

第7回 鋼構造技術継承講演会

「経験豊富な先人に学ぶ次世代への継承技術」

配布資料

令和元年 12 月 5 日

土木学会 鋼構造委員会

構造技術者にとって必要な

工学知識と判断力

恵谷 舜吾

1-1. 構造計画・設計において大事なこと

- ① 必要な知識
 - 基本的（仮定も含め）なことを正しく理解する
- ② 構造物の破壊をイメージする
- ③ 構造システムと力の流れを把握する
- ④ 新しいこと（形式）を採用をする場合は
計画・設計 ⇒ 建設 ⇒ 維持・管理までを一連の対象として捉える
- ⑤ 明確な設計は、不確かな設計より勝っている。
 （設計の選択：G.L.グレッグ著、渡辺茂 訳）
 - 複雑な構造が良く判っている場合は、良く判っている複雑な構造を採用
 - 複雑な構造が良く判っていない場合は、良く判っている単純な構造を採用

① 必要な知識

- 基本的なことを正しく理解する
- 荷重が作用した時の、変形をイメージできるようになることが大切

イ) 単純梁、片持ち梁の断面力（モーメント図、せん断力図）



ロ) 一端が固定で反対側支点がバネ支持の断面力（モーメント図、せん断力図）
● バネ支持だとピン支持と固定端の中間の値になる。

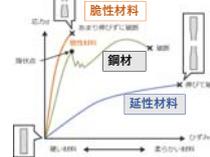


ハ) 静定構造、不静定構造

ニ) 矩形梁の応力： $\sigma = (M/I) \times y$ の理解 ← 【仮定：平面保持則】

σ : 応力
 M : 作用力（曲げモーメント）、
 $I = b \cdot h^3 / 12$: (断面2次モーメント)、 b : 板幅、 h : 板高さ
 y : 中立軸からの距離

ホ) 材料特性



② 構造物の破壊を考える（イメージする）

ーガリレオは『材料と破壊荷重の関係 *1)』を考えたー



ガリレオによる曲げ試験の説明図

* 1) 新科学対話（上）：ガリレオ・ガリレイ（今野武雄、日田節次訳、岩波文庫）
 材料力学史：S.P.ティモシェンコ（殿上武雄監修）鹿島出版会

- ・ ガリレオは、破壊時には抵抗力はBA断面に一律に分布していると考えた（図b）
- ・ このことに対して、フックの法則の発見以降、応力分布は図cのようになると考えられ、ガリレオは誤っているとする書物もある。
- ・ しかし、実際の材料は破壊までフックの法則にしたがうものではなく、応力分布も図cとは異なり、ガリレオの理論による破壊荷重の誤差は小さくなる。
- ・ 大切なのは、ガリレオは破壊荷重を研究していたということ。

③ 構造系と力の流れを考える

例) ハイアット・リージェンシー・ホテル高架通路の崩落*

* 空中通路の崩落事故（橋はなぜ落ちたのか 設計の失敗例：ヘンリー・ベトロフスキー（朝日選書）

● 構造設計の変更により力の流れが変わり、ナットに作用する荷重が（2階+4階）の重さとなり、ナットが破壊。

変更された設計
 4階の荷重
 2階の荷重
 $P + P > P$
 (ナット破壊)

原設計
 4階通路
 3階通路
 2階通路

崩落状態 (写真：ウィキペディア)

1-2. かかわった橋梁と活用した知識

項目	A	B	C	D	E	F
1 9号線辰巳高架橋			○			
2 五色桜大橋(現用アーチ橋)	○					
3 新宿出口				○		

- A: 力の流れ
- B: 良く判っている構造の活用
- C: 計画時から、設計→建設→維持・管理までよく考える
- D: 工学的知識
- E: 判断力(決断力)
- F: その他

