

第11回
建設技術者のための
技術力向上セミナー in 豊岡
2022(令和4)年12月6日(火)

橋梁メンテナンスの思考
～設計から廃棄まで～

堂垣 正博

関西大学名誉教授

特定非営利活動法人 NPO関西インフラ維持管理-大学コンソーシアム 監事

自己紹介 1/2

氏名 堂垣正博(どうがき まさひろ, Dogaki Masahiro)
生誕地 兵庫県豊岡市
生年月日 1949(昭和24)/5/13

社会活動 特定非営利活動法人 NPO関西インフラ維持管理-大学コンソーシアム(監事)
大阪公立大学・大阪大学・京都大学・神戸大学・大阪工業大学, 大阪産業大学・関西大学・近畿大学・摂南大学・立命館大学

学歴 1968/4-1972/3 関大工学部土木工学科
1972/4-1974/3 関大大学院工学研究科修士課程土木工学専攻
学位 工修(関大, 1974/3, 指導教授米澤博)
工博(名大, 1981/11, 主査福本晴士, 副査菊池・島田・宇佐美)
職歴 1974/4-2015/3 関大助手・専任講師・助教授・教授
2015/4 関大名誉教授
1997/3-1988/3 在外研究/Imperial College(London, England)
2008/7-2008/9 在外調査研究/Drexel Univ(Philadelphia, USA)
2015/4-2020/3 関大非常勤講師
2020/4-2022/3 舞鶴工業高等専門学校非常勤講師

自己紹介 2/2

教育

土木工学総論,
情報処理論, 情報処理演習, 線形代数 I, 線形代数 II,
構造メカニクス(構造力学), 構造メカニクス演習(構造力学演習),
構造ダイナミクス(構造動力学), 連続体力学(応用弾性学), インフラ
デザイン論, 基礎デザイン実習(基礎製図実習), 測量学実習, 土木
工学実験, 特別研究
構造解析学特論, 構造力学特論, 構造力学特論演習
鋼構造学 I, 鋼構造学 II, 建築振動学, 耐震工学

研究

性能設計(耐荷性能, 耐震性能, 景観設計), 維持管理
対象構造物(鋼構造, RC構造, PC構造)
理論的研究, 実験的研究

Prologue 1/8

A. 今日のお話し

【お題】橋梁メンテナンス

👉 橋梁 (Bridge) + メンテナンス (Maintenance)

➡ 橋梁メンテナンス + 思考 (Thought)

① 橋梁メンテナンス思考

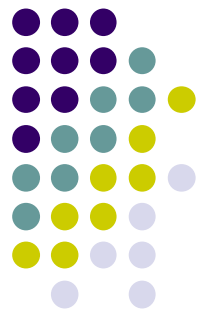
② 橋梁のメンテナンス思考

③ 橋梁メンテナンスの思考

～ 設計から廃棄まで ～

【問い掛け】

B. 社会インフラの寿命って、どのくらい？

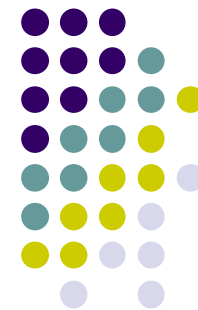


寿命50年ってよく言われるけど、そうなの？

【註】ライフタイム (lifetime), lifespan

- ① 一生, 生涯, **寿命**, 継続期間: デジタル大辞泉, 小学館
- ② 生涯, **寿命**, 存続期間: weblio
- ③ 一生涯, **寿命**, 生存期間, 存続期間, 耐用期間: 英辞郎, アルク

人生100年時代, 健康寿命



C. 構造物の設計上の耐用年限

1) 減価償却(財産価値)の期間

- * 減価償却試算の耐用年数に関する財務省令(旧大蔵省令)

- * 税対象の耐用年数を構造物ごとに設定

e.g. RC建物 60年, 工場 26~45年, 電気設備 15年

2) 使用上の期間(管理者の都合)

- * 機能的に耐用年数に到達した場合.

使用物の機能変更によって施設利用が不可能になった場合

e.g. 道路の規格や車輛の規模, 利用方法の変更など

3) 化学的・物理的要因からの期間

① 使用材料の劣化(化学的)や疲労(物理的)による寿命

② 適切な補修や補強などの修繕による延命

☞ **維持管理(Maintenance)**: 構造物の供用期間中に, それに対する要求性能(required performance)が満足されるようにする種々の**技術的行為**: ㊦日常的・定期的な巡視・点検, ㊩劣化した部位の修繕・交換, ㊵施設全体の造り替え・更新



【Example 1】港湾構造物の寿命

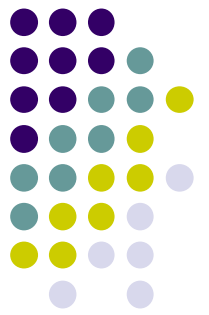
表 1.3 「港湾関係補助金等交付規制実施要領について」に規定する耐用年数（抜粋）

種 別	名 称	規 格	耐用年数
工作物	舗 床	コンクリート, 石	40
		れんが敷	20
		アスファルト舗装	15
		簡易舗装	5
	岸壁, 防波堤	鉄筋および無筋コンクリート石造	60
		鋼矢板	25
	橋 梁	鉄筋コンクリート造	60
		鉄 筋	60
		木 造	15
船 舶	ポンツーン	鉄筋コンクリート造, 鑄造	50
		鋼製	20
		木製	15

【参考図書】清宮理：構造設計概論，技報堂出版，pp.16-18，2003/12

【Example 2】道路橋の寿命

道路橋示方書(2017(H29)/11)の定義



1章 総則

1.1 適用の範囲

1.2 用語の定義

1.2.1 用語の定義

(9) 設計供用期間

1.3 設計の基本理念

1.4 橋の重要度

1.5 設計供用期間

1.6 調査

1.7 計画

1.8 設計

1.9 設計図等に記載すべき事項

1.10 施工

【付録】

仕様, 仕様書(specification)

基準(basis, norm)

基準(standard) 量的

規準(criterion) 質的

規約, 法典(code)

規則(rule)

推奨(Recommendation)

【Example 2】道路橋の場合

設計供用期間

1.2 用語の定義

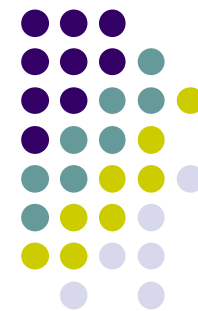
1.2.1 用語の定義

(9) 設計供用期間

適切な維持管理が行われることを前提に，設計の前提として**橋が所要の性能を発揮することを期待する期間**をいう。

1.5 設計供用期間

橋の設計にあたっては，**適切な維持管理が行われることを前提に**橋が性能を発揮することを期待する期間として設計供用期間を定めることとし，**100年**を標準とする。



