

信頼性理論に基づく鋼およびコンクリートの橋桁の曲げ耐荷力安全性に関する基礎的研究

大阪市立大学大学院 正会員 小原 菜美子 大阪市立大学大学院 正会員 北田 俊行
 大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司 大阪市立大学大学院 正会員 松村 政秀

1. 本研究の背景・目的

近年、種々の制約条件のもとで合理的かつ経済的な橋梁を建設するという観点から、鋼部材およびRC・PC部材を組み合わせた複合構造橋梁が注目されている。このような構造物の設計では、各部材が独立な設計基準で設計されており、異種部材から成る構造物全体としての各種限界状態を統一的に議論することは不可能である。したがって、より合理的な複合構造物を設計するために、統一的な基準の下で構造物の挙動を議論できる設計手法の確立が望まれている。そこで、本研究では、現行設計法で試設計された単純桁橋の各種限界状態における曲げ耐荷力安全性を、信頼性理論に基づく破壊確率および信頼性指標をもとに比較・検討を行っている。

2. 対象モデル橋の設定

単純桁橋を基本に、表-1 に示す鋼非合成桁橋、鋼合成桁橋、RC 桁橋、およびPC 桁橋の計7 橋を対象とした。

表-1 対象とする橋梁形式とその設計条件

橋梁名	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	D-1	D-2
橋梁形式	単純鋼非合成桁橋		単純鋼合成桁橋		単純RC桁橋	単純PC桁橋	
支間長 (m)	29.0	39.0	34.0	44.0	15.0	30.0	40.0
主桁本数 (本)	4	4	4	4	4	5	5
桁高 (mm)	1700	2200	1700	2200	1500	1800	2200
全幅員 (m)	11.0						
床版厚 (mm)	210	210	210	210	250	200	200
アスファルト舗装厚 (mm)	80						
活荷重	B活荷重-L						

3. 死荷重・活荷重による作用断面力の評価

死荷重による作用断面力は、主桁重量、床版重量、およびアスファルト舗装重量を確率変数として、その他の付属品重量は確定量として扱い算出した。不確定要因としては、製作・施工上における形状寸法のばらつき、単位体積重量のばらつきの2項目を考慮した。表-2 には、橋梁形式別の死荷重による断面力の統計量（平均値および変動係数）を示す。表-2 より、設計死荷重による断面力と死荷重のばらつきを考慮して求めた断面力の平均値とはほぼ等しくなっていることがわかる。橋梁形式別の比較では、コンクリート橋がより設計死荷重に近い値を示しており、ばらつきも小さくなっている。

表-2 橋梁形式別の死荷重による断面力の統計量

橋種	支間長 (m)	対象桁	相対作用断面力		非超過確率		橋種	支間長 (m)	対象桁	着目断面	相対作用断面力		非超過確率	
			平均値	変動係数	90%	95%					平均値	変動係数	90%	95%
鋼非合成桁橋 (A-1,A-2)	30	外桁	1.035	0.012	1.051	1.055	RC桁橋 (C-1)	15	外桁	曲げ(kN・m)	1.015	0.013	1.032	1.037
		せん断(kN)	1.015	0.013	1.032	1.037								
	40	外桁	1.034	0.012	1.049	1.054			内桁	曲げ(kN・m)	1.015	0.013	1.032	1.037
		内桁	1.037	0.013	1.054	1.059				せん断(kN)	1.015	0.013	1.032	1.037
鋼合成桁橋 (B-1,B-2)	35	外桁	1.035	0.012	1.052	1.056	PC桁橋 (D-1,D-2)	30	外桁	曲げ(kN・m)	1.018	0.012	1.033	1.038
		内桁	1.039	0.014	1.058	1.064				せん断(kN)	1.018	0.012	1.033	1.038
	45	外桁	1.034	0.012	1.050	1.054			外桁	曲げ(kN・m)	1.016	0.013	1.033	1.038
		内桁	1.039	0.014	1.057	1.062				せん断(kN)	1.016	0.013	1.033	1.038