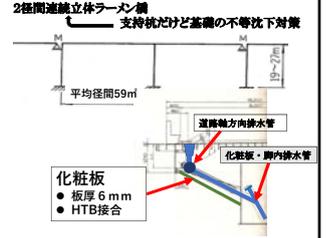
項目	A	B	C	D	E	F
4 ベイブリッジの構造形式・建設	○	○	○	○	○	○
① リンク支持						
② 主塔の耐風安定性				○		
③ ケーブル構造の開発						○
④ 主塔の有効断面長				○		
⑤ 耐震補修設計	○	○				
⑥ 下部工のバージュ工法				○		
⑦ 多中基礎杭工法				○		○
⑧ 台風襲来時のマージンの伏設				○	○	
⑨ 試験ケーソンの自沈				○	○	

2-1. 辰巳高架橋 (美化と排水管の処理計画)

一排水管を化粧板内へ
→ 維持・管理までを考えて排水管施設を計画一



2径間連続立体系アーチ橋



2-2. 辰巳高架橋

一排水施設の維持管理を考えて計画・設計一

- ・ 桁内、脚内排水管：鋼管+亜鉛メッキ
- ・ 換手部は溶接

桁内排水管伸縮継手部 (ドレッサー型伸縮管 G4551)

入孔

下水

脚内排水管の流末処理

脚基部排水施設

2-3. 辰巳高架橋

40年後の鋼製排水管損傷(腐食)状態(2017年)

(損傷概要)

- ・ 内容：鋼製排水管の断面欠損の伴った腐食
- ・ 原因：路面凍結時の凍結防止剤(塩化物イオン)の影響
- ・ 発見：2008年から2013年にかけて鋼製排水管の腐食を発見

位置図

遠景

近景

鋼製排水管の損傷(断面欠損:腐食)

◎反省：排水管の維持・管理に対する設計上の配慮についてはまだまだ工夫が必要
一維持管理に配慮した景観構造の工夫一

3-1. 五色桜大橋(ダブルデッキのニールセン・ローゼ橋)

一良く判っている単純(明確)な構造へ一



② ケーブルの使い方を単純にする = 力の流れの明確化

● 複雑 → 単純な構造

上弦アーチに定着するケーブル2本のうち、一本のケーブルは上層桁を貫通して下層桁に定着

ケーブル：2本

ケーブル：1本

4-1. 新宿出口 (位置図、全体写真)

より安全な構造にする努力
支持層への杭の根入れ長を長くする

- 杭径: 1.2m
- 設計条件
偏心荷重による地盤のクリープ変形を含め、杭頭変位を10cm未満と設定

4-2. 基礎構造図

- 杭径: 1.2m
- 設計条件
偏心荷重による地盤のクリープ変形を含め、杭頭変位を10cm未満と設定

Ps9 Ps8 P10 Ps7 Ps6 Ps5 Ps4 Ps3 Ps2 Ps1

杭長34m 杭長27.5m

根入れ長: 1.2m

Ps8 (新宿出口) P10 (4号線)

横浜ベイブリッジ

5. 上部工
6. 耐震補強
7. 下部工

5-1. 横浜ベイブリッジの概要

全体一般図

600,000 200,000 200,000 200,000

上部水平面

下部水平面

軟弱なシルト層

支持層: 土丹層

端部支持装置 (エンドリンク)

主塔支持装置 (短リンク)

横浜ベイブリッジの概要と構造特性

橋の諸元 (2層構造の道路橋)

- 上層: 首都高速道路 (3車線+3車線)
- 下層: 国道357号 (2車線+歩道) × 2
- 車道片側2車線 (供用)

(上部工)

- 形式: 3径間連続トラス斜張橋
- 橋長: 860m (200+400+200)
- 支持形式: 遊動円木

短リンク (2m 主塔部)

長リンク (10m 端橋脚)

- 主桁: 鋼板箱ガブルデッキトラス
- ケーブル: 11段2面 (NEP PWS)
- 塔高: 172m
- 総重量: 54,000 t (主塔: 31,000 t)

(下部工)