D. 社会インフラの一生を長らせる方策は？

50年を超えて もっと もっと 持つと思いませんか？

👉 でも ほっておいてはダメでしょうね・・・

身近な餘部鉄橋【鋼製トレスル橋，建設時東洋一】

建設1909(M42)/12/16-1912(M45)/1/19，

供用1912(M45)/03/01-2010(H22)/7/16，**98年間供用**

★ **減価償却資産の耐用年数等に関する省令：40年**

鉄道マンは日頃何をしていたのでしょうか？

⇒ 自らの鉄橋を見回り，日々管理を怠らなかった！

そんなことを想いながら，今日は

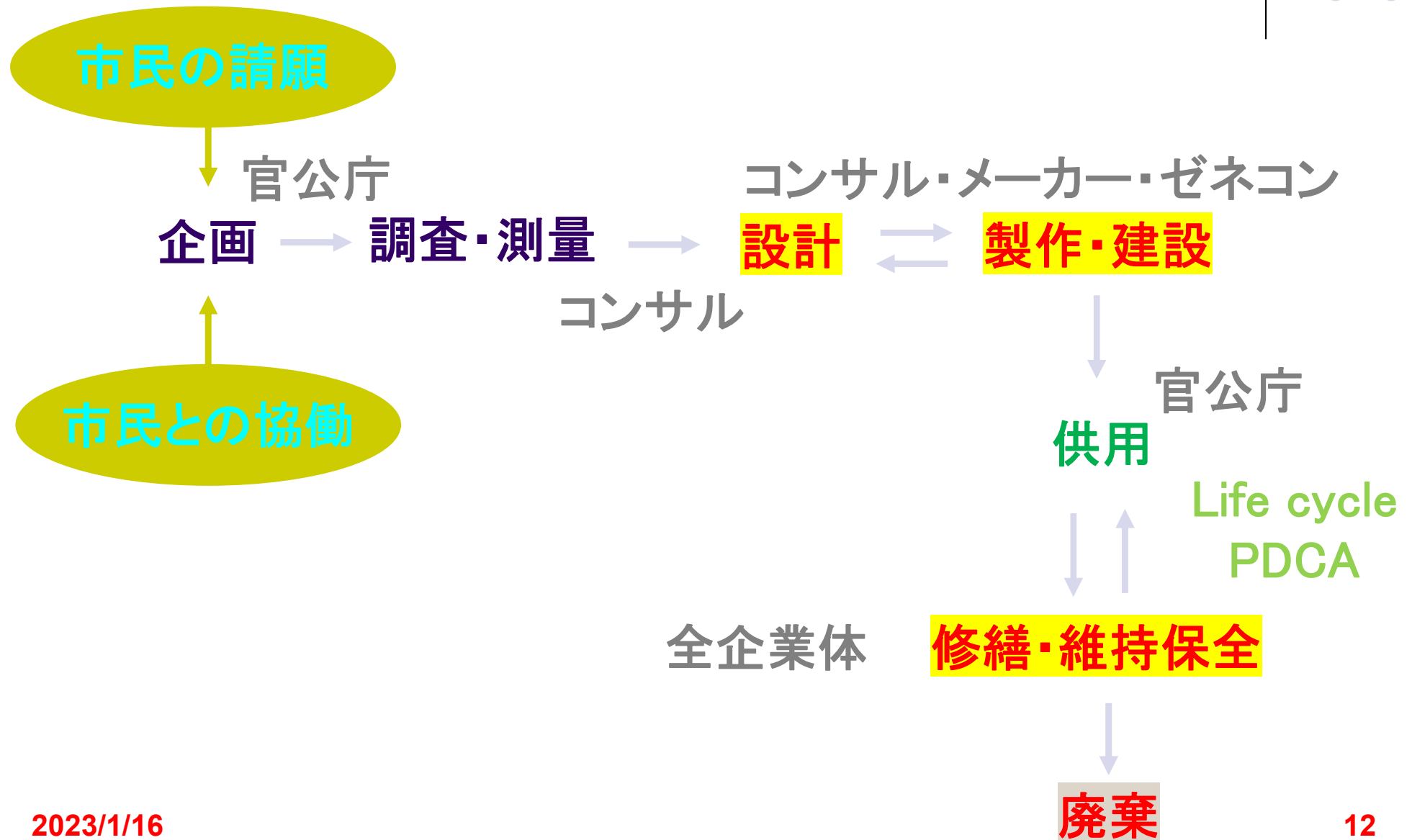
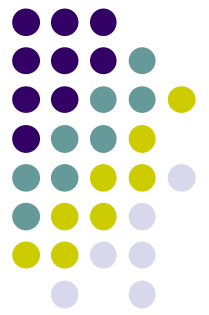
橋梁の維持管理について，皆さんとともに思考しましょう。



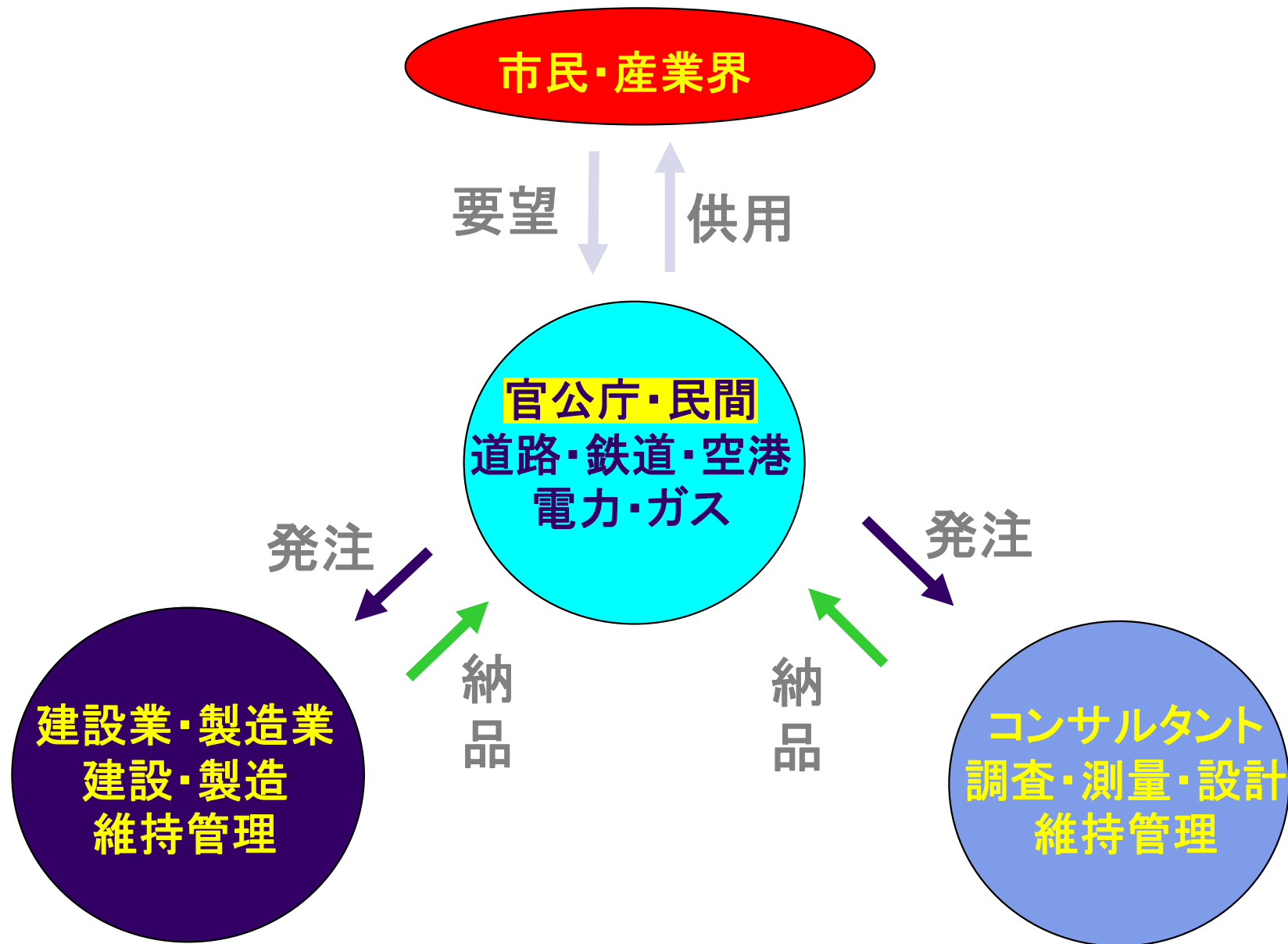
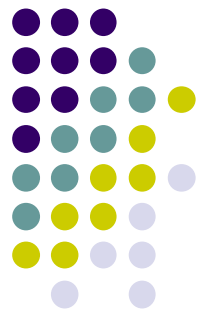
但馬の橋梁の現況

	管理橋数	最古建設年	レベルⅢの橋数
国交省豊岡	241	1958	16
県新温泉土木	333	1927	28
県豊岡土木	416	1921	28
県養父土木	382	1930	39
香美町	424	1926	31
新温泉町	342	1937	26
豊岡市	1244	1926	30
養父市	581	1924	70
朝来市	611	1883	58

1. 社会インフラの整備プロセス No.1



1. 社会インフラの整備プロセス No.2



2.1 供用240年の橋梁

1760年産業革命(1779年第11代将軍徳川家斉時代)



- Iron Bridge (Coalbrookdale橋), England, Severn River 上流
- 1779年竣工. 1781年開通. 橋長約60m, 支間約30mの鑄鉄製アーチ橋
- 1986年世界遺産

2.1 供用144年の鉄道橋

Forth Railway Bridge (Gerber truss 橋)

Scotland, Edenborough 近郊, Forth 湾

1890年竣工, 全長2,530m, 2015年世界遺産

【注】Thomas Buch 設計: Tay Rail Bridge (1878/6/1開通 1879/12/28落橋)



港大橋(阪神高速湾岸線)

