2019/10/16 (Wed.) 橋梁技術発表会

鋼鈑桁橋のシステム冗長性と鋼橋設計のこれから

大阪市立大学大学院山口隆司

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)					
	目次 2				
1.	はじめに				
2.	構造システムとしての耐荷性能(桁端)				
3.	構造システムとしての耐荷性能(支間中央)				
4.	構造システムの耐荷性能における構造要素の寄与度				
5.	腐食した桁端部の補修法と構造システムの耐荷性能				
6.	Load Rating による評価				
7.	これからの橋梁設計				

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)	
	3
1 f	



~

部材とシステム

腐食した主桁単体の耐荷力評価に関する実験的・解析的研究は 多数実施されている.

5

4



一般的な鋼I桁橋の構造

鋼鈑桁橋は複数の主桁が床版や分配横桁,対傾構,横構で連結されて おり橋梁システムとして挙動する.

部材・部位の終局≠ 橋梁の終局⇒橋梁システム冗長性

構造システムの評価

橋梁システム挙動を考慮した残存耐荷力の推定および 安全性評価が可能になってきた

6



一般的な鋼鈑桁橋の構造

米国MBEでは, Load Rating = 既設橋梁の(残存)耐荷力評価手法 が規定 □ 評価結果に基づき,交通規制,重量制限の要否が判定 □ 構造部材の現状の損傷度 □ 橋梁の構造冗長性

~

新道示

橋の性能と部材の限界状態

7

//

橋の性能

限界状態1	橋としての荷重を支持する能力が損なわれていない限界の状態								
	部分的に荷重を支持する能力の低下が生じているが,橋としての								
限界状態2	荷重を支持する能力に及ぼす影響は限定的であり、荷重を支持す								
	る能力があらかじめ想定する範囲にある限界の状態								
限界状態3	これを越えると構造安全性が失われる限界の状態								
部材等の限界状態									
限界状態1	部材等としての荷重を支持する能力が確保されている限界の状態								
限界状態2	部材等としての荷重を支持する能力は低下しているもののあらかじめ 想定する能力の範囲にある限界の状態								
限界状態3	これを超えると部材等としての荷重を支持する能力が完全に失われる 限界の状態								



構造システムの安全性

- A) 最初の部材損傷に対して合理的な安全性を提供できる.
- B) 最も厳しい荷重に対してもシステムの終局に至らない.
- C) 想定荷重下において過度の変形が生じない.
- D) ある構成部材が損傷した後も交通荷重に耐えうることがで きる
- a) It provides a reasonable safety level against first member failure
- *b)* It does not reach its ultimate system capacity under extreme loading conditions
- *c)* It does not produce large deformations under expected loading conditions
- d) It is able to carry some traffic loads after damage to a component

NCHRPによる限界状態の定義 ¹⁰							
限界状態	定義						
部材破断状態 Member Failure	 ▶ 個々の部材の安全性を弾性解析や公称値を用いて行う従来の照査 ▶ ある部材が破断する前の橋梁構造が荷重に抵抗できる耐荷力を Lf₁とする 						
終局限界状態 Ultimate Limit State	▶ 健全時の橋梁システムの終局状態 ▶ 橋梁全体系の崩壊メカニズムの形成時の耐荷力をLf _u とする						
機能限界状態 Functionality Limit State	▶ 橋軸方向部材のたわみが支間長/100に達する時の最大活荷重をLf _f とする						
損傷時状態限界 Damaged Condition Limit State	 ▶ 主要耐力部材が損傷した後の橋梁システムの耐荷力をLf_dとする ▶ 全橋モデルから部材(FCM)を除去したモデルが用いられる 						

NCHRP SYNTHESIS 354 より引用

System Reserve Ratio SSR

11

System Reserve Ratio



Figure 2.1. Representation of typical behavior of bridge systems.

NCHRP Report 776Bridge System Safety and Redundancy より引用

System Reserve Ratio SSR

System Reserve Ratio

 $R_{\mu} = LF_{\mu}/LF_{1} \ge 1.30$ 健全時の構造システムの最大耐力は仮定FCM破断耐力の 130%以上であること $R_f = LF_f / LF_1 \ge 1.10$ 健全時の構造システムの機能限界耐力は仮定FCM破断耐 <u>カの110%以上であること</u> $R_d = LF_d / LF_1 \ge 0.50$ 損傷時の耐力(FCM破断含む)は仮定FCM破断耐力の50% 以上であること





橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.) 14 11 \rightarrow 2. 構造システムとしての耐荷性能(桁端)





◆3主桁,5主桁橋梁のモデリング
 <同条件>支間長,主桁間隔,桁高,ウェブ厚
 <変更点>上下フランジ厚,支点上補剛材厚
 ⇒設計余裕度を同程度に調整



解析条件

- Abaqus/Standard ver2016
- ・材料および幾何学的非線形性を考慮
- ・荷重: 死荷重+B活荷重 <u>α(D+L)</u>
- ・腐食損傷による減肉率は一律50%と仮定
- ・腐食範囲は腐食分布調査実績に基づく















