

合成桁橋の現状と将来展望
—弾性合成桁の可能性—

2023年12月1日
土木学会 複合構造委員会
ものづくり大学 建設学科 教授 大垣 賀津雄

ものづくり大学
INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

自己紹介

大垣 賀津雄(自己紹介)
1961年1月2日 生まれ(大阪市) 62歳
1986年3月 大阪市立大学 工学研究科 前期博士課程修了
1986年4月 川崎重工工業入社

- 首都高速の長大橋
- JHの2主鉄桁
- JH担当設計課長
- 維持管理関連研究

2000年12月 学位取得(長岡技術科学大学)
2015年4月 ものづくり大学 技能工学学部 建設学科 教授
2023年4月 ものづくり大学 技能工学学部長 建設学科 教授

【保有資格】
技術士(建設部門、総合技術監理部門)
技術士補(経営工学部門)
溶接施工管理技術者1級
1級土木施工管理技士
土木鋼構造診断士
コンクリート主任技師
プレストレスト・コンクリート技士

【趣味】
橋の調査、旅行、登山、ゴルフ

かつしかハープ橋

レインボーブリッジ

千島の沢川橋

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OGIKAWA, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

1. はじめに

合成桁橋の現状と将来展望
—弾性合成桁の可能性—

本日の内容

1. はじめに
2. CFRPによる鋼橋の補修補強
3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開
4. **弾性合成桁の可能性**
5. まとめ

2

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OGIKAWA, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

1. はじめに

2018.7

2021.9

①FRP接合による構造物の補修・補強指針
②連続合成桁橋における床版取替え技術

橋梁等の構造物への適用拡大

3

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OGIKAWA, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

背景

- ・高度経済成長時代の橋梁等インフラ構造物の劣化
- ・車両重量等増加, 平成5年のB活荷重(TL-25)導入
- ・平成8年道示改訂で耐震補強が必要

CFRP接合による補修・補強

長所

- 鋼構造物に熱を加えたり, 孔をあけたりしない。
- 高弾性, 高強度, 軽量, 腐食しない, 施工が容易等

4

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OGIKAWA, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

背景・経緯

コンクリート委員会
性能照査型の「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」を
発刊(2000年発刊)

複合構造委員会
FRPによる鋼および複合構造の補修・補強小委員会(H18-H20年度)
新材料による複合技術研究小委員会(H17-H19年度)
維持管理研究小委員会(H17-H19年度)
樹脂材料による複合技術研究小委員会(H21-H22年度)
FRPによるコンクリート構造の補強設計小委員会(H22-H25年度)
FRPと鋼の接合方法に関する調査研究小委員会(H23-H25年度)
2014年制定「複合構造示方書」FRPで補強された部材の性能評価

FRP接合による構造物の補修・補強指針(案)(2018年発刊)

5

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OGIKAWA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

接着接合部の耐力・強度: 作用に応じた破壊形式を考慮して適切に算定する。

■ 接着接合部/定着部の破壊形式の分類

(a) 破壊形式1 (b) 破壊形式2 (c) 破壊形式3 (d) 破壊形式4
 (e) 破壊形式5 (f) 破壊形式6 (g) 破壊形式7 (h) 破壊形式8

6

Bridge & Structural Engineering laboratory

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

指針の特徴

- ①コンクリートのみならず鋼構造物のFRPによる補修・補強設計・施工方法
- ②新しい補強用FRP材料や柔軟性樹脂などの諸元
- ③はく離破壊のメカニズムの考え方や補強された部材の耐久性評価法を規定

この指針の付属資料 2つの試験法を示した。

- ・接合用材料と鋼材との接着試験方法(案)
- ・鋼板との接着接合部における強度の評価方法(案)

参考資料

- ✓ 制定資料: 指針を制定した根拠・バックデータ等の解説
- ✓ CL101で廢盤となる試験法
- ✓ FRP接着により補修・補強した構造物の性能照査例
- ✓ FRP接着による構造物の補修・補強事例

FRP接着による補修・補強指針の統合!