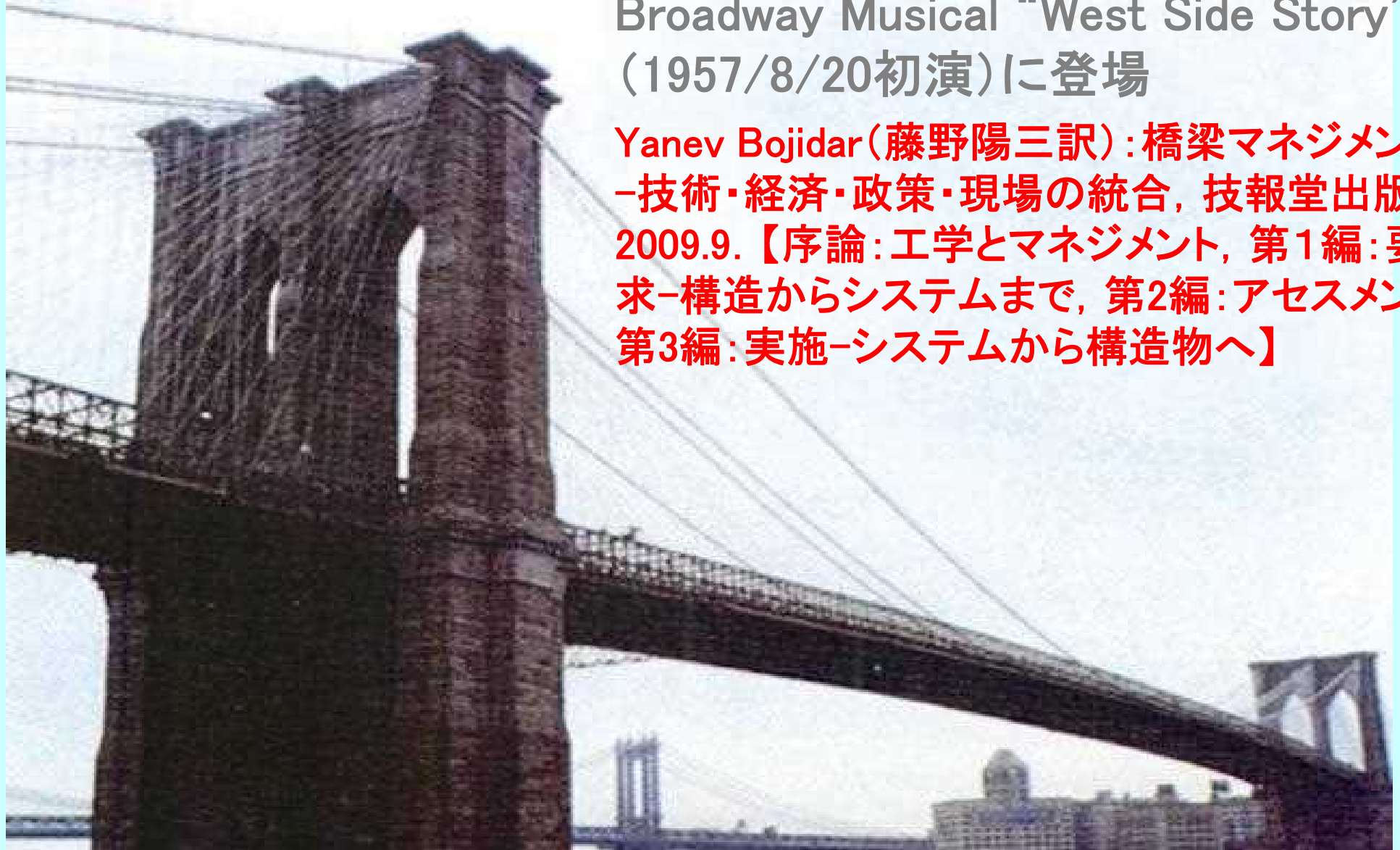
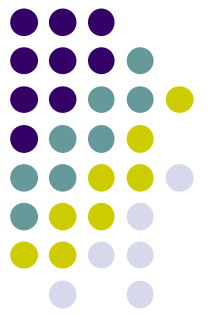


(渡辺嘉一)



2.1 供用139年の道路橋

Brooklyn Bridge (suspension bridge) 1883/5開通,
New York, 支間: 486.3m, 桁下高: 41.1m)



Broadway Musical “West Side Story”
(1957/8/20初演)に登場

Yanev Bojidar (藤野陽三訳): 橋梁マネジメント
-技術・経済・政策・現場の統合, 技報堂出版,
2009.9. 【序論: 工学とマネジメント, 第1編: 要求-構造からシステムまで, 第2編: アセスメント,
第3編: 実施-システムから構造物へ】

2.1 供用137年の橋梁

神子畑鑄鉄橋(朝来市), 羽淵鑄鉄橋(朝来市)

1883/4-1885/3竣工, 橋長16m, 支間14mの鑄鉄製アーチ上路橋

鑄鉄橋梁(すずかけ橋(心斎橋), 弾正橋(東京, 鍊鑄混合))

1977/2重要文化財(わが国最初), 2007年近代化産業遺産

1982 修繕(永久保存)



2.1 日本最古1868(K4 = M1)の鋼橋 154年前

長崎の五彩色絵葉書



鉄の変遷(わが国, 明治期)

鉄→鑄鉄→**錬鉄**→鋼鉄

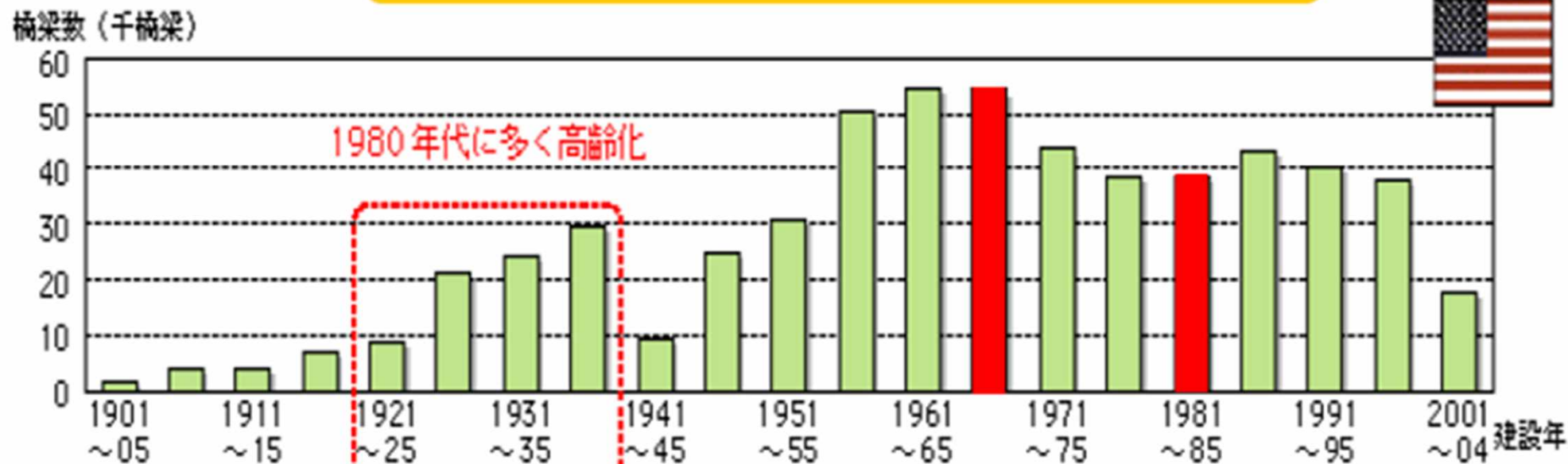
- 日本最古の錬鉄製桁橋:くろがね橋(長崎・中島川), 1868(慶応4, 明治元)年完成. 橋長 = 21.8m, 欧米から輸入, お抱え技術者(オランダ人ホーゲル)

