.; Hajializadeh, D.; Sheils, E.; Enright, B. Estimation of lifetime maximum distributions of bridge traffic load effects. In Proceedings of Proceedings of the Sixt International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Lake Maggiore, Italy; pp. 1482-1488.
26. Rackwitz, R. Reliability analysis - a review and some perspectives. *Structural Safety* **2001**, *23*, 365-395, doi:Pii s0167-4730(02)00009-7 10.1016/s0167-4730(02)00009-7.
27. Nowak, A.S.; Zhou, J.H. SYSTEM RELIABILITY MODELS FOR BRIDGES. *Structural Safety* **1990**, *7*, 247-254, doi:10.1016/0167-4730(90)90073-x.
28. Code Committee 351001. *Assesment of structural safety of an existing structure at repair or unfit for use - Basic Requirements, NEN 8700:2011 (in*

- Dutch*); Civil center for the execution of research and standard, Dutch Normalisation Institute: Delft, The Netherlands, 2011; pp. 56.
29. Code Committee 351001. *Assesment of structural safety of an existing structure at repair or unfit for use - Loads, NEN 8701:2011 (in Dutch)*; Civil center for the execution of research and standard, Dutch Normalisation Institute: Delft, The Netherlands, 2011; pp. 26.
 30. De Boer, A.; Hendriks, M.A.N.; den Uijl, J.A.; Belletti, B.; Damoni, C. Nonlinear FEA guideline for modelling of concrete infrastructure objects. In Proceedings of EuroC, St. Anton am Arlberg, Austria; p. 9
 31. Lantsoght, E.O.L.; de Boer, A.; van der Veen, C.; Hordijk, D.A. Optimizing Finite Element Models for Concrete Bridge Assessment With Proof Load Testing. *Frontiers in Built Environment* **2019**, *5*, doi:10.3389/fbuil.2019.00099.
 32. Boer, A.d.; Hendriks, M.A.N.; Lantsoght, E.O.L. Improvements of a nonlinear analysis guideline for the re-examination of existing urban concrete structures. In Proceedings of IABSE 2019 - The Evolving Metropolis, NY, NY.
 33. fib. *Model code 2010: final draft*; International Federation for Structural Concrete: Lausanne, 2012; pp. 676.
 34. Lantsoght, E.O.L.; De Boer, A.; Van der Veen, C. Levels of Approximation for the shear assessment of reinforced concrete slab bridges. *Structural Concrete* **2017**, *18*, 143-152.
 35. Belletti, B.; Hendriks, M.A.N.; den Uijl, J.A.; Damoni, C. Developing standardized guidelines for safety assessment of shear-critical rc beams based on nonlinear finite element modeling. In Proceedings of 3rd fib International Congress, Washington DC; p. 13.
 36. Belletti, B.; Damoni, c.; Hendriks, M.A.N.; Den Uijl, J.A. Nonlinear finite element analyses of reinforced concrete slabs: comparison of safety formats. In Proceedings of VIII International Conference on Fracture Mecahnics of concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8; p. 12.
 37. Lantsoght, E.O.L.; Koekkoek, R.T.; Hordijk, D.A.; De Boer, A. Towards standardization of proof load testing: pilot test on viaduct Zijlweg. *Structure and Infrastructure Engineering* **2017**, *16*.
 38. Lantsoght, E.O.L.; van der Veen, C.; Hordijk, D.A.; de Boer, A. Development of recommendations for proof load testing of reinforced concrete slab bridges. *Engineering Structures* **2017**, *152*, 202-210, doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.018>.
 39. Anay, R.; Cortez, T.M.; Jáuregui, D.V.; ElBatanouny, M.K.; Ziehl, P. On-Site Acoustic-Emission Monitoring for Assessment of a Prestressed Concrete Double-Tee-Beam Bridge without Plans. *Journal of Performance of Constructed Facilities* **2016**, *30*.
 40. Yang, D.Y.; Frangopol, D.M.; Teng, J.-G. Probabilistic life-cycle optimization of durability-enhancing maintenance actions: Application to FRP strengthening planning. *Engineering Structures* **2019**, *188*, 340-349, doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.055>.
 41. Wang, Z.; Yang, D.Y.; Frangopol, D.M.; Jin, W. Inclusion of environmental impacts in life-cycle cost analysis of bridge structures. *Sustainable and Resilient Infrastructure* **2019**, *10.1080/23789689.2018.1542212*, 1-16, doi:10.1080/23789689.2018.1542212.
 42. Liu, L.; Frangopol, D.M.; Mondoro, A.; Yang, D.Y. Sustainability-Informed Bridge Ranking under Scour Based on Transportation Network Performance and

- Multiattribute Utility. *Journal of Bridge Engineering* **2018**, *23*, 04018082, doi:doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001296.
43. García-Segura, T.; Yepes, V.; Frangopol, D.M.; Yang, D.Y. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges. *Engineering Structures* **2017**, *145*, 381-391, doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.013>.
 44. Frangopol, D.M.; Dong, Y.; Sabatino, S. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making. *Structure and Infrastructure Engineering* **2017**, *13*, 1239-1257, doi:10.1080/15732479.2016.1267772.