7

2023/2/6 第7回若手技研者のための複合構造セミナー

Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

はじめに

CFRPシート

CFRPストランドシート

トラス格点腐食部補修実験

プレートガードー補強実験

NEXCO総研マニュアル
2013.10~2020.7改訂

NEXCO総研, ものつくり大学, 長岡技大, NSCMの共同研究

8

2023/2/6 第7回若手技研者のための複合構造セミナー

Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

CFRPによる鋼構造腐食部の補修

高伸度弾性パテ材

終局時にFRP がはく離防止

表 ポリウレア高伸度弾性パテ材の諸元

項目	規格値	試験方法
引張強度	8 N/mm ² 以上	K 7161
引張弾性係数	55 N/mm ² 以上, 75 N/mm ² 未満	K 7161
伸び	300%以上, 500%未満	K 7161
鋼材接着強度	1.5 N/mm ² 以上	A 6909 ^{B1}
ガラス転移温度	-15℃以下	K 7121

表 FRP の材料特性

記号	繊維名称	設計厚 mm	単位長さ	
			設計 MPa	実測 MPa
CE	高弾性炭素	0.116	6.40 × 10 ³	7.80 × 10 ³
CU	高強度炭素	0.121	2.40 × 10 ³	2.79 × 10 ³
CS	炭素ストランドシート	0.286	6.40 × 10 ³	7.45 × 10 ³
G	ガラス	0.123	7.40 × 10 ³	1.05 × 10 ⁴
P	高強度ポリエチレン	0.108	8.80 × 10 ³	9.30 × 10 ³
H	ハイブリッド(G/G=1.1)	0.121	3.83 × 10 ³	5.01 × 10 ³

※1: 鋼材上に保護層および塗装を除いた状態で確認すること。

- 鋼とFRPの間にパテ材を挿入するとはく離が抑制可能。
- 弾性係数の低い繊維(G,P)は、はく離し難い。
- 補強後の座屈荷重は、計算により評価可能である。

9

2023/2/6 第7回若手技研者のための複合構造セミナー

Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

CFRPによる鋼構造腐食部の補修

(1) 板桁端部腐食部の補修

- 不陸修正材でR仕上げ, 下フランジ側から連続的にCFRPシートを立上げて貼付補修可能
- 支点上補剛材腐食部も同様に補修可能
- 下部が腐食している桁端腹板の補修と共に、腹板全体のせん断耐力補強が可能

5) 高伸度弾性パテ材
6) 炭素繊維シート
8) 仕上げ塗装
7) 保護層(アラミド繊維)
4) 高伸度弾性パテ材用プライマー(ウレタン樹脂)
3) 不陸修正(エポキシ樹脂パテ)
2) プライマー(エポキシ樹脂)
1) 下地処理

図 下フランジと垂直補剛材や腹板の腐食部補修

10

2023/2/6 第7回若手技研者のための複合構造セミナー

Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

CFRPによる鋼構造部材の補強

(2) 板桁の曲げ耐力補強

図- 曲げ載荷実験結果

- CFRPシートのずらし貼り積層ができない場合でも、パテ材による剥がれ防止効果に期待できる
- CFRPシートによる板桁曲げ耐力補強が可能。

11

2023/2/6 第7回若手技研者のための複合構造セミナー

Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

CFRPIによる鋼構造部材の補強

(3) 鈑桁のせん断耐荷力補強

図-4 せん断耐荷力実験

- CFRPシートによる鈑桁せん断耐荷力補強が可能。
- CFRPシートによる鈑桁曲げ耐荷力補強が可能。

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

CFRPIによる鋼構造部材の補強

(4) 鈑桁の曲げ・せん断耐荷力補強

図- 曲げせん断実験

- CFRPシートによる曲げとせん断を受ける鈑桁耐荷力の補強が可能。
- 各種補強後の耐荷力はFEM解析で評価可能

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

CFRPIによる鋼構造部材の補強

(5) 鋼トラス橋の耐震補強

トラス橋斜材の耐震補強は適用可能

図 実験供試体 図 載荷状態 図 載荷パターン

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

2. CFRPによる鋼橋の補修補強

CFRPIによる鋼構造部材の補強

(5) 鋼トラス橋の耐震補強

※CFRP補強により、圧縮側での座屈強度の向上が見られた。

表 最大荷重と座屈状況

CASE	補強工法	最大荷重 (kN)		強度増加率 (%)		フランジ産屈
		正	負	正	負	
1	補強なし	2427	-2244	0	0	-2θy
2	ずらし貼り(12層)	3000	-2838	24	26	-4θy
3	重ね貼り(12層)	2902	-2610	20	16	-4θy
4	重ね貼り(10層)	2799	-2522	15	12	-4θy