2.2 橋梁建設数の日米年次比較



日米の橋梁建設年の比較

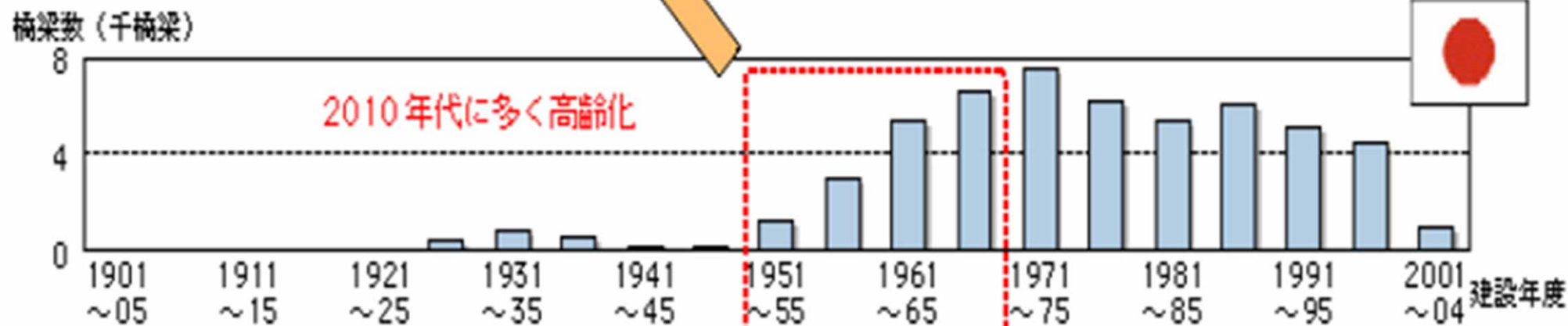
【米国の橋梁の建設年】



※全橋梁を対象

資料）（社）国際建設技術協会資料より作成

【日本の橋梁の建設年】

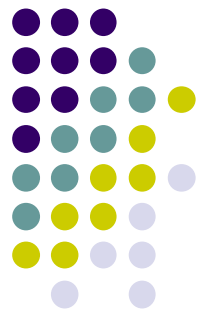


※国道・都道府県道の橋梁を対象

資料）道路施設現況調査より作成

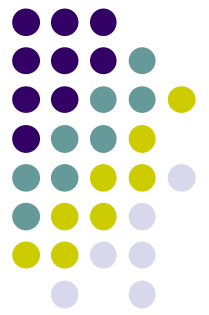
30年早く高齢化

2.3 橋梁の特性



- ⑦ 長期供用(50～100年)に資する設計外力評価の難しさ
 - ☞ 交通環境(車種, 交通量, 走行位置など)の変化
 - ☞ 地震, 台風などの非定常外力
- ⑧ 管理橋梁数: 増加(十数万橋)
 - ☞ 近接目視(5年ごと), 機器計測による詳細点検
 - ➡ 橋梁すべてを短期間隔に点検することの難しさ
 - ☞ 幹線国道や高速自動車国道以外の道路
 - ➡ 上記道路に比して点検が不十分
- ⑨ 劣化のスピード
 - ☞ 速く進む損傷とゆっくり進む損傷が道路ネットワークに混在
- ⑩ 疲労損傷
 - ☞ 適切な時間での発見が不可能な場合
 - ➡ 溶接ルート部など溶接内部の欠陥に起因するき裂
- ⑪ 損傷の類型化
 - ☞ 疲労や腐食による損傷マップの作成
 - ➡ 損傷の可能性が大の部位の特定が可能

3. 橋梁損傷の事例と要因



3.1 架設中の落橋事例

3.2 供用中の損傷事例

- (1) 米国他
- (2) 日本

3.3 損傷の要因

- (1) コンクリート構造
- (2) 鋼構造

3.1 架設中の落橋 1/4

座屈による鋼橋の落橋

1908/08/29 Quebec Bridge (ゲルバートラス橋)

下弦材の圧縮座屈

1916/09/11 Quebec Bridge (ゲルバートラス橋)

中央スパン落下

1969/11/06 the 4th Danube Bridge (連続2箱桁橋)

圧縮フランジの座屈

1970/06/02 Milford Heaven Bridge (連続逆台形箱桁橋)

中間支点上ダイアフラムの圧縮座屈

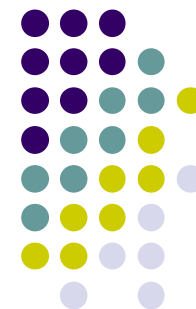
1970/10/15 West Gate Bridge (連続逆台形箱桁斜張橋)

圧縮補剛フランジの局部座屈

1970/11/10 Koblenz-Hochheim Bridge (連続逆台形箱桁橋)

圧縮補剛フランジの局部座屈

➡ 許容応力度設計法 ⇨ 限界状態設計法



3.1 架設中の落橋 2/4



Quebec Bridge (ゲルバートラス橋)

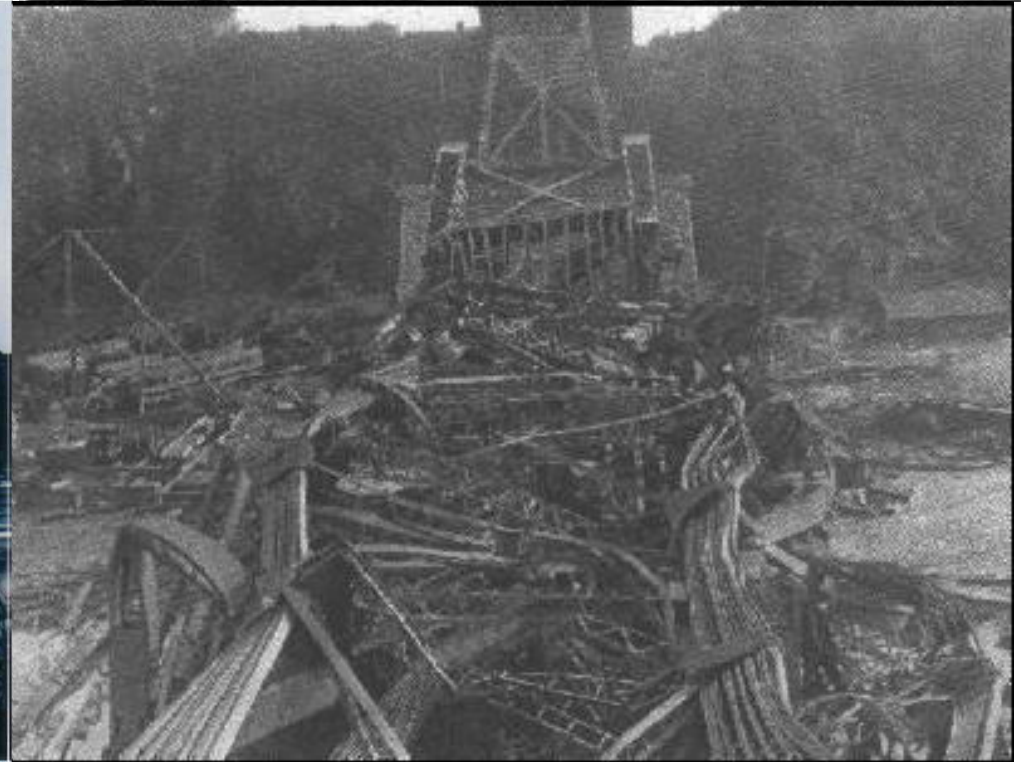
①1908/8/29

下弦材の圧縮座屈

👉 設計上の対策強化

②1916/9/11

中央スパン落下



3.1 架設中の落橋 3/4

鋼道路橋の落橋事故

ライン川を横断する道路B327に架かるKoblenz Hochheim橋
(逆台形連続鋼箱桁橋)

* 1970/11/10, 1972年の2回の事故により13名死亡

設計基準(DIN4114)