- 基礎形式: 多柱基礎 (杭: φ10m ケーソン)
- 主塔基礎 (9本)
- 端部基礎 (6本)

(固有周期)

横軸方向 (1次): 7.8sec

縦軸直角方向 (1次): 3.6sec

短リンクの復元力特性

応答スペクトル

上部

下部

短リンクの復元力特性に主桁の重量・剛性が寄与
・横軸方向変位が大きくなると、バネ値が強くなる非線形漸硬バネとなる

5-2. 主塔の耐風安定性 - 安全性をより確実に -

風洞実験結果

主塔とケーブル結合有

主塔とケーブル結合無

振幅

TMD無 (WITHOUT T.M.D.)

TMD有 (WITH T.M.D.)

TMDの効果

風速 (m/s)

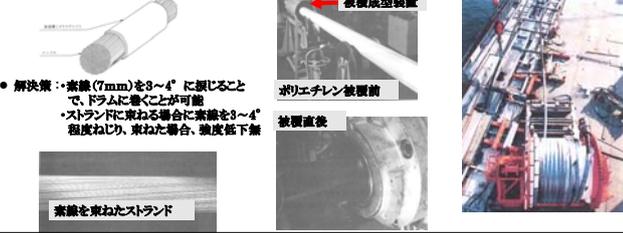
主塔制振装置 (TMD) 制振装置盛替え図

5-3. ケーブル構造の開発

—海底電力ケーブルの制作から着想 ⇨ 他分野との交流—

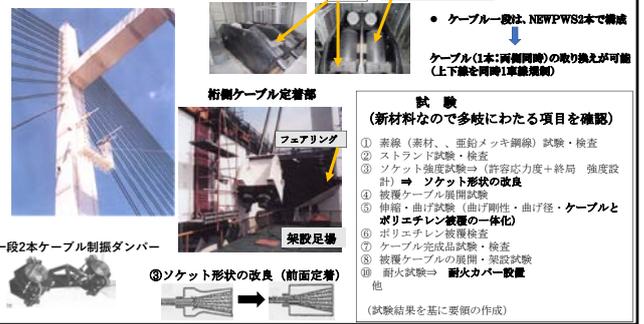
- 技術課題：・ケーブルをケーブルリール(ドラム)に巻くことが可能なこと。
・ストランドの強度が低下しないこと

ケーブルリール(ドラム)に巻かれたケーブル



- 解決策：・素線(7mm)を3~4に絞ること
で、ドラムに巻くことが可能
・ストランドに束ねる場合に素線を3~4
程度ねじり、束ねた場合、強度低下無

ケーブル構造



- ケーブル段は、NEWPS2本で構成
ケーブル(1本:両側同時)の取り換えが可能
(上下段を同時1年換装期)

- 試験
(新材料なので多岐にわたる項目を確認)
- ① 素線(素材、亜鉛メッキ鋼線)試験・検査
 - ② ストランド試験・検査
 - ③ ソケット強度試験 ⇒ (許容応力度+終局強度設計) ⇒ ソケット形状の改良
 - ④ 被覆ケーブル展開試験
 - ⑤ 伸縮・曲げ試験(曲げ剛性・曲げ径・ケーブルとポリエチレン被覆の一体化)
 - ⑥ ポリエチレン被覆検査
 - ⑦ ケーブル完成品試験・検査
 - ⑧ 被覆ケーブルの展開・架設試験
 - ⑨ 耐久試験 ⇒ 耐久カバー設置
- 他
(試験結果を基に要領の作成)

5-4. 主塔の有効座屈長の検討

構造物に死荷重を作用させ、部材に生じる断面力を計算し、この断面力が同一のパターンで増加するとき、構造物が不安定となる倍率Kを求め、Kの値は次式で計算される

- $(K_0 + K \cdot K_0) u = 0$
 K_0 :幾何剛性, K_0 :構造物の剛性, u :変位ベクトル
- $P_{cr} = K \cdot N$
 N :設計荷重用時の断面力
- $l = \pi \sqrt{EI / P_{cr}} \iff P_{cr} = \pi^2 EI / l^2$
 l :有効座屈長