図 荷重-鉛直変位の関係 図 最大鉛直変位の包絡線

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

背景

- 1950年代後半～1970年に建設
- 合成桁の床版は主構造
- 取替えを前提としていない
- 取替え時は鋼桁の耐荷力不足

橋義雄先生遺稿集より(昭和41年)
橋義雄→小松定夫→中井博

大規模更新工事
RC床版取替え

既設合成桁の設計・施工方法
床版取替における課題抽出
取替え後の設計・施工上の課題

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

橋先生の書籍
1966年発刊

目次

第1章 合成桁の概要
1.1 合成桁の特徴と変遷 / 1.2 連続合成桁の種類と設計・施工法 / 1.3 床版取替えにおける課題

第2章 合成桁橋の床版取替え工事の実績調査
2.1 実績調査の概要 / 2.2 実績調査の分析

第3章 接合構造
3.1 プレキャストPC床版同士の接合構造 / 3.2 プレキャスト床版と鋼桁との接合構造

第4章 床版取替えの概要と合成桁橋の床版取替えにおける課題
4.1 床版取替えの概要と特徴 / 4.2 合成桁橋の床版取替えにおける課題 / 4.3 合成桁橋の床版取替え後における主桁設計の考え方

第5章 床版取替え時の主桁の補強法
5.1 合成桁橋の床版取替え時の鋼桁の補強方法 / 5.2 連続合成桁橋の補強における課題と補強方法の提案

第6章 合成度の評価と弾性合成桁
6.1 合成度の評価 / 6.2 連続弾性合成桁橋の水平せん断力と鋼桁

付録1 床版取替え工事の実績調査表
付録2 プレキャスト床版同士の接合構造
付録3 特徴的な合成桁

55年ぶり

2023/12/01 第7回若手技術者のための複合構造セミナー

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

合成桁の概要

連続合成桁の種類

表 連続合成桁の種類

分類	中間支点付近の考え方	施工方法
完全合成桁	プレストレスする連続合成桁	(1) 支間部の先行荷重による工法 (2) ジャッキアップダウンによる工法 (3) PC 鋼線による部分的な縮め工法
	プレストレスしない連続合成桁	中間支点付近も RC 床版と鋼桁が十分合成する程度のずれ止めを配置
	弾性合成桁	全長にわたり柔なずれ止めを設け、中間支点部床版の連続性は確保する。
不完全合成桁	弾性合成桁	正曲げ領域を剛なずれ止め、負曲げ領域を柔なずれ止めと結合する。
	断続合成桁	正曲げ領域を完全合成桁で、負曲げ領域の一部を非合成として設計する。
部分合成桁	死荷重の正曲げ領域を合成とし、負曲げ領域を非合成として設計する。	正曲げ領域を剛なずれ止め、負曲げ領域を柔なずれ止めと結合し、その境界で床版に目地を設ける。

18

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

合成桁の概要

図 各種連続合成桁の構造と床版軸力の相違

非合成桁も実は弾性合成桁
適切に計算すべき

19

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

合成桁橋の床版取替え工事の実績調査

実績調査の概要

- 取替え前または取替え後に合成桁構造である橋梁
- 取替え前後とも非合成構造である橋梁は対象外

事業主体	事例数	実施時期	事例数
国土交通省	9	～ 2000年	8
地方自治体	11	2001年～2005年	8
高速道路会社	26	2006年～2010年	10
非公表	8	2011年～2015年	4
		2016年～2020年	24

合計54件の実績調査結果を収録

20

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

合成桁橋の床版取替え工事の実績調査

実績調査の概要

分析項目	着目点
橋梁構造	取替え前後の主桁と床版との合成の有無
床版厚	取替え前後の床版厚の変化
床版形式	取替え前後の床版形式 (RC/PC, 場所打ち/プレキャスト)
桁と床版との接合構造	主桁と床版との接合方法 (スラブアンカー/馬蹄形ジベル/スタッド)
床版同士の接合構造	プレキャストPC床版の場合の床版同士の接合構造 (PC鋼材による接合/RC継ぎ手), 合成床版の場合の接合構造 (高力ボルト)
中間支点での設計方法	連続桁での中間支点の設計方法 (RC/PC)
主桁の補強	床版取替えに伴う主桁補強の有無および補強方法
スタッドの配置	スタッドをずれ止めとして用いる場合の配置間隔・本数
床版の割付け方法	橋梁線形 (斜角・曲線) による床版の割付け方法

21

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

接合構造

プレキャストPC床版同士の接合構造

これまでの床版取替え工事において採用実績の多い接合構造

22

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

プレキャスト床版と鋼桁との接合構造

23

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

床版取替えの概要と合成桁橋の床版取替えにおける課題

床版取替え方法

- (1) 準備工
- (2) 鋼桁の補強方法
- (3) 既設床版の撤去
- (4) 仮設部材の設置
- (5) ずれ止めの施工
- (6) 取替え床版の設置
- (7) 床版取替え時の形状管理

床版取替えの施工フローチャート
(日本橋梁建設協会, 床版取替え施工の手引き, 2018.9より)