鋼構造: 座屈設計

* 弾性座屈を基本

* 初期不整を未考慮

* 弾塑性性状無視

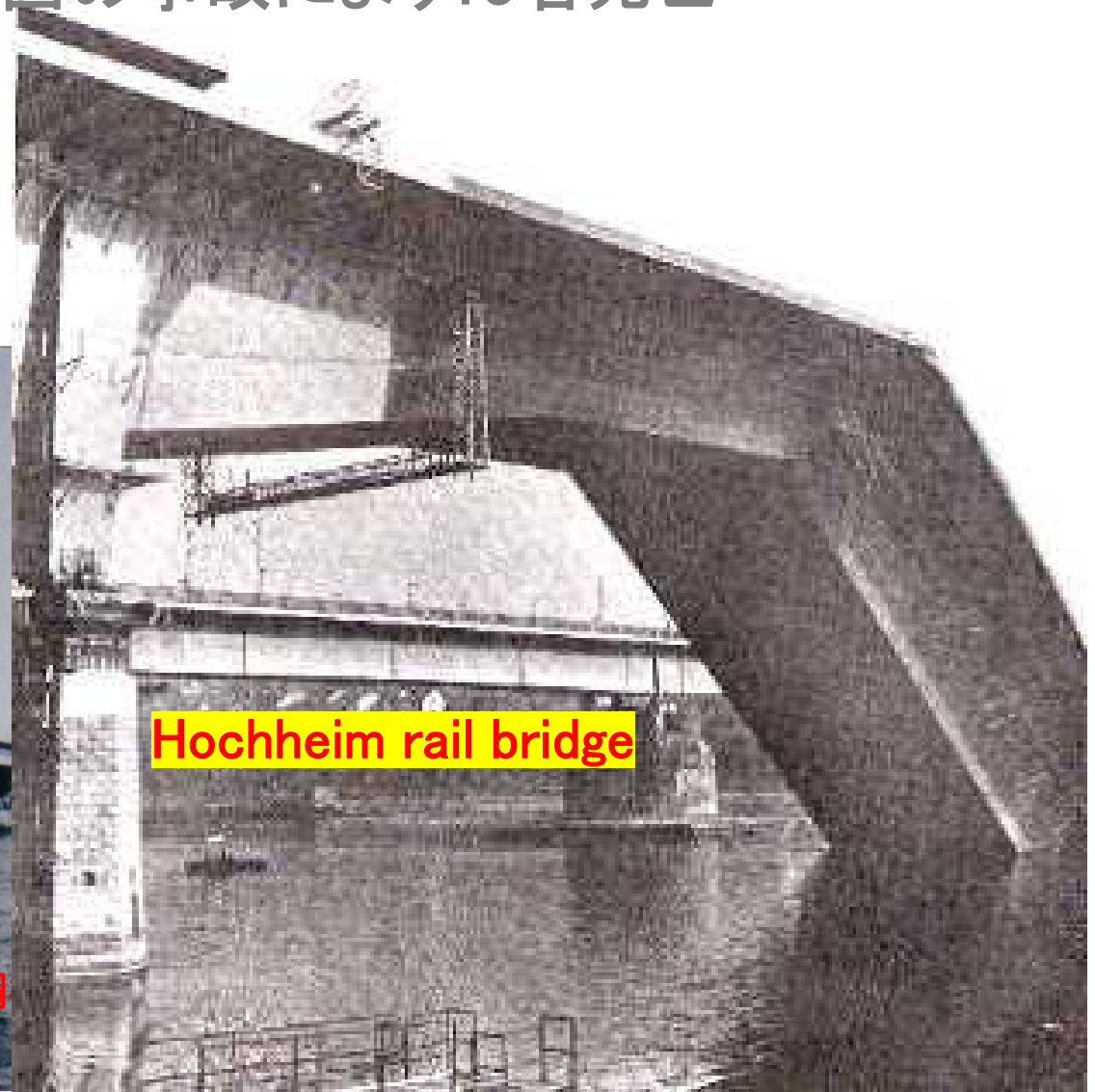
* 大変形無視

👉 **許容応力設計法**

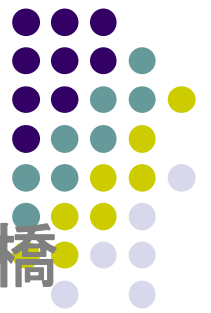


2023/1/16

鋼



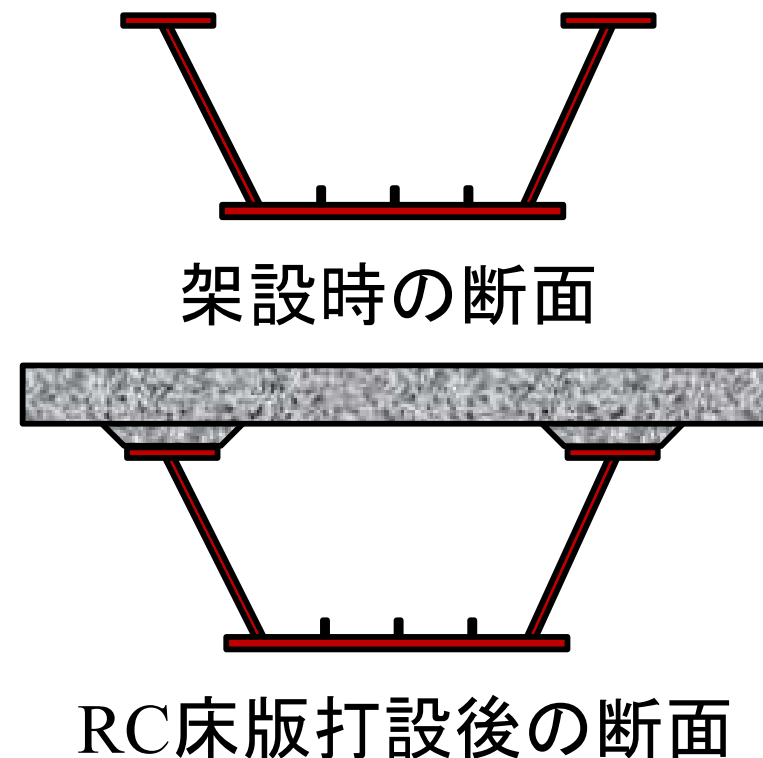
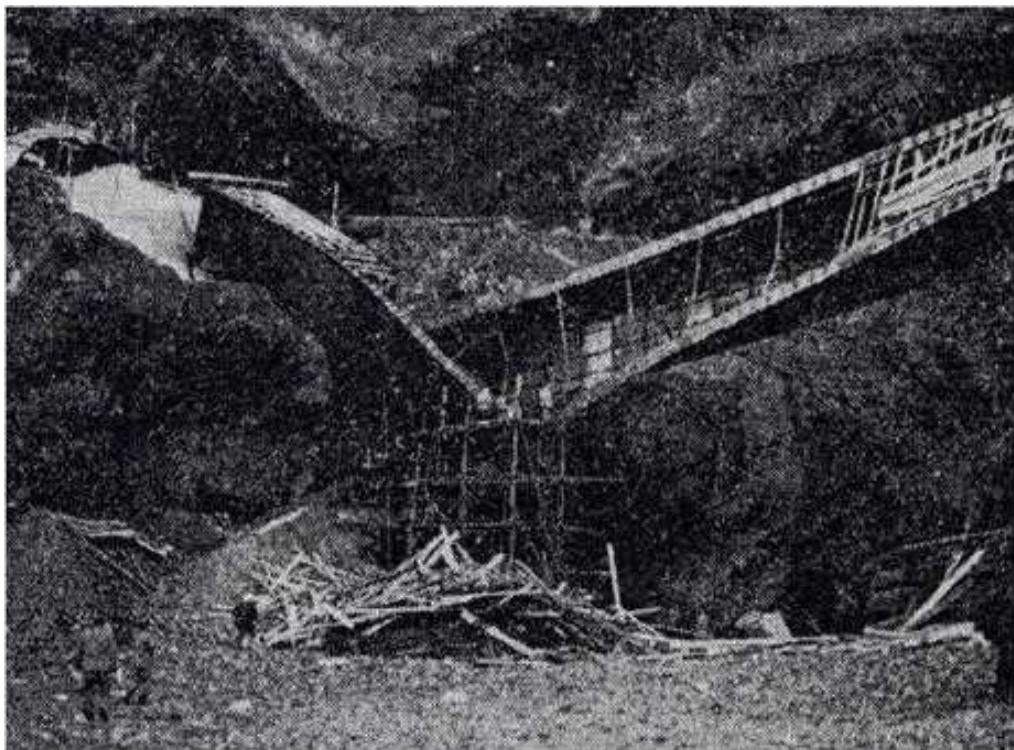
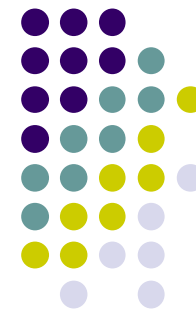
Hochheim rail bridge



3.1 架設中の落橋 4/4

開断面逆台形鋼桁橋の座屈 析石橋(北海道)

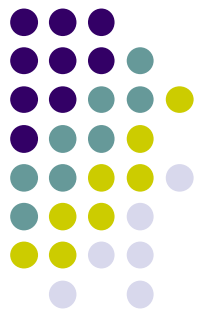
- * RC床版のコンクリート打設時【1963(S38)】
- * 打設順序の不備
- * 鋼桁のねじれ座屈



3.2 供用中の損傷事例

(1) 米国での落橋(1/4)

Silver 橋【1928年建設, アイバー鎖製つり橋】
from Kanawha in Ohio State
to Pleasant in West Virginia State