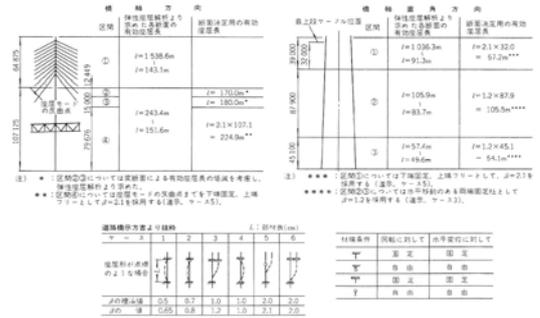
この式により有効座屈長を決定する疑問?

- ① 全体座屈モードの固有値を部分的な座屈モードの固有値とみなす
- ② 荷重が0になると、有効座屈長が無限大になる疑問?

- ◎ 塔上部については、断面決定用有効座屈長を表のように定め、決定された断面を用いて主塔全体の座屈安全度を照査することとした。

(注)上記の改善を図った研究論文(東大・工学部・土木工学科、応用力学研究報告89-2, 1989.10.)
・骨組み構造物の座屈設計法の問題点とその対処の方法:倉片慶夫・西野文雄・長谷川彰夫

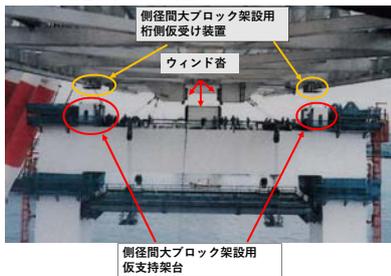
主塔の有効座屈長



5-5. 主塔下部水平梁

—将来の不測の事態への対応—

(写真:側径間大ブロック架設)



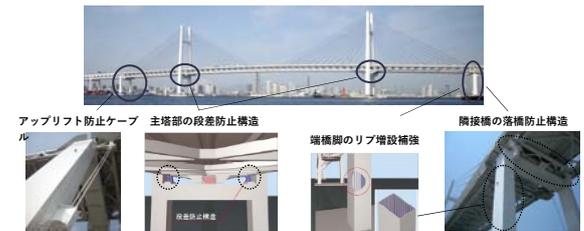
側径間大ブロック架設後、ジャッキ等の撤去後

- 主塔下部水平梁上の仮支持架台
 - 桁側の仮受け装置
- 将来桁のジャッキアップ等のために残置

6-1. 耐震補強設計 (全体概要)

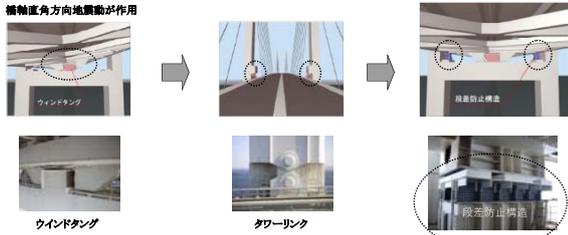
・設計“横浜ベイブリッジの耐震補強設計は、“性能照査型

目標とする性能は、「地震による損傷が限定的なものに留まり、備としての機能が速やかに回復可能な性能」とした
→耐力が不足している構造部位は耐力を増加し、回復できない損傷に対しては落橋防止構造システムを向上