24

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

床版取替えの概要と合成桁橋の床版取替えにおける課題

巻末資料 合成桁橋床版撤去時の事故事例

- 旧銚子大橋(2011年9月28日)
鋼連続合成桁橋の床版撤去後の主桁撤去中に横倒れ座屈が生じ落下。負傷者はなかった。
- 旧月見大橋(2013年9月2日)
鋼単純合成桁橋の床版撤去中に床版が取り除かれた部分を中心として、主桁が逆への字にたわみ崩落。
- 旧浅原橋(2013年12月10日)
鋼単純合成桁橋の床版撤去中に床版を約6m撤去した時点で主桁が座屈し崩落。橋と共に重機も落下。

建設(床版打設)中に仮設材料不足で落橋

25

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

CFRPによる鋼桁の横倒れ座屈強度向上

補強前150kN→CFRP補強後350kN

26

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.2 弾性合成桁

弾性合成桁は、完全合成桁と非合成桁の間の挙動を示す桁であり、単位長さあたりのずれ止めの剛度(パネ定数C)が考慮されている。

微小区間での変形とつり合いから得られる、弾性合成桁の床版と鋼桁の相互に作用する軸力の基礎微分方程式

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \omega^2 N = -\gamma M_0$$

$$\omega^2 = \left(\frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s} + \frac{d^2}{E_c I_c + E_s I_s} \right) C$$

$$\gamma = \frac{d}{E_c I_c + E_s I_s} C$$

文献3)中島章典, 清江慶久: 不完全合成桁の不完全度の簡易推定法. 土木学会論文集, No. 537/1-35, pp. 89~96, 1996. 4

27

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(1) ずれ止め1本あたりのずれ定数とフレキシビリティ定数

単位長さあたりのずれ止めの剛度C (パネ定数)

$$C = k \cdot n_s / L$$

k : ずれ止め1本あたりのずれ定数 (kN/mm)
n_s : 1列あたりのずれ止めの数
L : ずれ止めの配置間隔 (mm)

弾性合成桁における合成効果(合成度)を表す指標として、次式に示すようなフレキシビリティ定数s

$$s = \sqrt{C_0 / C}$$

C₀ : 単位長さあたりの基準のパネ定数 (1.96kN/mm/mm)
C : 単位長さあたりのずれ止めの剛度 (パネ定数kN/mm/mm)

28

3. 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(1) ずれ止め1本あたりのずれ定数とフレキシビリティ定数s

29

3. 連続合成橋における床版取替技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(1) ずれ止め1本あたりのずれ定数とフレキシビリティ定数S

「頭付きスタッドの押抜きせん断試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状」に準じてずれ定数を用いたフレキシビリティ定数の試算

d_s (mm)	f_{sd} (N/mm ²)	k (kN/mm)	L (mm)	n (本)	C (kN/mm/mm)	S	桁タイプ
22	30	242	150	3	4.84	0.64	合成桁
			300	3	2.42	0.90	合成桁*1
			600	3	1.21	1.27	合成桁*1
			1000	2	0.48	2.01	非合成桁*2

*1 : 道路橋示方書に従って、桁端部の水平せん断力が合成断面となるように設計する必要がある。
 *2 : 非合成桁として設計するが、弾性合成に分類される

30

3. 連続合成橋における床版取替技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(2) フレキシビリティ定数Sに応じた弾性合成桁の応力分布

単純支持モデルに対して、フレキシビリティ定数Sの違いによる弾性合成桁応力分布（温度差、等分布荷重、支間中央載荷）を試算

RC: 2250 x 240 (n=7)

UF : 310 x 16
 Web : 1600 x 9
 LF : 490 x 28

温度差 (鋼桁+10°C)
 等分布載荷 ($q = 20\text{N/mm}^2$)
 支間中央載荷 ($P = 200\text{kN}$)

31

3. 連続合成橋における床版取替技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(2) フレキシビリティ定数Sに応じた弾性合成桁の応力分布

等分布荷重によって生じる応力分布

32

3. 連続合成橋における床版取替技術の現状と展開

6章 合成度の評価と弾性合成桁

6.1.3 合成度の評価

(2) フレキシビリティ定数Sに応じた弾性合成桁の応力分布

ずれ止めに作用する水平せん断力分布(温度差)

「道路橋示方書」に示されるずれ止め
 に生じるせん断力の分布

33

3. 連続合成橋における床版取替技術の現状と展開

まとめ

(1) RC床版取替時の事故

- ・上フランジ幅厚比大きい
- ・建設時の仮設上横構が撤去
- 鋼桁のねじれ座屈や横座屈等に対する鋼桁補強が必要

(2) プレキャスト床版と鋼桁との接合部の問題

- ・合成桁としてのスタッド配置困難
- ・連続合成桁の中間支点部の設計法?
- 弾性合成桁の計算法を適用する等

(1) 補強のタイミングと効果
 (2) 添接による鋼桁の補強
 (3) CFRP接合を用いた鋼桁の補強
 (4) 鋼桁の座屈防止対策
 (5) 外ケーブルによる鋼桁の補強
 (6) CFRP外ケーブルによる鋼桁の補強

合成桁橋の床版取替技術を集約!