荒廃するアメリカ

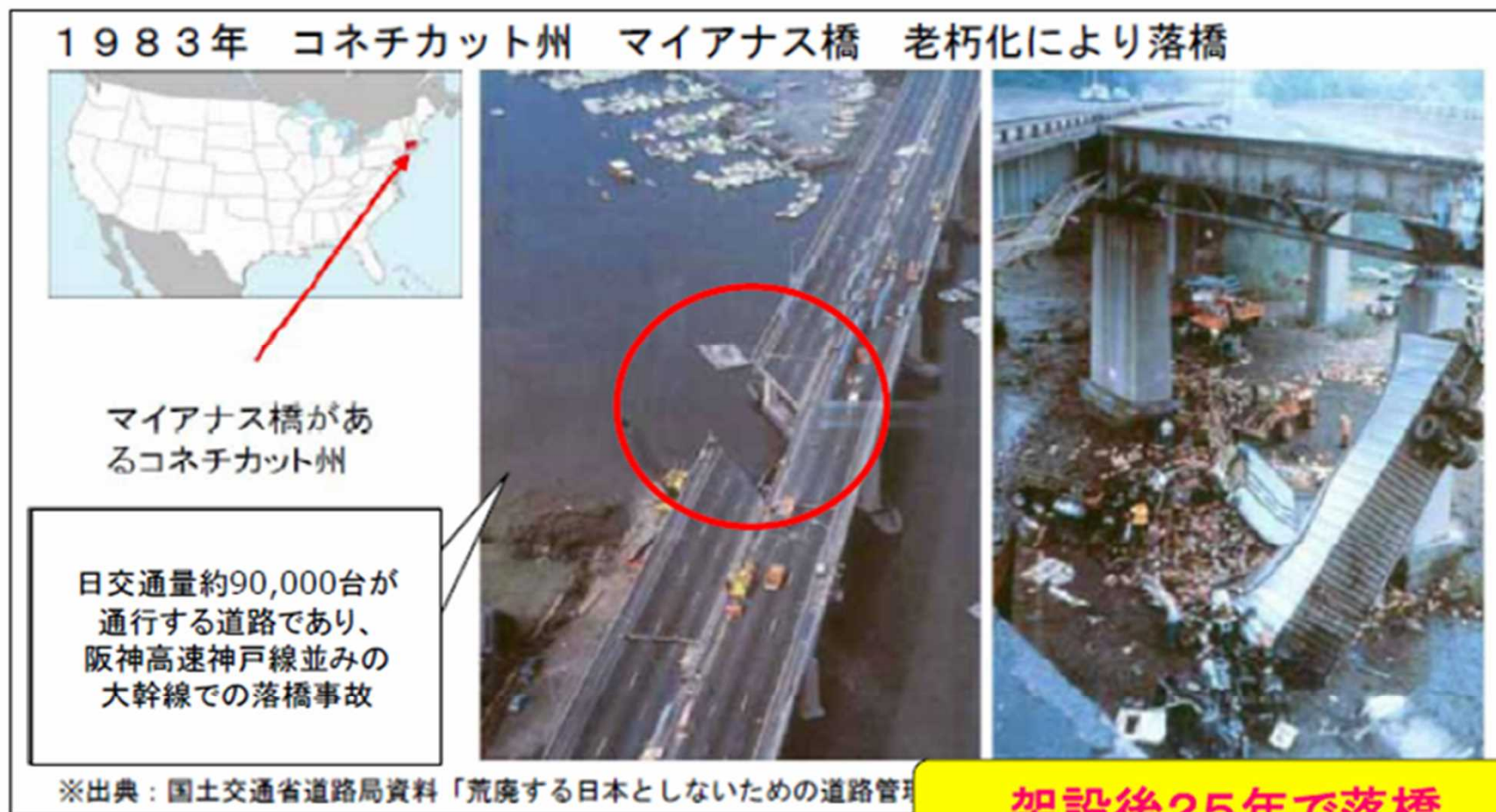
- 1920年代に大量の橋梁を建設したが、維持管理はほとんど行われず、1967年にシルバー橋が崩壊(46名死亡)し、全国的な関心が高まった。



- その後も、十分な維持管理予算は投入されず、道路施設は劣悪な状態になった。

3.2 供用中の損傷事例

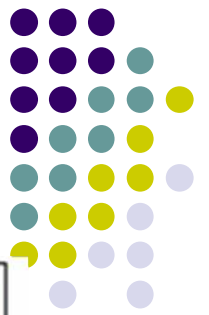
(1) 米国での落橋(2/4)



- ・ 橋梁維持管理費の増額へ(1980年度比3倍)
- ・ 橋梁点検員の資格制度化

3.2 供用中の損傷事例

(1)米国での落橋(3/4)



2005年(H17.9月)

2023/ 米国・ペンシルバニア州でPC桁落橋(1965年架設)

3.2 供用中の損傷事例

(1) 米国での落橋(4/4)



架設後40年で落橋



2007年(H19.8月)

米国・ミネソタ州で
鋼トラスが落橋
(1967年架設)

3.2 供用中の損傷事例

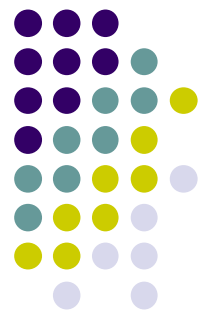
(1) 韓国での落橋

(建設後僅か15年で落橋)



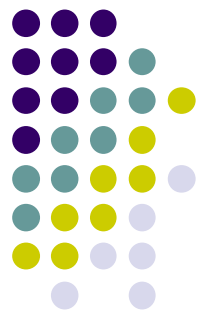
●聖水大橋(Cantilever truss橋, Gerber truss橋),
韓国・ソウル市の漢江にかかる道路橋

●1979/10竣工, 1994/10落橋



3.2 供用中の損傷事例

(2) わが国の損傷(1/6)

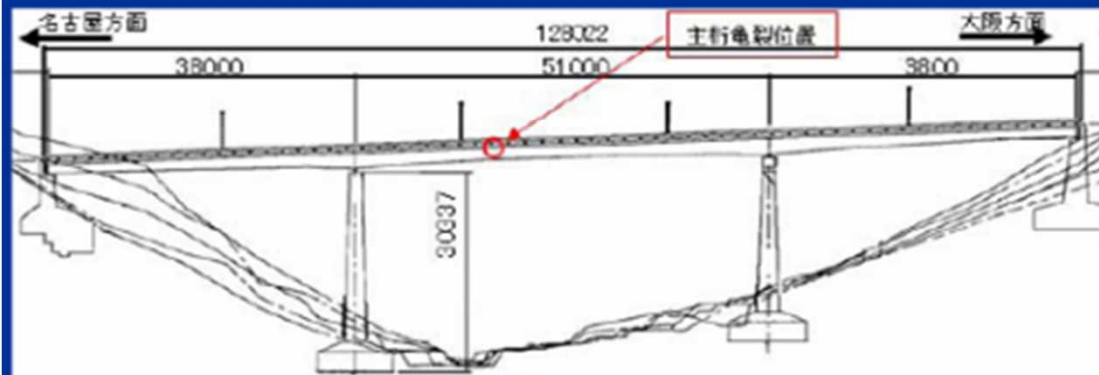


4. 国道25号 山添橋の鋼材亀裂

諸元等
一般国道25号「山添橋(上)」(奈良県)
橋梁形式:鋼3径間単純非合成鉄桁
橋長:L=128.02m 幅員:W=9.9m
架設竣工年:1971年
交通量:36,037台/12h
2006年10月2日点検作業日に発見



位置図



橋梁一般図



断面図

3.2 供用中の損傷事例

(2) わが国の損傷 (1.5/6)



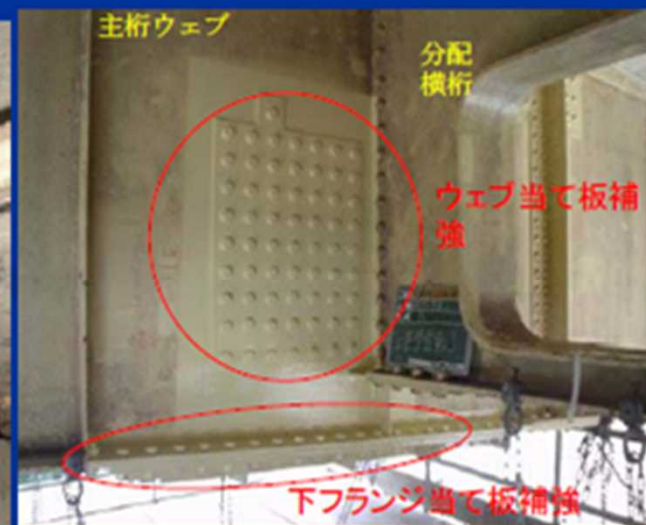
- 経緯: ①平成18年10月2日山添橋の桁に亀裂を発見
②平成18年10月4日完了 山添橋の亀裂箇所の緊急補修
③平成18年10月4日「名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会」の設置し、応急復旧工事の効果確認、山添橋の亀裂損傷の原因究明等実施
④平成18年11月6日～22日名阪国道全橋梁の点検
⑤平成19年1月10日「名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会」を開催し現地計測及び解析検討の中間報告、名阪国道の橋梁点検結果報告等



