

Abstract

Bridges, as an important component of infrastructure, are expected to meet all the requirements for a modern society. Traditionally, the primary aim in bridge design has been to achieve the lowest cost while guaranteeing the structural efficiency. However, concerns regarding building a more sustainable future have change the priorities of society. Ecological and durable structures are increasingly demanded. Under these premises, heuristic optimization methods provide an effective alternative to structural designs based on experience. The emergence of new materials, structural designs and sustainable criteria motivate the need to create a methodology for the automatic and accurate design of a real post-tensioned concrete bridge that considers all these aspects. For the first time, this thesis studies the efficient design of post-tensioned concrete box-girder road bridges from a sustainable point of view. This research integrates environmental, safety and durability criteria into the optimum design of the bridge. The methodology proposed provides multiple trade-off solutions that hardly increase the cost and achieve improved safety and durability. Likewise, this approach quantifies the sustainable criteria in economic terms, and evaluates the effect of these criteria on the best values of the variables.

In this context, a multi-objective optimization is formulated to provide multiple trade-off and high-performing solutions that balance economic, ecologic and societal goals. An optimization design program selects the best geometry, concrete type, reinforcement and post-tensioning steel that meet the objectives selected. A three-span continuous box-girder road bridge located in a coastal region is selected for a case study. This approach provides vital knowledge about this type of bridge in the sustainable context. The life-cycle perspective has been included through a lifetime performance evaluation that models the bridge deterioration process due to chloride-induced corrosion. The economic, environmental and societal impacts of maintenance actions required to extend the service life are examined. Therefore, the proposed goals for an efficient design have been switch from initial stage to life-cycle consideration.

Faced with the large computational time of multi-objective optimization and finite-element analysis, artificial neural networks (ANNs) are integrated in the proposed methodology. ANNs are trained to predict the structural response based on the design variables, without the need to analyze the bridge response. The multi-objective optimization problem results in a set of trade-off solutions characterized by the presence of conflicting objectives. The final selection of preferred solutions is simplified by a decision-making technique. A rational technique converts a verbal pairwise comparison between criteria with a degree of uncertainty into numerical values that guarantee the consistency of judgments. This thesis gives a guide for the sustainable design of concrete structures. The use of the proposed approach leads to designs with lower life-cycle cost and emissions compared to general design approaches. Both bridge safety and durability can be improved with a little cost increment by choosing the correct design variables. In addition, this methodology is applicable to any type of structure and material.

Resumen

Los puentes, como parte importante de una infraestructura, se espera que reúnan todos los requisitos de una sociedad moderna. Tradicionalmente, el objetivo principal en el diseño de puentes ha sido lograr el menor coste mientras se garantiza la eficiencia estructural. Sin embargo, la preocupación por construir un futuro más sostenible ha provocado un cambio en las prioridades de la sociedad. Estructuras más ecológicas y duraderas son cada vez más demandadas. Bajo estas premisas, los métodos de optimización heurística proporcionan una alternativa eficaz a los diseños estructurales basados en la experiencia. La aparición de nuevos materiales, diseños estructurales y criterios sostenibles motivan la necesidad de crear una metodología para el diseño automático y preciso de un puente real de hormigón postesado que considere todos estos aspectos. Por primera vez, esta tesis estudia el diseño eficiente de puentes de hormigón postesado con sección en cajón desde un punto de vista sostenible. Esta investigación integra criterios ambientales, de seguridad estructural y durabilidad en el diseño óptimo del puente. La metodología propuesta proporciona múltiples soluciones que apenas encarecen el coste y mejoran la seguridad y durabilidad. Al mismo tiempo, se cuantifica el enfoque sostenible en términos económicos, y se evalúa el efecto que tienen dichos criterios en el valor óptimo de las variables.

En este contexto, se formula una optimización multiobjetivo que proporciona soluciones eficientes y de compromiso entre los criterios económicos, ecológicos y sociales. Un programa de optimización del diseño selecciona la mejor combinación de geometría, tipo de hormigón, armadura y postesado que cumpla con los objetivos seleccionados. Se ha escogido como caso de estudio un puente continuo en cajón de tres vanos situado en la costa. Este método proporciona un mayor conocimiento sobre esta tipología de puentes desde un punto de vista sostenible. Se ha estudiado el ciclo de vida a través de la evaluación del deterioro estructural del puente debido al ataque por cloruros. Se examina el impacto económico, ambiental y social que produce el mantenimiento necesario para extender la vida útil del puente. Por lo tanto, los objetivos propuestos para un diseño eficiente han sido trasladados desde la etapa inicial hasta la consideración del ciclo de vida.

