橋梁用高性能鋼材を用いたプレートガーダー橋の構造最適化

東京工業大学　フェロー　三木千壽　　東京工業大学　　横関耕一
東京工業大学　正会員　鈴木啓吾

1　はじめに

日本の鋼橋建設コストは欧米に比べ高価であり，アメリカと比較すると約 2 倍であることは，すでに指摘されていることである．この差異には種々の原因がある．設計の違いもその 1 つであり，結果として重い橋梁構造となっている. 日本では長く許容応力度設計法(ASD)が使われてきたが，世界的には荷重抵抗係数設計法(LRFD)や限界状態設計法(LSD)が主流となりつつある. また多くの分野で，設計に際して FEM 解析が一般的であるが，日本の鋼橋設計は未だにはり理論ベースである．さらに，アメリカ，韓国，ヨーロッパなどでは加工性，溶接性を向上させた高性能鋼材が開発され，適用が拡大している．日本でも橋梁用高性能鋼材(BHS)が JIS 規格化され，その効果が期待されている．しかしその適用はまだ少ない.

本研究では BHS を適用した鋼橋の最適化構造を各支間で提案する．設計に際しては，設計手法の改善，FEM の導入により，鋼重の軽減を目指す．また I 桁橋は日本では支間 40m 程度への適用が主であり, 最大でも 70m 程度までとなっているが，その長支間化を検討する.

2　設計

本研究では降伏強度が 400, 500, 700MPa である BHS400, 500，700 を使用する．BHS は加工性や溶接性の向上により製作コストの縮減が見込めるが，今回は鋼重のみを目的関数として最適化を行う．設計手法は基本的に土木学会，鋼・合成構造標準示方書の LRFD に従い，係数の設定で不十分な箇所は AASHTO などを参考に適宜補った．照査は架設，終局限界，使用限界，疲労限界の各状態で行った．各照査項目を**表 1** に示す．鋼桁の永久変形の項目は，過積載などの厳しい荷重条件下で，フランジに発生する応力が過大にならないよう制限している．また，ウェブとフランジで異なる鋼種を適用するハイブリッド桁を採用し，フランジの鋼種にかかわらずウェブは BHS400 とした.

3　対象橋梁

対象橋梁は 2 径間連続合成 2 主 I 桁橋で，その断面を**図 1** に示す．支間長は 40m から 120m まで 10m きざみにモデルをつくった．ここではコスト削減につながると考えられる工夫を取り入れる．すなわち，断面変化は現場継ぎ手部のみとし，工場で組み立てる 1 ブロック内では同断面，またフランジ幅および桁高は全ブロックで統一，フランジ板厚は橋梁の規格化も考慮して 5mm きざみで設計することにした．なおウェブは 1mm 単位で設計した．1 ブロックは陸上輸送制限から，長さ 13m，高さ 3m までとし，桁高 3m をこえるときは現場水平継ぎ手を施すこととした. 活荷重区分は B 活荷重とした. 疲労強度は D, E，F 等級とし，日大型車設計交通量(ADTT)は 10000 台/車線とした.

4　最適化

一般に最適解を求めるためには多くの計算ステップを要する．**図 2** に示すような局所解へ陥るのを避け，最適解を求める必要がある. 本研究では FEM をベースとしているが，FEM は計算負荷が高く，最適解を求めるには多大な時間を要するため，**図 3** に示すように，従来のはり理論によって大域解を求め, その上で FEM によって最適解を求めることにした．なお鋼種配置の検討もはり理論による解析時に同時に行った.

表 1　照査項目

	照査項目	参照元
一般項目	最小板厚	JSCE
	圧縮フランジ幅厚比	AASHTO
終局限界状態および架設時	ウェブ幅厚比	AASHTO
	曲げモーメント	JSCE
	せん断力	JSCE
	合成応力度	JSCE
使用限界状態	たわみ制限	道路橋示方書
	鋼桁の永久変形	AASHTO
疲労限界状態	疲労破壊	疲労設計指針

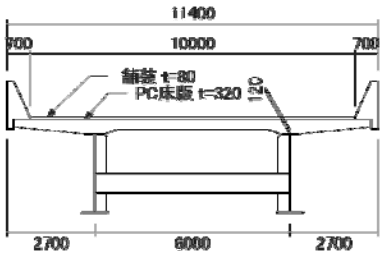

図 1　対象橋梁断面

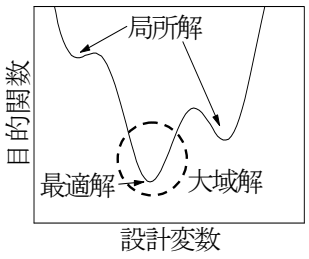

図 2　最適解と局所解

キーワード　BHS，LRFD，FEM，桁橋，最適設計

連絡先　　〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 M1-2 東京工業大学土木工学科三木研究室　TEL03-5734-2596

5 結果

水平補剛材無し，有りの 2 ケースについて最適化を行った．図 4 に示すように FEM の適用前後では断面の減少が見られ，支間中央では平均-16.8%，中間支点上では平均-19.1%であった．これは床版の荷重分配効果により片方の主桁がもつ荷重が減ったことや，図 5 に示すように支承に幅を持たせたことで中間支点上の応力集中を回避したことなどの効果と考えられる．

図 6 に示すように，支間中央の正曲げが大きい区間での断面決定要因は，短支間では疲労が支配的となり，長支間では架設時強度や，鋼桁の永久変形が支配的となった．中間支点付近の負曲げが大きい区間では全ての支間で終局限界が支配的となった．特に負曲げの厳しい中間支点上付近では，支間が長くなるにつれ，より高強度鋼を配置したケースが最適解となった．