亀裂発生状況



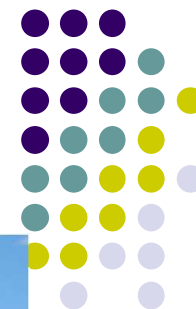
左写真の拡大



下フランジとウェブの補強後

3.2 供用中の損傷事例

(2) わが国の損傷 (2/6)



木曽川大橋

2. 国道23号 木曽川大橋の鋼材破断

一般国道23号「木曽川大橋」(三重県)

橋梁形式: 12径間単純鋼トラス橋

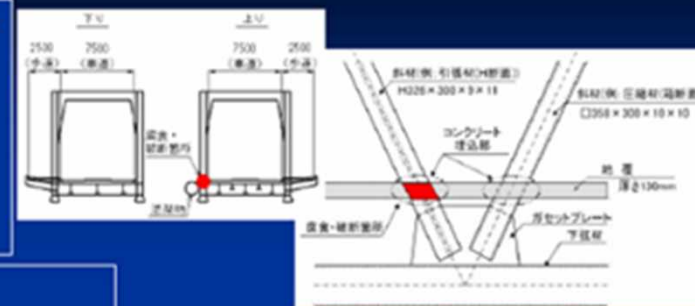
橋長L=858.5m、全幅員W=11.8m

架設竣工年: 1963年

交通量: 52,808台/日

損傷部位 : 斜材

損傷の種類 : 破断



損傷部位

損傷状況と補修対策

- ・トラス橋の斜材に破断が見られる。
- ・ボルトによるあて板補強を実施した。



位置図

損傷状況



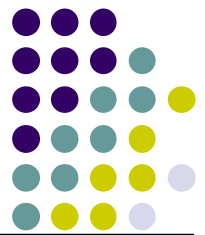
補修後

補修後の状況



3.2 供用中の損傷事例

(2) わが国の損傷(3/6)



3. 国道7号 本荘大橋の鋼材破断

一般国道7号「本荘大橋」(秋田県)

橋梁形式: 3径間連続鋼トラス橋

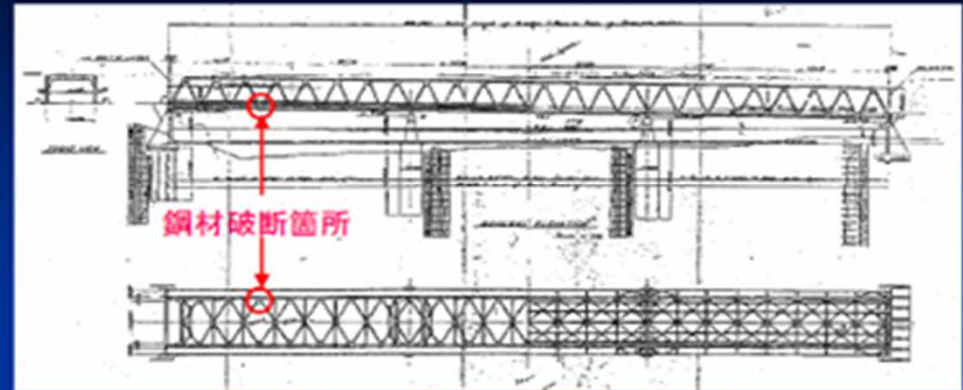
橋長L=200m、全幅員W=15.8m

交通量: 21,857台/日

架設竣工年: 1966年

損傷部位 : 斜材

損傷の種類 : 破断



損傷箇所

損傷状況と補修対策

- ・トラス橋の斜材に破断が見られる。
- ・ボルトによるあて板補強を実施した。



位置図

損傷状況



補修後

破断箇所の応急復旧状況



3.2 供用中の損傷事例

(2) わが国の損傷(4/6)



君津市道「君津新橋」(千葉県、君津市)
橋梁形式:下路式ローゼアーチ橋
橋長:L=68.1m 幅員:W=14.0m

損傷部位:アーチ吊材(PC鋼棒)
損傷の種類:破断

国総研・CAESAR

損傷原因と補修対策

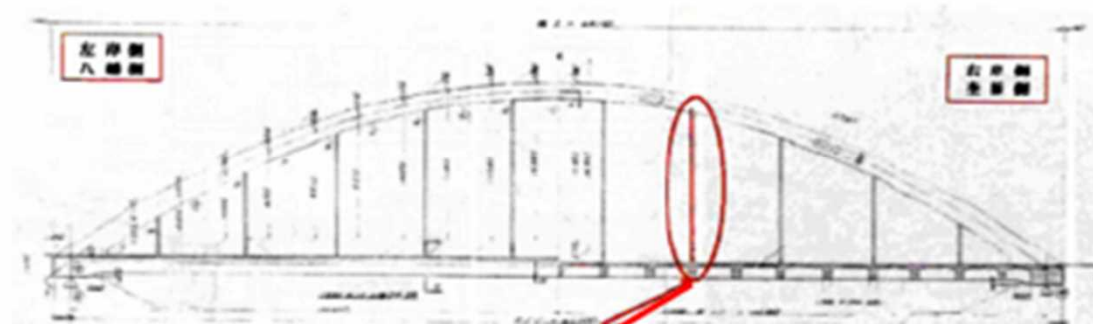
- ・異種金属接触腐食によるPC鋼棒の破断
- ・全吊材PC鋼棒をPCケーブルに交換

情報提供

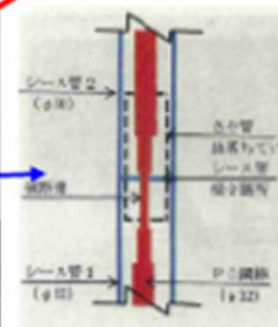
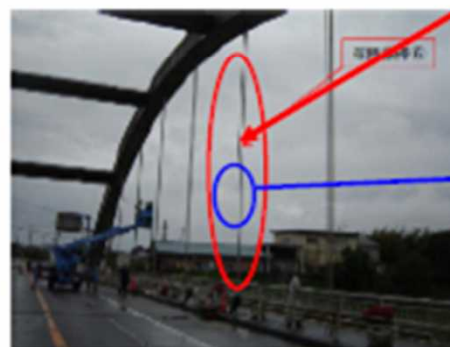
全国の橋梁管理者

緊急点検

- ・吊り材の緊急点検



側面図



破断状況

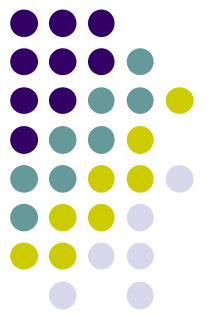


関連部位の損傷



3.1 供用中の損傷事例

(2) わが国の落橋(5/6)



六十谷水管橋:2021/10/3落橋. 1975/3完成. 最大支間長59.3 mの7径間連続鋼補剛桁アーチ橋(ランガー橋) **46年供用 ランガー形式(静定)**

3.1 供用中の損傷事例

(2) わが国の突発的損傷(衝突)(6/6)



関空連絡橋 タンカー衝突:2018/9/5

3.2 供用中の突発的損傷

鋼橋の座屈損傷 (兵庫県南部地震)

名称: 1995(H7)年兵庫県南部地震

M_j : 6.9 ($M = 7.3$)

震度: 7

震央: 兵庫県津名郡北淡町付近
(現淡路市) $N34^\circ 35.9'$,
 $E135^\circ 2.1'$

震源深さ: 16km

写真: R43建石交差点(阪神高速3号), コンクリート充填鋼製橋脚の破壊による高架橋の落橋



3.3 橋梁損傷の要因

(A) 概説

1) 初期欠陥(施工時, 施工後)

2) 自然環境(雨水, 塩害)

☞ 腐食(RC桁, PC桁, 鋼桁, ケーブル構造)

☞ 凍害【初期凍害, 凍結融解作用による凍害】

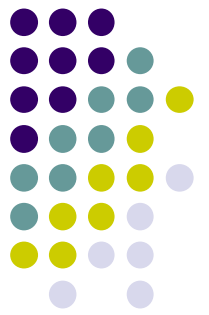
3) 化学的要因

☞ 中性化 ☞ ひび割れなどの発生後

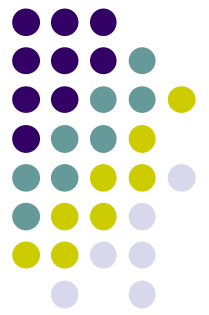
強アルカリ性 $\text{pH}=12\sim13$ のコンクリートに大気中の二酸化炭素が侵入し、水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH を低下させる劣化現象