34

4. 弾性合成桁の可能性

複合構造の分類

分類 ^①	内容 ^②
I. 合成構造 ^③	部材断面が異種材料の組み合わせによって構成され、一体として作用するもの ^④
a) 合成桁 ^⑤	鋼桁の上に RC 床版をのせ、両者をずれ止めで結合したもの ^⑥
b) H 鋼埋め込み桁あるいは SRC 桁 ^⑦	H 形鋼、あるいは溶接 I 断面鋼梁等を鉄筋コンクリート梁の中に埋め込み、一体として作用させた桁 ^⑧
c) 合成柱あるいは SRC 柱 ^⑨	鉄骨を鉄筋コンクリートの中に埋め込み、一体として作用させた柱 ^⑩
d) コンクリート充填鋼管 (CFI) ^⑪	鋼管や矩形断面鋼柱の中にコンクリートを充填したもの ^⑫
e) 合成壁 ^⑬	連続した鋼柱列をコンクリートで被覆した壁体構造 (土留めや基礎等) ^⑭
f) 合成床版 ^⑮	鋼製床組みをコンクリートに埋め込んだ床版、鋼板とコンクリートを合成した床版等 ^⑯
g) 合成シェル ^⑰	曲面鋼板とコンクリートを複層に連結した構造 ^⑱
II. 混合構造 ^⑲	異種材料からなる部材を組み合わせた構造システムで連続桁、ラーメン橋、斜張橋等、種々の構造形式がある ^⑳

35

4. 弾性合成桁の可能性

連続合成2主桁橋

BC床版
分配横桁
下横桁
I桁
付横桁
水平補剛材
垂直補剛材

a) 1960年代
b) 1970年代~
c) 省力化を考えた最近の試み

PC床版
分配横桁
付横桁
I桁
垂直補剛材
中間横桁
床版による拘束
トランプ
垂直補剛材
横断面
腹板とその補剛

千鳥の沢川橋
—JH関西支社委員会
大津呂川橋、佐分利川橋

2018.12

36

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁橋

弾性合成構造

高伸度弾性パテ材

終局時にFRPがはく離防止

鋼とFRPの間に柔らかい樹脂

項目	規格値
引張強度	8 N/mm ² 以上
引張弾性係数	55 N/mm ² 以上、75 N/mm ² 未満
伸び	300%以上、500%未満
縦材接着強度	1.5 N/mm ² 以上
ガラス転移温度	-15℃以下

コンクリート床版
鋼筋
FRP
ずれを生じない
ずれを生じる

(a) 完全合成桁
(b) 弾性合成桁

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

フレキシビリティ定数Sとは

$$s = \sqrt{(k_0 \times L_d) / (k \times m)}$$

k_0 : 基準バネ定数1.96(kN/mm/mm)
 k : スタッド1本当たりのバネ定数(kN/mm/本)
 m : 1列当たりのスタッドの本数
 L_d : ずれ止め間隔(mm)

非合成桁として設計している橋のほとんどは、**S=3.0** 以下である。

非合成 $s > 7$
弾性合成
完全合成 $s = 0$

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁押抜き試験1

表 押抜きせん断試験供試体の種類

種類	下部材	先端材	固定上	固定下
CASE 01	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 02	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 03	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 04	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 05	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 06	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 07	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 08	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 09	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 10	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 11	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 12	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 13	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 14	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 15	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 16	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 17	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 18	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 19	FRP	FRP	FRP	FRP
CASE 20	FRP	FRP	FRP	FRP

表 使用材料

材料名	種類	寸法	弾性係数
FRP	FRP	φ13	2.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ22	2.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ30	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ40	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ50	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ60	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ70	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ80	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ90	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ100	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ110	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ120	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ130	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ140	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ150	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ160	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ170	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ180	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ190	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ200	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ210	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ220	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ230	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ240	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ250	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ260	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ270	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ280	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ290	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ300	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ310	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ320	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ330	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ340	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ350	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ360	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ370	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ380	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ390	1.8 × 10 ⁴
FRP	FRP	φ400	1.8 × 10 ⁴