各疲労等級の結果について，使用鋼重を橋梁床面積で割ったものを図 7 にプロットした．使用鋼重は主桁，補剛材，横桁を考慮している．また図には国内およびアメリカ(HPS を適用した鋼橋)の連続桁橋の鋼重もプロットしてある．最適化結果は短支間(L≦70m)では 1 橋を除く全ての既存橋梁よりも軽い結果となっている．ただし，従来短支間橋梁に使われていた鋼材よりも，高強度の材料を使っている影響も含んでいる．また，図の破線は国内での合成 I 桁の近似直線であるが，これに対し補剛材無しのモデルで 80kg/m^2 程度，有りのモデルでは 90kg/m^2 程度の差がついた．長支間(L≧90m)においては FEM の適用による断面減少率が大きく，アメリカの I 桁に対しても十分競争力のある結果となった．

6 まとめ

BHS 鋼材を使用した連続合成 2 主 I 桁の最適設計を行った．LRFD による設計，さらに FEM の導入により，既存鋼橋に比べ，大きく鋼重を低減することができた．また長支間でも I 桁を適用することで鋼重低減ができることが明らかとなった．さらに詳細な照査が必要ではあるが，このような断面を適用すれば，鋼橋の大幅なコスト削減が可能である．

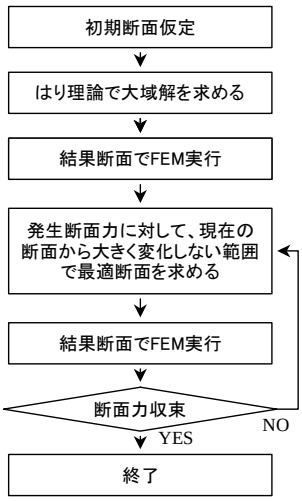

図 3 最適化の流れ

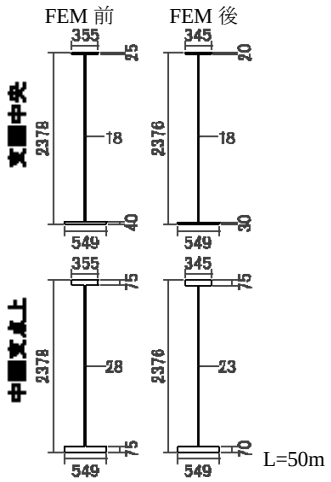

図 4 FEM 前後の断面変化

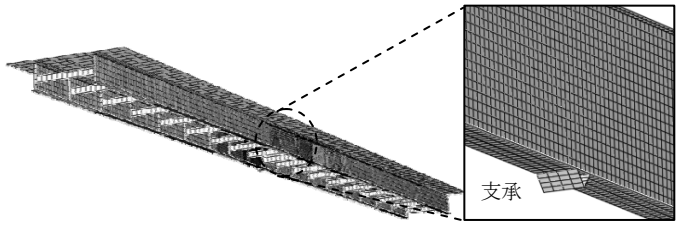

図 5 FEM モデル

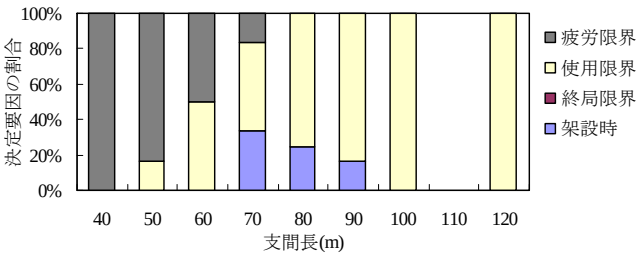

図 6 疲労等級 E での正曲げ区間の断面決定要因

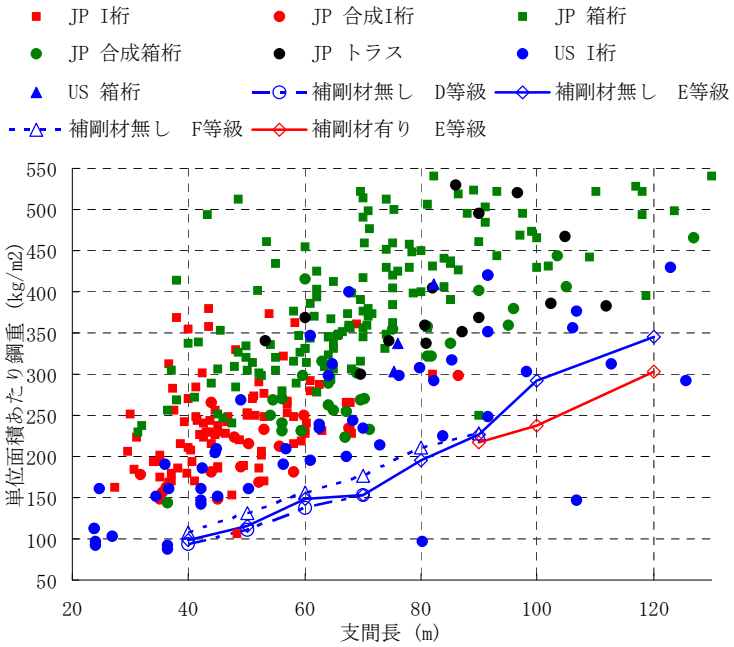

図 7 結果および既存橋梁の鋼重

参考文献

土木学会:新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書(2009)

土木学会:鋼・合成構造標準示方書(2007)

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2004)

小西拓洋:鋼橋の構造および設計の合理化，東工大学位論文(2001)

山沢，野上，三木:立体挙動を考慮した連続合成桁中間部の合理化設計の基礎的研究，構造工学論文集 vol.47A，pp.1153-1160(2001)