- ▶ 4G_I_L-G2と4G_D-All_L-G2の支点反力分担率の推移は比較的 小さい.
- ▶ 4G_D-G1_L-G2では、G1桁が最大耐力に到達し分担率が低下したとほぼ同時にG2桁の分担率が増加、その後G3桁も分担率が増加した

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)	
	23
府合 4 個 位 罟 に トス 県 大 芹 舌 体 家 の ド 読	
肉皮頂 回に こ の 取 八 川 主 口 平 リ 山 料	



~

外桁損傷時

b) 外桁損傷時 *D-G1*, 外桁着目 *L-G1* b-1) 3主桁 b-2) 4主桁











中桁損傷時

26

c) 中桁損傷時 中桁着目

c-1) 3主桁 c-2) 5主桁_G3桁

















対象橋梁および解析モデル

■ 解析ケース

解析ケース	腐食損傷	腐食桁	活荷重	荷重配置	載荷方法
3G_D-G2_L-G2	50%	G2 End		G2	
4G_D-G2_L-G2	50%	G2 End	B活荷重	G2	α (D+L)
5G_D-G3_L-G3	50%	G3 End		G3	

- 主桁本数:3本,4本,5本
- ・ 腐食箇所: 中桁桁端(G2orG3桁)
 が腐食している場合
- 腐食量:50%減厚
- 床版と鋼桁のモデル化:完全合成
- 活荷重:B活荷重(腐食桁着目)を 載荷



32

検討結果(3主桁)

33

■ 3本主桁の場合(3G_D-G2_L-G2)

- G2桁の最大耐力到達後も、構造システムが機能しαmax=1.59まで 荷重倍率は増加する.
- 支点反力の載荷初期時の荷重分担率は、いずれの主桁も30%~ 40%であったものが、最大荷重倍率時にはG2桁が15%程度に、最 G1が50%程度に変化し、G3が35%程度は変化が小さい。



 \rightarrow

検討結果(4主桁)

34

■ 4本主桁の場合(<mark>4G_D-G2_L-G2</mark>)

- G2桁が早期に最大耐力に到達するが, α max=2.09まで荷重 倍率は増加する.
- 支点反力の荷重分担率は、載荷初期時でそれぞれ20%~ 30%であるが、最大荷重倍率時ではG2桁が10%程度、G4桁 が25%程度、G1およびG3桁は30%を超える分担率になる。



 \rightarrow

検討結果(5主桁)

■ 5本主桁の場合(<mark>5G_D-G3_L-G3</mark>)

 G3桁が早期に最大耐力に到達するが, αmax=2.29まで荷重 倍率は増加する.

35

 荷重分担率は、載荷初期状態でG2~G4桁がそれぞれ25%程 度分担したいたものが、最大荷重倍率時点ではG3桁が10%程 度に低下し、その他の桁で残りを負担する。




支点反力と水平変位の関係(橋軸方向) 37

損傷桁の最大耐力が半分程度まで減少 健全桁の<u>橋軸方向</u>の耐荷性能への影響は少ない





支点反力分担率の比較(橋軸方向)





損傷桁の最大耐力が半分程度まで減少 健全桁の<u>橋軸直角方向</u>の耐荷性能への影響は少ない





(a) I_EQ-L (変形倍率5倍)



(b) D-G1_EQ-L (変形倍率5倍)

健全時と損傷時の変形モードはほぼ同じ







「橋軸直角方向:健全時ではk=1.4程度, D-ALLではk=0.3~0.4」

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.) 44 11 3. 構造システムとしての耐荷性能(支間中央)



- 47 -	-٢		
円牛1	ノ	1	

46

Case	腐食状況	床版と主桁の結合モデル
RC_I	腐食なし	
RC_D-G1-50	50%減厚	完全合成
RC_D-G1-100	100%減厚	
SC_I	腐食なし	
SC_D-G1-50	50%減厚	不完全合成
SC_D-G1-100	100%減厚	
NC_I	腐食なし	
NC_D-G1-50	50%減厚	非合成
NC_D-G1-100	100%減厚	

- 腐食箇所: 腐食なし, G1桁の支間部が腐食している場合の2ケース
- 腐食量:腐食なし,50%減厚,100%減厚の3ケース
- 床版と鋼桁のモデル化:完全合成,不完全合成,非合成の3ケース
 ※不完全合成:スラブアンカーを非線形バネ要素でモデル化
- 床版ヤング係数:25Gpa(健全)
- 活荷重:B活荷重(G1桁着目)を載荷