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁押抜き試験2

供試体 CASE	テープの種類	巻付け数	合計厚さ mm	巻付け幅 mm	巻付け高さ mm
0	なし	—	—	—	—
1	ブチルテープ (幅19mm, 厚さ0.5mm)	1	0.5	1	19
2		2	1.0	1	19
3		1	0.5	2	38
4		2	1.0	2	38
5		1	0.5	4	76
6	ビニール補修テープ (幅38mm, 厚さ0.2mm)	1	0.5	6	114
7		1	0.2	1	38
8		1	1.7	1	38
9	熱収縮チューブ (40φ, 収縮後厚さ1.7mm)	1	1.7	1	38+溶植部

- スタッド基部に低弾性テープを巻付けるエリマキスタッドの実験
- 耐力は低下せず、変形をコントロールできる。一少し変形しやすくていい。

スタッドのバネ定数
最大荷重比

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁押抜き試験3

試験体	スタッドの軸径 (mm)	スタッドの長さ (mm)	本数 (本)	配置間隔 (mm)	理論計算最大荷重 (kN)
A1	φ=13	150	16	300	850
A2			12	600	637
A3			8	1000	425
B1	φ=22	150	16	300	2433
B2			12	600	1825
B3			8	1000	1216

- スタッドの配置間隔と軸径によってフレキシビリティ定数を変化可能、載荷点からの距離は関係ない
- スタッドの配置間隔が大きくなれば、フレキシビリティ定数が大きくなる
- 最大耐力は降伏強度が支配的であり、想定可能

スタッド間隔とフレキシビリティ定数
最大耐力

2023/2/21 第7回若手技研者のための複合構造セミナー
Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OKIYAMA, Dr. Eng.

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁FEM解析

部材	実装	材料特性
コンクリートブロック	20節点リソッド要素 (CHK60)	Eurocode2 ($\epsilon_{c1} = 0.0022$, $\epsilon_{c2} = 0.0035$, $f_{cm} = 0.85f_c$)
スタッド	鋼製フランジ	降伏線があるマルチリニア
鋼製材ウェブ	8節点曲面シェル要素 (CO40S)	バイリニア ($E_s = E_c/100$)
付着・滑り摩擦モデル	鋼桁とコンクリート床版の間 スタッドとコンクリート床版の間	Bar要素 Dorrの付着・滑りモデル

●弾塑性解析で変形挙動、耐力がほぼ一致する。
●実橋の挙動が、FEMでシミュレーション可能。

コンクリート スタッド

42

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁FEM解析

橋梁と基礎9月号掲載

●実橋の挙動が、FEMでシミュレーションした結果、FEM解析と理論計算が一致

理論計算

FEM解析

鋼桁応力 床版応力

理論計算とFEM解析を比較

43

4. 弾性合成桁の可能性

プレキャスト床版を有する弾性合成桁

●原則、PCの縦締めを行う
→ループ鉄筋等で接合する

施工順序

提案されている標準的な構造

44

4. 弾性合成桁の可能性

プレキャスト床版を有する合成桁の正曲げ実験

Class 1, Class 2, Class 3, Class 4

コンパクト ノンコンパクト

スレンダー

図1 断面クラスと非モーメント-曲げ関係

図2 実験装置

図3 実験結果

図4 実験結果

弾性合成桁、スタッドが少なくても問題ないか?

45

4. 弾性合成桁の可能性

プレキャスト床版を有する合成桁の負曲げ実験

(c) C-2, C-3 供試体

TYPE A-2 TYPE B-2 TYPE C-2-C-3

図3 供試体形状

弾性合成桁、スタッドが少なくても問題ないか?

46

4. 弾性合成桁の可能性

弾性合成桁橋の設計法提案

橋梁と基礎9月号掲載予定

- 正曲げモーメント領域の鋼桁は、**合成桁設計** [計算法の提案]
- 負曲げモーメント領域は、**鋼桁+鉄筋断面**で断面力算出と応力照査 [計算法の提案]
- 非合成桁設計**でも弾性合成挙動 [挙動の明確化] $S \geq 2.0$ を確保
- 完全合成桁設計においても、**ずれ止め用水平せん断力算出**においては弾性合成の考え方を適用 [現示方書の矛盾点]
- 桁端部付近**のスタッドには弾性合成桁で照査 [現場施工の課題]
- FEM解析により直接的に弾性合成挙動を評価 [計算方法の確立]
- 弾性合成桁設計計算システム化 [計算方法の確立]
- ずれ止めの押抜きせん断試験データ等を整理して、**ずれ止めのパネ定数**を与え、弾性合成桁を適切に評価 [ずれ止めの性能把握]

弾性合成桁の適用が可能!

47

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

落橋はあるのか? **中国ではよくある落橋**



中国特有の問題か、日本では起こらない?