Para solucionar el problema del elevado tiempo de cálculo debido a la optimización multiobjetivo y el análisis por elementos finitos, se han integrado redes neuronales en la metodología propuesta. Las redes neuronales son entrenadas para predecir la respuesta estructural a partir de las variables de diseño, sin la necesidad de analizar el puente. El problema de optimización multiobjetivo se traduce en un conjunto de soluciones de compromiso que representan objetivos contrapuestos. La selección final de las soluciones preferidas se simplifica mediante una técnica de toma de decisiones. Una técnica estructurada convierte los juicios basados en comparaciones por pares de elementos con un grado de incertidumbre en valores numéricos que garantizan la consistencia de dichos juicios. Esta tesis proporciona una guía que extiende y mejora las recomendaciones sobre el diseño de estructuras de hormigón dentro del contexto de desarrollo sostenible. El uso de la metodología propuesta lleva a diseños con menor coste y emisiones del ciclo de vida, comparado con diseños que siguen metodologías generales. Los resultados demuestran que mediante una correcta elección del valor de las variables se puede mejorar la seguridad y durabilidad del puente con un pequeño incremento del coste. Además, esta metodología es aplicable a cualquier tipo de estructura y material.

Resum

Els ponts, com a part important d'una infraestructura, s'espera que reunisquen tots els requisits d'una societat moderna. Tradicionalment, l'objectiu principal en el disseny de ponts ha sigut aconseguir el menor cost mentres es garanteix l'eficiència estructural. No obstant això, la preocupació per construir un futur més sostenible ha provocat un canvi en les prioritats de la societat. Estructures més ecològiques i durables són cada vegada més demandades. Davall estes premisses, els mètodes d'optimització heurística proporcionen una alternativa eficaç als dissenys estructurals basats en l'experiència. L'aparició de nous materials, dissenys estructurals i criteris sostenibles motiven la necessitat de crear una metodologia per al disseny automàtic i precís d'un pont real de formigó posttesat que considere tots estos aspectos. Per primera vegada, esta tesi estudia el disseny eficient de ponts de formigó posttesat amb secció en calaix des d'un punt de vista sostenible. Esta investigació integra criteris ambientals, de seguretat estructural i durabilitat en el disseny òptim del pont. La metodologia proposada proporciona múltiples solucions que a penes encarixen el cost i milloren la seguretat i durabilitat. Al mateix temps, es quantifica l'enfocament sostenible en termes econòmics, i s'avalua l'efecte que tenen els dits criteris en el valor òptim de les variables.

En este context, es formula una optimització multiobjectivo que proporciona solucions eficients i de compromís entre els criteris econòmics, ecològics i socials. Un programa d'optimització del disseny selecciona la millor geometria, tipus de formigó, armadura i posttesat que complisquen amb els objectius seleccionats. S'ha triat com a cas d'estudi un pont continu en calaix de tres vans situat en la costa. Este mètode proporciona un major coneixement sobre esta tipologia de ponts des d'un punt de vista sostenible. S'ha estudiat el cicle de vida a través de l'avaluació del deteriorament estructural del pont a causa de l'atac per clorurs. S'examina l'impacte econòmic, ambiental i social que produïx el manteniment necessari per a estendre la vida útil del pont. Per tant, els objectius proposats per a un disseny eficient han sigut traslladats des de l'etapa inicial fins a la consideració del cicle de vida.

Per a solucionar el problema de l'elevat temps de càlcul degut a l'optimització multiobjectivo i l'anàlisi per elements finits, s'han integrat xarxes neuronals en la metodologia proposada. Les xarxes neuronals són entrenades per a predir la resposta estructural a partir de les variables de disseny, sense la necessitat d'analitzar el pont. El problema d'optimització multiobjectivo es tradueix en un conjunt de solucions de compromís que representen objectius contraposats. La selecció final de les solucions preferides se simplifica per mitjà d'una tècnica de presa de decisions. Una tècnica estructurada convertix els juís basats en comparacions per parells d'elements amb un grau d'incertesa en valors numèrics que garanteixen la consistència dels dits juís. Esta tesi proporciona una guia que estén i millora les recomanacions sobre el disseny d'estructures de formigó dins del context de desenrotllament sostenible. L'ús de la metodologia proposada porta a dissenys amb menor cost i emissions del cicle de vida, comparat amb dissenys que segueixen metodologies generals. Els resultats demostren que per mitjà d'una correcta elecció del valor de les variables es pot millorar la seguretat i durabilitat del pont amb un xicotet increment del cost. A més, esta metodologia és aplicable a qualsevol tipus d'estructura i material.