活荷重による最大断面力は、荷重列の確率モデルを用いたモンテカルロ・シミュレーションにより評価した。自動車荷重列は、都市高速道路を代表する活荷重列モデル¹⁾と、一般国道を代表する活荷重列モデル²⁾の2種類を用いた。また、走行ケースは着目主桁に影響を与える車線側に突発渋滞を、その反対車線には通常走行（走行ケース1）または夜間走行（走行ケース2）を発生させた2種類を用いた。シミュレーションに用いた活荷重列モデルと走行ケースの組み合わせを表-3 に示す。活荷重による断面力の統計量を荷重列N-1 のケースを例に、活荷重による最大断面力の平均値、変動係数および最大値を表-4 に示す。設計活荷重と比較して最大断面力の平均値は若干小さくなっていることがわかる。非超過確率の相対断面力値を比較すると、全体的に1より小さい値または同程度の値を示しており、道路橋示方書で設定されている活荷重は現実の荷重列を適切に反映していると考えられる。また、支間が長いものほど活荷重が全体荷重に占める割合が小さくなっており、死荷重が支配的となっている。

表-3 活荷重モデルと走行ケースの組み合わせ

ケース名	荷重列モデル	走行ケース
N-1	一般国道モデル	走行ケース1
H-1	都市高速道路モデル	走行ケース1
H-2	都市高速道路モデル	走行ケース2

キーワード 信頼性指標，破壊確率，曲げ耐荷力

連絡先 〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138 大阪市立大学大学院工学研究科橋梁工学分野 TEL06-6605-2735

表-4 橋梁形式別の活荷重による断面力の統計量（N-1）

橋種	支間長 (m)	対象桁	相対作用断面力		非超過確率		活荷重の全体荷重に占める割合
			平均値	変動係数	90%	95%	
鋼非合成桁橋 (A-1,A-2)	30	外桁	0.887	0.075	0.974	1.011	0.476
		内桁	0.902	0.075	0.990	1.029	0.441
	40	外桁	0.876	0.072	0.959	0.993	0.424
		内桁	0.887	0.072	0.971	1.006	0.375
鋼合成桁橋 (B-1,B-2)	35	外桁	0.869	0.086	0.966	1.007	0.461
		内桁	0.917	0.086	1.020	1.063	0.417
	45	外桁	0.886	0.071	0.967	1.003	0.412
		内桁	0.882	0.071	0.964	0.998	0.374

4. 各種限界状態における抵抗値の評価

着目する限界状態に対応する主桁の耐荷力は、FEM解析により算出した。具体的には、使用材料の機械的性質をパラメータとして各種限界状態に対応した主桁の耐荷力を求め、使用材料の機械的性質と耐荷力との関係式を同定する。次に、統計データに基づく使用材料の機械的性質の乱数を得られた関係式を導き、主桁に対する曲げ耐荷力の頻度分布および確率分布形を同定する。対象とした橋梁形式別の限界状態および耐荷力評価において考慮した不確定量を表-5に示す。

表-5 対象とする限界状態とその定義および取り扱う不確定量

橋種	限界状態	定義	取り扱う不確定量
鋼非合成桁橋 (A-1,A-2)	終局限界	曲げ座屈を伴うことによる最大曲げ耐力時	鋼材の降伏点
	降伏限界	鋼材フランジ引張縁の降伏点到達	
鋼合成桁橋 (B-1,B-2)	降伏限界	鋼材フランジ引張縁の降伏点到達	鋼材の降伏点
		コンクリート床版圧縮縁の降伏点到達	コンクリートの圧縮強度
RC桁橋 (C-1)	終局限界	曲げ座屈を伴うことによる最大曲げ耐力時	コンクリートの圧縮強度 引張鉄筋の降伏点
	降伏限界	引張鉄筋の降伏点到達	
PC桁橋 (D-1,D-2)	降伏限界	PC鋼材の降伏点到達	コンクリートの圧縮強度 PC鋼材の引張強度

5. 単純桁橋の曲げ耐荷力安全性の評価

以上の結果より求められた死荷重および活荷重、抵抗値の確率密度関数をもとに破壊関数を定義し、その関数を直接積分し破壊確率を算出した。求めた橋梁形式別の限界状態に対する破壊確率 P_f を表-6に示す。また、破壊関数が正規分布であると仮定した場合の信頼性指標も併せて示す。表-6より、信頼性指標を比較すると、全ての橋梁形式の各種限界状態における信頼性指標は、諸外国基準の目標信頼性指標³⁾より大きくなっている。したがって、道路橋示方書に従って設計した場合、支間長や荷重モデルを変化させてさらに検討する必要はあるが、適切な破壊確率を有していると言える。支間長に注目した場合、鋼非合成桁橋およびPC桁橋の結果から、各限界状態において支間長が長くなるほどその破壊確率も小さくなっていることがわかる。これは、支間長が大きくなると荷重全体に占める死荷重の割合が大きくなり、死荷重は活荷重よりもその変動が小さいために、破壊確率も小さくなったと考えられる。