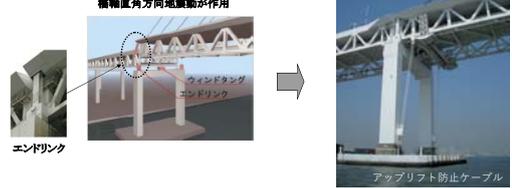


6-2. 耐震補強設計（主塔部の段差防止構造）

主塔のウインドタングの損傷により、タワーリンクの損傷からケーブルや補剛桁に連鎖的に損傷が移行しないように、主塔橋梁上に段差防止構造を設置



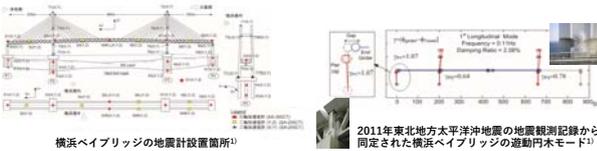
6-3. 耐震補強設計（桁端部のアップリフト防止ケーブル）



端橋脚のウインドタングの損傷により、エンドリングの損傷から桁端部の跳ね上がりへ連鎖的に損傷が移行しないように、アップリフト防止ケーブルで脚基部と補剛桁の格点を締結

6-4. 耐震補強設計（地震観測での信頼性検証）

・横浜ベイブリッジは、建設直後から数多くの地震計を用いた集中的な地震観測を実施
→2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録から、リンク支承は耐震設計で想定した通りに機能していることを確認
・地震観測記録は、耐震補強設計の動的解析の信頼性検証でも活用¹⁾



参考文献
1) 藤野125: 2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.2, 2013.
2) 山本126: 地震観測された長大市構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, 2009.

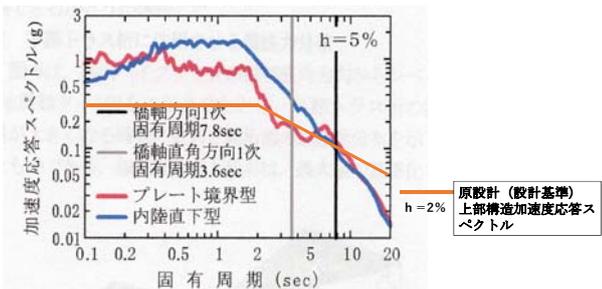
6-5. 重要部材の損傷対策（耐震補強設計と原設計との比較）

一構造物の損傷（破滅）をイメージする一

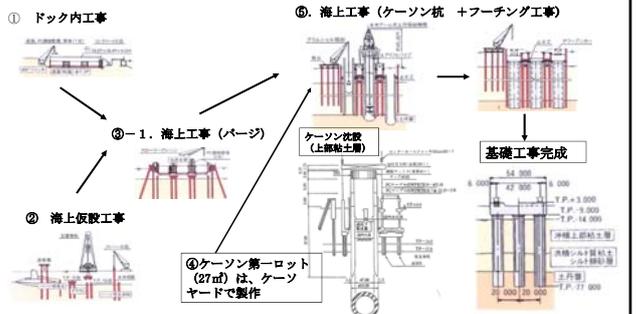
原設計の損傷	耐震補強設計（2009年）	原設計（1989年完成）
1-① タワーリンクの破断 ^{*)1)}	タワーリンク破断時の段差防止構造として、主塔下部本平面上に設置してある単位と主塔下部に設置している段差防止構造の間に、土留をすべり止する取付を挿入して段差防止構造とする	タワーリンク破断時には、落橋はしないが桁は主塔部で落下し（ケーブル破断時）、桁下部本平面上に設置してある単位が主塔下部に落下し、桁をジャンプアップして段差を破滅。
1-② ウインドタング ^{*)2)}	ウインドタングが破断した場合、タワーリンク破断のリスクがある	ウインドタングが破断した場合、タワーリンク破断のリスクがある
2 主塔と上層橋脚の破断	主塔の上層橋脚高さ位置に耐震補強材を設置	落橋はしない、桁端部が約1.5m浮き上がる
3-① エンドリング破断 ^{*)3)}	アップリフト防止ケーブルの設置	落橋はしない、桁端部が約1.5m浮き上がる
3-② ウインドタング ^{*)4)}	ウインドタングが破断した場合、エンドリング破断のリスクがある	ウインドタングが破断した場合、エンドリング破断のリスクがある
4-① 橋脚脚 ^{*)5)}	橋脚脚角地盤に対し、斜リブ補強で耐震力を向上	---
4-② 橋脚脚平の修正	アンカー部 → 橋脚脚 → ウインドタング	アンカー部 → 橋脚脚 → ウインドタング
5 橋脚脚の落下防止装置	橋脚脚角方向地盤に対し、固定制限装置設置	---
6 橋脚脚の段差防止装置	落橋した主塔下の橋脚脚に段差防止を設置	---