48

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

落橋はあるのか? **突然悲劇が...**

[経過年数]



シルハ-Br [39] ターンバイク橋 [28]

I-35W [40] 聖水大橋 [15] モントリオール高架橋 [35]

49

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

最近では起こっていない?

プラハ吊床版歩道橋 [J. Strasky設計]

開通後33年、年2回の詳細点検と2分おきのセンシング実施中 [詳細点検の2週間後]落橋(2017.12.02)

Myaungmya吊橋, ミャンマー 建設後22年, 2018.04.01落橋 [塔頂変位をモニター中] ↑モニターの目的を明確に ケーブル腐食の放置, 突然、破断→落橋 ↓点検できない部位



重症2名を含む4名が負傷

50

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

最近では起こっていない?

Morandi斜張橋(イタリア, ジェノバ) 2018年8月14日落橋(51歳)

南方澳跨港大橋(台湾) 2019年10月1日落橋(21歳)

原因ワイヤ腐食, 定着部で破断



[住民からのクレーム(←サインかも)] 原因はケーブルの腐食による破断か

51

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

最近では起こっていない?

メキシコシティ地下鉄高架橋崩落 2021年5月3日落橋(8歳)



高木千太郎: 第58回 鈴木俊男さんから学んだこと -突折式吊桶剛橋にチャレンジした恐ろしい胆力は何か-, 構造物ジャーナル, 2021.6 より

52

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー

5. まとめ(落橋コレクションからの提言)

重要なことは? 徐々に(時間かけて)劣化→突然崩壊する →常時モニタリングの意味がない??

完全に調査できるようにすること!!
↑点検アクセスの構築 点検路, 点検車 細部まで見切れるような構造改築

弱点箇所を補強・改築すること!!
↑構造改築 脆弱構造(あれば)の排除 (↑明らかにリダンダンシー低い構造)

ハンガーデッキ 大規模更新の前に →弱点部補強が重要

- FRPや樹脂材料による補修補強工法が求められる。
- 弾性合成など正しい設計・施工法によりカバーする。

53

2023/12/01 第7回若手技師のための複合構造セミナー



ご清聴ありがとうございました。

進化する技・深化する知

ものづくり大学
 INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

54

2023/2/26 第7回若手技師会のための複合構造セミナー Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OHGAKI, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

参考文献

- 1) 土木学会：FRP接着による構造物の補修・補強指針（案）複合構造シリーズ09、2018.7
- 2) 土木学会：連続合成桁における床版取替技術の現状と展開、複合構造レポート17、2021.9
- 3) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル、2013.10
- 4) 杉浦江、大垣賀津雄、長井正嗣、小林朗：炭素繊維シート(CFRP)を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究、第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、2005.11
- 5) 杉浦江、大垣賀津雄、稲葉尚文、富田芳男、長井正嗣、小林朗：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究、土木学会論文報告集A、Vol.64、2008
- 6) 杉浦江、稲葉尚文、小林朗、大垣賀津雄、長井正嗣：炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の補修効果に関する実験的研究、構造工学論文集、54A号、2008.3
- 7) 杉浦江、小林朗、稲葉尚文、本間淳史、大垣賀津雄、長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シート接着による補修技術に関する設計・施工法の提案、土木学会論文集F、Vol.65、No.1、2009
- 8) 奥山雄介、宮下剛、綾方原男、藤野和雄、大垣賀津雄、秀熊佑哉、堀本歴、長井正嗣：鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP接着鋼板の一軸引張試験、構造工学論文集、Vol.57A、2011.3
- 9) 若林大、宮下剛、奥山雄介、秀熊佑哉、小林朗、小出宜夫、堀本歴、長井正嗣：高伸度弾性ハ字材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案、土木学会論文集F、Vol.71、No.1、2015.4
- 10) Ngoc Vinh PHAM, Takeshi Miyashita, Kazuo Ohgaki, Yusuke Okuyama, Yuuya Hidokuma, Takuya Harada. ; Load-Carrying Capacity of Corroded Gussel Plate Connection and its Repair Using CFRP Sheets, ASCE J. Struct. Eng., 2021, 147(6).
- 11) 秀熊佑哉、宮下剛、高藤敦也、奥山雄介、大垣賀津雄、長谷俊彦、原田拓也：溶接近傍に腐食損傷を有する溶接箱形断面柱の圧縮耐力とそのFRP接着補修に関する研究、土木学会論文集、複合特集号、2023.5 (掲載予定)
- 12) 服部雅史、広瀬剛、大垣賀津雄、宮下剛、奥山雄介、小林朗、秀熊佑哉：2軸対称鋼桁のCFRPによる曲げ耐力増強に関する実験的研究、日本鋼構造協会講演論文集、第25巻第9号、2018.9
- 13) 菊地新平、大垣賀津雄、宮下剛、秀熊佑哉、服部雅史：CFRPシート補強による鋼桁腹板のせん断耐力に関する実験的研究、土木学会第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2022.11
- 14) 菊地新平、大垣賀津雄、宮下剛、秀熊佑哉、服部雅史：曲げおよびせん断を受ける鋼桁のCFRPシートによる補強効果に関する実験的研究、土木学会第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2022.11
- 15) 大垣賀津雄、PHAM NGOC VINH、服部雅史、宮下剛、秀熊佑哉、櫻井俊夫：CFRPシートによるトラス橋H形面材の耐震補強に関する実験的研究、土木学会論文集、複合特集号、2023.5
- 16) 秀熊佑哉、大垣賀津雄、宮下剛、服部雅史、後藤直太、櫻井俊夫、PHAM NGOC VINH：CFRPシートで補強した鋼トラス橋の矩形断面下弦材に対する交番載荷実験、土木学会第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、2023. 11