表-6 橋梁形式別の破壊確率 P_f と信頼性指標

橋種	支間長 (m)	対象桁	限界状態	ケース名			破壊確率 P_f			信頼性指標		
				N-1	H-1	H-2	N-1	H-1	H-2			
鋼非合成桁橋 (A-1,A-2)	30	外桁	終局限界	N-1	5.3×10^{-8}	1.0×10^{-8}	8.8×10^{-8}	5.32	5.61	5.22		
				H-1	9.4×10^{-8}	2.2×10^{-8}	1.5×10^{-7}	5.21	5.47	5.13		
		内桁		H-2	8.9×10^{-11}	1.4×10^{-11}	2.2×10^{-10}	6.38	6.65	6.24		
				H-2	4.9×10^{-13}	8.9×10^{-14}	1.4×10^{-12}	7.13	7.39	6.99		
	40	外桁	降伏限界	N-1	5.3×10^{-5}	1.1×10^{-5}	8.3×10^{-5}	3.88	4.24	3.76		
				H-1	1.3×10^{-4}	3.2×10^{-5}	1.9×10^{-4}	3.66	4.00	3.55		
		内桁		H-2	6.7×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.4×10^{-5}	4.35	4.66	4.19		
				H-2	8.2×10^{-6}	2.4×10^{-6}	1.5×10^{-5}	4.31	4.57	4.17		
鋼合成桁橋 (B-1,B-2)	35	外桁	降伏限界	N-1	6.7×10^{-10}	4.8×10^{-11}	1.5×10^{-9}	6.06	6.47	5.93		
				H-1	1.3×10^{-9}	1.5×10^{-10}	2.6×10^{-9}	5.95	6.30	5.84		
	内桁	H-2		5.5×10^{-9}	6.2×10^{-10}	1.5×10^{-8}	5.71	6.07	5.54			
		H-2		2.9×10^{-8}	7.2×10^{-9}	5.8×10^{-8}	5.42	5.67	5.30			
RC桁橋 (C-1)	15	外桁	終局限界	N-1	2.6×10^{-9}	1.2×10^{-9}	2.7×10^{-9}	5.84	5.96	5.83		
				H-1	3.1×10^{-11}	1.4×10^{-11}	3.3×10^{-11}	6.54	6.66	6.53		
		内桁		H-2	3.2×10^{-8}	1.6×10^{-8}	3.3×10^{-8}	5.41	5.53	5.40		
				H-2	7.9×10^{-10}	3.8×10^{-10}	8.6×10^{-10}	6.04	6.15	6.02		
PC桁橋 (D-1,D-2)	30	外桁	降伏限界	N-1	2.2×10^{-5}	7.7×10^{-6}	3.0×10^{-5}	4.09	4.32	4.01		
	40	外桁	降伏限界	N-1	1.2×10^{-8}	2.4×10^{-9}	2.1×10^{-8}	5.58	5.85	5.48		

6. 結論

- (1) 全ての橋梁に対して各種限界状態における信頼性指標は、諸外国基準の目標信頼性指標より大きい値を示した。したがって、道路橋示方書に従って設計した場合、十分に小さな破壊確率を有していると思われる。
- (2) 支間長に注目した場合、各種限界状態において支間長が長くなるほど、信頼性指標の値は大きくなり、その破壊確率も小さくなる傾向にあった。

謝辞

本研究で用いた単純桁橋の試設計において、建設コンサルタンツ協会近畿支部 鋼・複合橋梁の性能照査型設計法に関する調査研究委員会 静的グループ WG の委員会の皆様には多大な協力をして頂きました。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・HDL委員会：阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究，pp.54-75，1986.12.
- 2) 建設省土木研究所橋梁研究室：限界状態設計法における設計荷重に関する検討，土木研究所資料第2700号，1989.1.
- 3) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，pp.83，2001.10.