*)1) 耐震補強設計（レベル2標準）では、ウインドタングに大きなひずみが生じる。
*)2) 耐震補強設計（レベル2標準）では、ウインドタングに大きなひずみが生じる。
*)3) 橋脚脚角方向地盤（レベル2）により、橋脚脚の最大水平耐力を超過する大きな水平力が発生する。

（参考）耐震補強設計（L2地震）と原設計（上部構造加速度応答スペクトル）との比較



7-1. 下部工施工順序 一大ブロックプレキャスト工法一



7-2. ドック内でのバージ構築

ドック前面の水深の調査から、ドック内では
①掘削高3.25m(全高15m)までを構築
その後
②ドック前面護岸を切り開き、バージを架橋地点まで曳航

海上施工部
ドック内施工部

ドック内施工

主塔基礎 端構脚基礎

7-3. バージ曳航・海上施工

着色部: 浮いた状態で側壁等の高上げ施

バージ曳航

基礎施工中

バージ引き込み中

7-4. バージの仮沈設

一決断をする実行力 (異常気象 (台風) 対策) -

(参考) 横浜市金沢区の臨岸被害
・台風15号(2019年9月9日)

- バージ曳航直後、架橋地点が台風(1983.9月)の進路に当たる予報
- 安全を重視してバージを仮沈設
- 後日、海水をポンプで排水して、バージを再浮上させてバージ上部を海上施工した後、バージを本沈設。
- 議論が分かれる中、沈設の決断する実行力

浮遊状態 防衛パネル

最干潮時 $d=5\sim70\text{cm}$

遮水壁構造

遮水壁: 1.2m

7-5. 基礎工事

掘削機本体 水中アーム式掘削機 (装置一式)

第一ロットつり込み

ケーソン先端 (土丹) 部 (ジェットグラウト工法)

過沈下防止蓋

ケーソン第1ロット

モルタル注入 (試験工事の反映)

7-6. 現地・現物を自分の目で見ることは大切

しかし、安全を無視した危険なことをしないことはもっと大切-

(トラブルの概要)

- ケーソンの施工品質確認、その他のデータを取るため、大黒埠頭内の現場でケーソン (Φ6m) の試験工事を実施。
- 工事完了後、新型掘削機を用いてスライム処理を行い、ケーソン先端部のフリクションカット部にモルタルを充填後、支持地盤確認のためケーソン内をドライアップした。
- ドライアップした3日後、ヒービング現象が発生して、ケーソンが約 土丹層、スライム 60mm 自沈。

(推定原因)

- ドライアップ後、大きな水圧がかかったまま3日間放置したため、フリクションカット部の隙間から土砂が回り込んだためと想定される。

(教訓)

- ドライアップする場合は周囲の水位を下げるか、圧気によって水圧をバランスさせること。
- ベグ/リジ本工事においては、フリクションカット部のモルタル充填を確実にすること。

ドライアップした状況 土砂が流入した状況

フリクションカット部にモルタル注入

おわりに

- ◆ エンジニアリングは不十分なデータに基づいて安全なものを設計する (エンジニアリングの真髄: ヘンリーペトロフスキー)
- ◆ 専門にとらわれず、さまざまな分野の知識を吸収
- ◆ 学識経験者等専門家の皆様との関係構築
- ◆ 発注者・受注者の枠を超えて、コンサルタンツ、施工会社の技術者との技術を通して良い関係を構築

ご清聴ありがとうございました

この半世紀で疲労の研究がたどった道 —基礎から応用へ—

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 テクニカルアドバイザー
名古屋大学名誉教授 山田健太郎