55

2023/2/26 第7回若手技師会のための複合構造セミナー Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OHGAKI, Dr. Eng.

INSTITUTE OF TECHNOLOGISTS

参考文献

- 17) 橋本雄：連続合成桁橋、理工図書、1966.
- 18) 橋本雄、安達義雄：不完全合成桁について、土木学会論文集、No.112196432
- 19) 小松定夫、佐々木孝：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について、土木学会論文報告集、第329号、1983.1
- 20) 中井博、山内幸裕、特田文雄、齋藤敏彦、山本竜太郎：プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合成桁の実験研究、土木学会構造工学論文集、Vol.34A、1988.3
- 21) 中島章典、清江慶久：不完全合成桁の不完全度の簡易推定法、土木学会論文集、No.537/I-35、1996.4
- 22) 大垣賀津雄：既設合成桁の床版取替えにおける設計・施工上の課題について、土木学会、第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集、2018.11
- 23) 土木学会：鋼-コンクリート複合構造の理論と設計、構造工学シリーズ9A、1999.4
- 24) 大垣賀津雄、八幡剛一、中野明弘、中村元、長井正嗣：PC床版連続合成2主桁橋の合理的設計・施工法、土木学会論文集、No.679、IV-51、2001.6
- 25) 大垣賀津雄、PHAM NGOC VINH、渡邊翔一郎、石田学、赤江慎哉、今川雄亮、石川敏之、大久保宣人：プレキャスト床版を有する弾性合成桁のすれ止め性能に関する実験研究、土木学会第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、2021.11
- 26) 大垣賀津雄、PHAM NGOC VINH、今川雄亮、石川敏之、大久保宣人：基脚に低弾性材料を巻付けた頭付きスタッドのバネ定数に関する弾性試験、土木学会第78回年次学術講演会、2023.9 (掲載予定)
- 27) 大垣賀津雄、PHAM NGOC VINH、平本航介、今川雄亮、石川敏之、大久保宣人：コンクリート床版を有する弾性合成桁の頭付きスタッドのバネ定数に関する実験研究、土木学会第12回道路橋床版シンポジウム論文報告集、2022.10
- 28) PHAM NGOC VINH、大垣賀津雄、平本航介、石川敏之、今川雄亮、大久保宣人：弾性合成桁を想定した頭付きスタッド弾性試験の再現に関する解析研究、土木学会第78回年次学術講演会、2023.9 (掲載予定)
- 29) 中井博編者：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988.5
- 30) 稲葉尚文、奥井義昭、長井正嗣、本間淳史、春日井俊博、野呂直以：合成桁の曲げせん断相関強度解明に関する実験的研究、土木学会論文集A巻、66巻3号、2010
- 31) 長井正嗣、稲葉尚文、奥井義昭、宮下剛、平山繁幸、堀見直史：合成桁の正負曲げ及び相関強度評価に関する一考察、土木学会構造工学論文集、Vol.55A、2009.3
- 32) 大城社司、上條崇、奥井義昭、長井正嗣：プレキャスト床版連続合成桁の曲げひび割れ幅に関する実験、土木学会構造工学論文集、Vol.56A、2010.3
- 33) 大垣賀津雄、PHAM NGOC VINH、石川敏之、今川雄亮、大久保宣人：弾性合成桁橋の設計法、橋梁と基礎、建設図書、2023.9

56

2023/2/26 第7回若手技師会のための複合構造セミナー Department of Building, Bridge & Structural Information, Professor Kazuo OHGAKI, Dr. Eng.