100%腐食時は横構の座屈によって荷重の漸増が無くなる. 横構が荷重分担に寄与し、腐食量が大きい場合は最大耐力に影響

荷重倍率と鉛直変位の関係

49

┃荷重倍率と鉛直変位の関係

- ・ 完全合成→不完全合成→非合成の順に剛性は低く、各桁間の剛性の差も大きい。
- 不完全合成は荷重倍率1程度までは完全合成と同様の挙動 を示し、その後、非合成に近い挙動となる。





| 荷重倍率と鉛直変位の関係

- 不完全合成の場合、スラブアンカーに作用するせん断力は、荷重の増加に伴い、端部から徐々にせん断耐力に達する。
- 不完全合成の場合、スラブアンカーの耐力喪失に伴い、非合成に 近い挙動に推移する。



荷重倍率と主桁剛性の関係

51

「荷重倍率と主桁剛性の関係

- 鋼桁の降伏, 横構の座屈によって段階的に剛性が低下する.
- ・ 腐食量が大きい場合, 鋼桁の降伏の後に横構の座屈によって剛 性が低下する.
- 鋼桁の降伏の進展度合いは鋼桁と床版の結合条件により異なる.



⇒ 床版および横構造が主桁剛性に影響する.

各合成状態と荷重分担率推移の比較 52

H

■ 荷重分担

- ある主桁の荷重分担が変化すると、他の主桁の分担が変化する橋梁システムとしての挙動が見られる。
- 橋梁システムとしての挙動は完全合成の場合が顕著に表れる。



⇒ 床版が各桁間の荷重分配に寄与する.



- 各桁間の鉛直変位の差は完全合成<不完全合成<非合成となり、 腐食量が大きいほど顕著に表れる.
- 最大荷重倍率時の鉛直変位の差は不完全合成≒非合成である.





橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)	
	55
- ※ 4. 構造システムの耐荷性能における構造要素 寄与度	長の







橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)	
	FO
	22
「 府合」たた些立の述体注し	
構造システムの耐荷性能に関する検討	









40%

20%

0%

42%

G1桁損傷



0.0 15 10 5 鉛直変位(mm) 部分補修 全面補修 4G D-G1 AR L-G2 最大荷重倍率

0.5

桁端部で終局

 \rightarrow

6.Load Rating による評価

64

Load Rating で用いる限界状態

65

ロ限界状態の定義

≻使用限界状態 RF_{ser}

ある構造部材の降伏到達時(支点上補剛材十字断面)

➢終局限界状態1 RF_{u1}

ある構造部材の最大耐力到達時

➢終局限界状態2 RF_{u2}

構造システム最大耐力到達時

桁端部の鉛直変位が<u>20mm</u>到達時

各限界状態に達した時の耐力を解析により算出する

使用限界状態 RFser

66

□評価結果

✓ 使用限界状態 RF_{ser}(緑):健全時では, <u>RF=2.5-3.0程度</u> :損傷時では, RF=1.0未満

縦軸:Rating Factor, 横軸:解析ケース



終局限界状態RFu

67

□評価結果

✓ 終局限界状態 RF_{u1}(青):損傷時では, <u>RF=1.0未満</u> ✓ 終局限界状態 RF_{u2}(赤):損傷時では, <u>RF=1.0以上2.0未満</u>



まとめ





 設計の合理化 安全率から部分係数へ 破壊確率評価 (比較が可能) 作用と抵抗 応力照査から断面力照査へ 限界状態(使用限界,終局限界...) 仕様設計から性能照査型設計へ (要求性能と照査指標は??)

許容応力度設計法から限界状態設計法へ 70

初等梁理論とFEM解析

- ・使用限界には初等梁理論で、終局限界には FEM解析で(終局限界も梁理論?)
- FEM解析は信頼できるのか?(V&V, 資格)
- 実験による検証が重要(実験できる施設・人材の維持・確保)

部材設計からシステム設計へ

72

- ・部材設計の積み上げ(部材が安全であれば構 造も安全)
- ・部材の重要度(1次部材, 2次部材, FCM部材)
 を考慮したい

(部分係数,対応する限界状態,作用)

- ・橋の性能から部材の性能へ(逆はない?)
- ・シンプルな構造システム(架設も考慮)


橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.) 技術継承 74 11 ・アーカイブス ・ 持続的な採用(入職者の確保) • 技術開発の重要性

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.)

これからの橋梁設計(まとめ)

75

- FCM部材を設定する
- FCM部材, 1次部材, 2次部材と部材重要度に応じた 設計(疲労設計, 耐震設計も含む)(, 製作)
 →維持管理にも活用
- FCM部材損傷時にも一定耐力確保 (構造システム活用,部材追加など)
- 1次部材損傷時には簡易部材追加などで耐力確保 (構造システム活用)

(システム設計, 階層化, ボトムアップアプローチからの 脱却)

橋梁技術発表会 2019/10/16 (Wed.) これからの橋梁設計(まとめ) 76 4 • 断面力照查. 一部応力照查 • 構造詳細. 取り合い部はFEMを積極活用 (接合部は重要) サブモデリング技術の一般化・マニュアル作成 • 接合部・継手部設計の合理化 (設計手法の高度化) 単一材料にとらわれない (材料と構造の関係は密接)