1. 溶接継手の疲労の基礎

卒論（1969年）、修論（1971年）で疲労試験を行った。

S-N 曲線を求める → 試験体、試験機、ヒト → どちらが先に疲労する？
→ 人生万事塞翁が馬

疲労の三要素：溶接継手の形状、作用する応力範囲、その繰返し数

2. 疲労試験と S-N 曲線（疲労強度の研究と予測技術）

溶接継手の疲労挙動 → 疲労き裂の発生、進展 → これを追跡すれば予測が可能

留学 米国 メリーランド大学へ 1972～76年 「J.W. Fisher, 疲労は Lehigh 大学の時代」
Lehigh 大学出身 Prof. Pedro Albrecht、破壊力学の母 G. R. Irwin : 運が良かった

→ 破壊力学を用いた疲労き裂進展解析

→ 溶接継手の ΔK 値？ → 応力集中の影響を考慮した F_g の提案 (ASCE の論文)

3. 試験体、試験方法に工夫

前川 100 t 疲労試験機

いろいろな試験体の疲労試験を実施した。

→ 耐候性鋼の溶接継手 暴露前、2年、4年、10年、25年（近藤、名城大学）

データに語らせる！ P. Albrecht

→ 鋼床版 U リブの現場溶接継手（近藤） → 後に実橋の補修・補強の際に参照

→ 斜めに溶接された継手（面外ガセット、リブ十字、不溶着部を持つ突合せ溶接）

（金仁泰、釜山大学）

4. 道路橋の疲労耐久性の評価 (使われ方の研究、道路橋)

「基礎(計測技術)から応用(橋の部材の疲労)へ」

実働応力測定 実波形 →ヒストグラムレコーダ(応力範囲頻度分布、土木研究所)

→実波形(計測器のメモリーが格段に増加)

荷重計測(BWIM、Bridge Weigh-in-Motion、橋をはかり代わりに荷重を計測)

主桁、縦桁の曲げ(土木研究所、東工大) →支点反力に相当する波形(小塩達也) →名大特許

5. 実橋の疲労との関り 道路橋に疲労き裂が生じた →委員会 →道路防災ドクター

必ず現場を見せてもらう

1978年頃～ 名神高速道路 蟬丸橋(アーチ)

→20年後に見てきました

国道23号 港新橋(箱桁橋)

(素晴らしい鋼橋技術者にお会いできた)

その後、愛知県 立田大橋(鋼床版箱桁)、衣浦大橋(鋼床版箱桁)、など

6. 板曲げ疲労試験機の開発

「疲労の研究者は疲労試験機を作って一人前！」(昔の方の話、多田美朝氏)

前川100t疲労試験機を廃棄 →板曲げ疲労試験機を開発

(楽しかった)

鋼床版デッキプレート近傍の疲労き裂に対するS-N曲線 →寿命予測が可能

(デッキ貫通型、すみ肉溶接切断型、垂直補剛材上端、など)

ICR処理の開発 (止端き裂の補修・補強、延命化) 石川敏之 →実橋に適用

データに語らせる! P. Albrecht

付録:ねじり試験機(科研) 鋼管のねじり → ~~ヒリテ~~断面のねじり

7. まとめ

- ・自分で考えて、やってみる →維持管理は新しい分野 昔の技術と構造力学に敬意を!
- ・語学(外国語)は、心の余裕 →相手が聞きたい内容を持つことが重要
- ・勉強の機会を逃さないで →現場へ行く(モノを見ておく、後で役立つ)
→研究会、学会に参加、発表する(個人でも)

謝辞:土木学会鋼構造委員会には、このような貴重な機会を与えていただき、大変感謝しております。
パワーポイントの資料をご希望の方は、メールしてください。

k.yamada.e "at" c-nexco-hen.jp ("at"を@に変更してメールして下さい)

鋼橋 鋼橋および合成橋の概念と設計

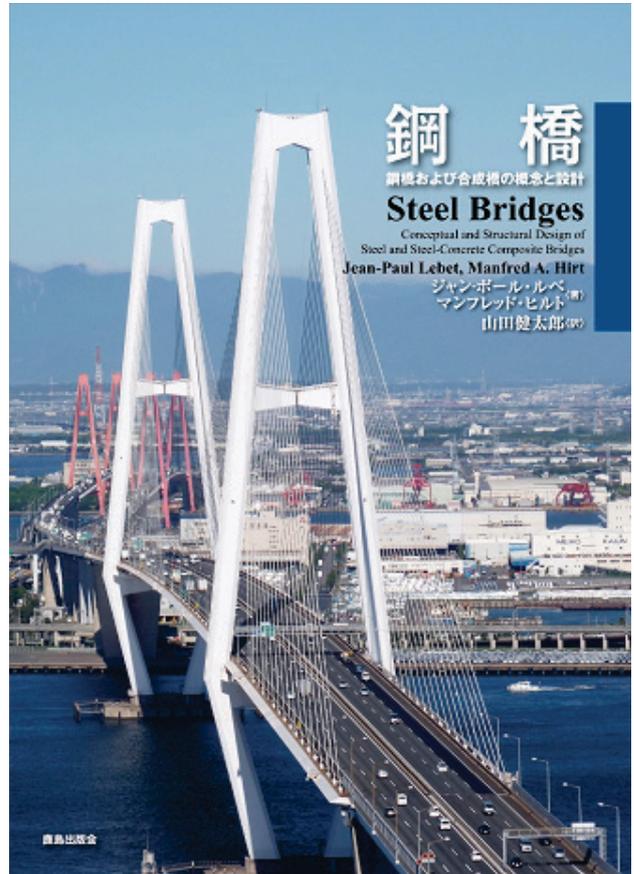
ジャン・ポール・ルベ & マンフレッド・ヒルト 著
山田健太郎 訳

B5判・上製・472頁 (2016年6月8日発行)
定価 **9,180円** (本体8,500円+税) 鹿島出版会刊

橋の概要、専門用語、鋼橋の歴史、鋼橋と合成橋の基本設計、架設プロセスと方法、材料選択、品質、構造部材の解析と設計、道路橋の設計原理、荷重作用、構造安全性と使用性の照査、鉄道橋・歩道橋・アーチ橋に特有な考え方や挙動、計算や設計のステップ、等が理解できる。

主要目次

- I部 鋼橋の概説
概要 / 橋について / 鋼橋と合成桁橋の歴史
- II部 鋼橋の設計
橋の基本設計の基礎 / 橋の構造 / 構造詳細 / 鋼橋の製作と架設 / 剛性桁の床版
- III部 桁橋の構造解析と断面決定
設計の基本 / 荷重と作用 / 桁橋の断面力 / 鋼桁 / 合成桁 / 対傾構と横構 / 全体の安定性
- IV部 その他の橋
鉄道橋 / 歩行者や自転車のための橋 / アーチ橋
- V部 実際の設計例
合成桁橋の設計例



図書注文書

この用紙を 鹿島出版会へ **FAX (03-6202-5205)** してください。

- この用紙にて申し込みください。送料は出版社が負担します。
- 本代の支払 : 請求書をお送りいたします。郵便振替用紙で郵便局または銀行口座へ送金してください。
- 申し込み先 : 図書注文書を郵送される場合は下記へお送り下さい。

〒104-0028 東京都中央区八重洲 2-5-14 鹿島出版会 (出版事業部)
TEL.03-6202-5202 FAX.03-6202-5205

書名	鋼橋 鋼橋および合成橋の概念と設計	9,180円(税込み)
注文冊数	冊	
注文者		
所在地	〒	電話番号 ()
担当者名		

必要書類 見積書 納品書 請求書
支払方法 郵便振替 銀行振込
通信欄 :