☞ アルカリ骨材反応 ☞ 粗悪な骨材使用

コンクリート中の高 pH 環境で、骨材に含まれるシリカが反応して生じたアルカリシリカゲルが膨張し、コンクリートにひび割れが生じる劣化現象



3.3 橋梁損傷の要因



(A) 概説

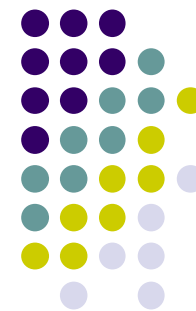
4) 物理的要因

- ☞ 圧縮荷重 ➡ 座屈 (buckling)
- ☞ 引張荷重 ➡ 破断 (fracture)
- ☞ 繰返し荷重 ➡ 疲労 (fatigue) : 床版, 桁構造
低サイクル疲労 (地震時)
高サイクル疲労 (平時)

5) 外的な作用要因

- ☞ 地震 (earthquake) ⇐ 想定以上の作用
船舶の衝突 (collision, clash)

3.3 橋梁損傷の要因



(B) コンクリート構造の損傷要因

1) 初期欠陥

コンクリート構造の施工時, 施工直後に発生する欠陥

- ☞ ①ひび割れ, ②豆板, ③コールドジョイント
- ④砂すじ

2) 損傷

初期欠陥による損傷

劣化現象

地震や衝突による損傷

1995/1/17 兵庫県南部地震

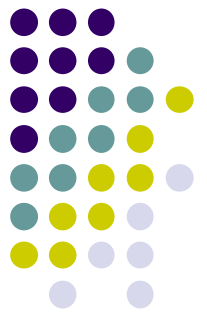
2018/9/4 台風21号 関空連絡橋とタンカーの衝突

3.3 橋梁損傷の要因

(B) コンクリート構造の損傷要因

3) 劣化

- ① 中性化による損傷
- ② アルカリ骨材反応による損傷
- ③ 塩害による損傷(= 断面欠損)
- ④ 凍害による損傷
- ⑤ 自動車通行によるRC床版の疲労損傷(物理的損傷)



3.3 橋梁損傷の要因



(C) 鋼構造の損傷要因

1) 鋼材の腐食損傷

- ☞ 対策【表面処理】 塗装, メッキ
- ☞ 対策【鋼材改良】 耐候性鋼

2) 溶接接合部の疲労損傷

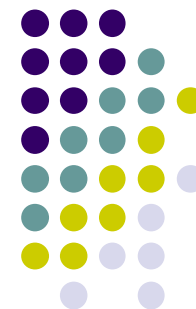
- ☞ 【対処法】 詳細設計, 荷重の抑制

3) 構造部位の損傷例

- ☞ RC床版と鋼床版の疲労損傷
- ☞ 部材の変形
- ☞ リベットやボルトのゆるみ, 脱落
- ☞ 支承や伸縮装置の損傷 (桁端部, 中間支点)

3.4 社会インフラの老朽化

2019(令和元)年度国土交通省建設白書



高度成長期以降に整備された道路橋、トンネル、河川、下水道、港湾等について、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。

※施設の老朽化の状況は、建設年度で一律に決まるのではなく、立地環境や維持管理の状況等によって異なるが、ここでは便宜的に建設後50年で整理。

《建設後50年以上経過する社会資本の割合》

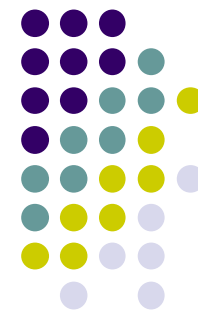
	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋 ^{注1)} (橋長2m以上の橋)]	約25%	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本 ^{注2)}]	約20%	約27%	約42%
河川管理施設(水門等) [約1万施設 ^{注3)}]	約32%	約42%	約62%
下水道管きよ [総延長:約47万km ^{注4)}]	約4%	約8%	約21%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{注5)} (水深-4.5m以深)]	約17%	約32%	約58%

(注) 1 道路橋約73万橋のうち、建設年度不明橋梁の約23万橋については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)

2 トンネル約1万1千本のうち、建設年度不明トンネルの約400本については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)

3 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)(2017年度集計)

3.5 橋梁の維持管理の現状



日経新聞 (2019/11/13(W)) 朝刊(その1)

229/307自治体(7~8月)の回答

- ㊦ 緊急措置段階 409橋:通行止め(多数)
- ㊩ 恒久的な措置 168橋:修繕(79), 架け替え(57),
撤去(32)
- ㊪ 現時点で未定 59橋
- ㊫ 予定はあるが, 未定 46橋
- ㊬ 対応方法がその他 20橋
恒久的な対応を定めていない 17橋
- ㊭ 修繕, 架け替え, 撤去の見通しが立たない 122橋

3.5 橋梁の維持管理の現状

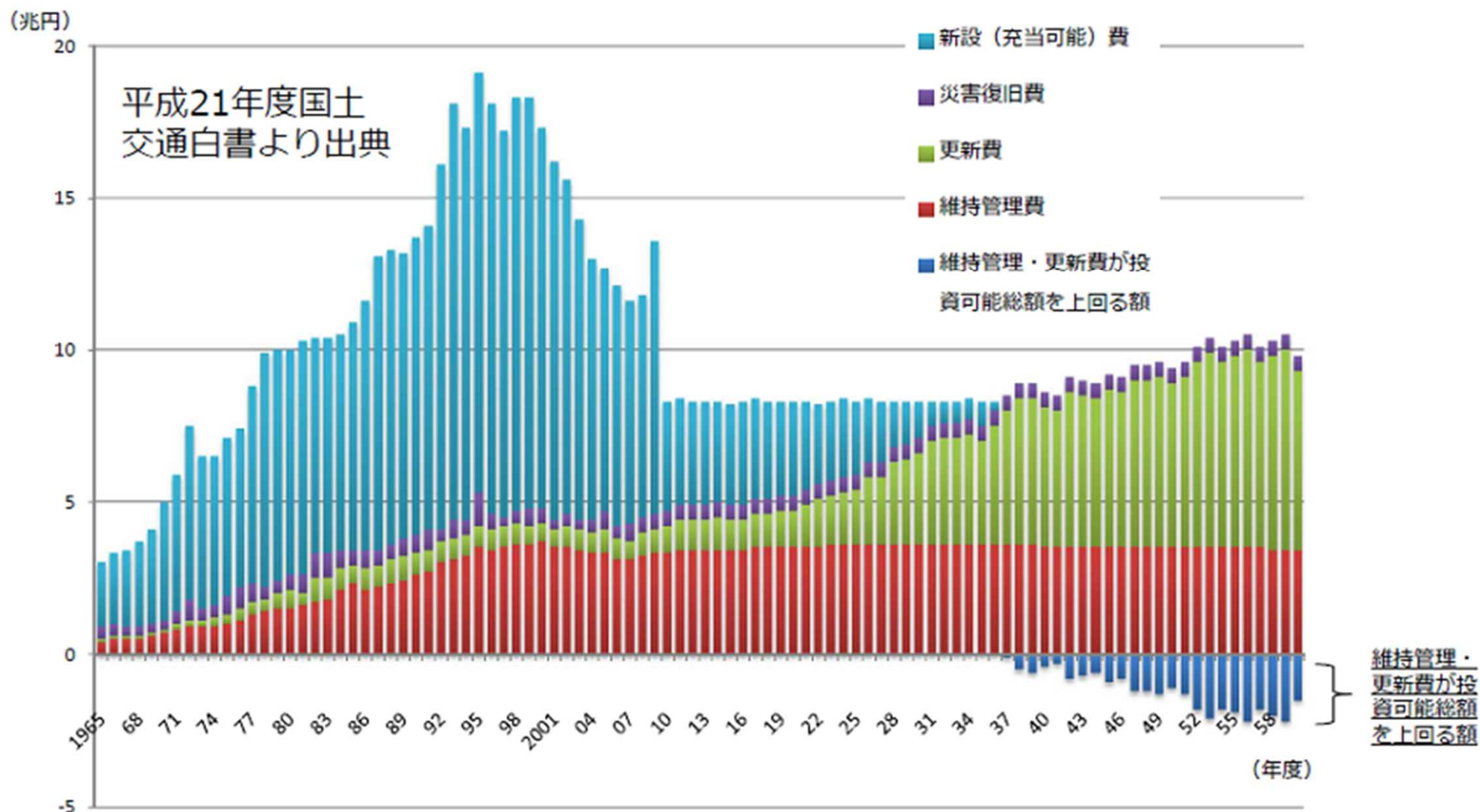
日経新聞(2019/11/13(W))朝刊(その2)

修繕や撤去, 架け替えができない理由

- ①43% 老朽化したインフラ修繕で, 優先順位の関係で難しい
- ②32% 予算不足で, 計画的修繕が不可能
- ③31% 地域住民との合意形成で難航
- ④10% 技術系職員が不足. 対応しきれない.

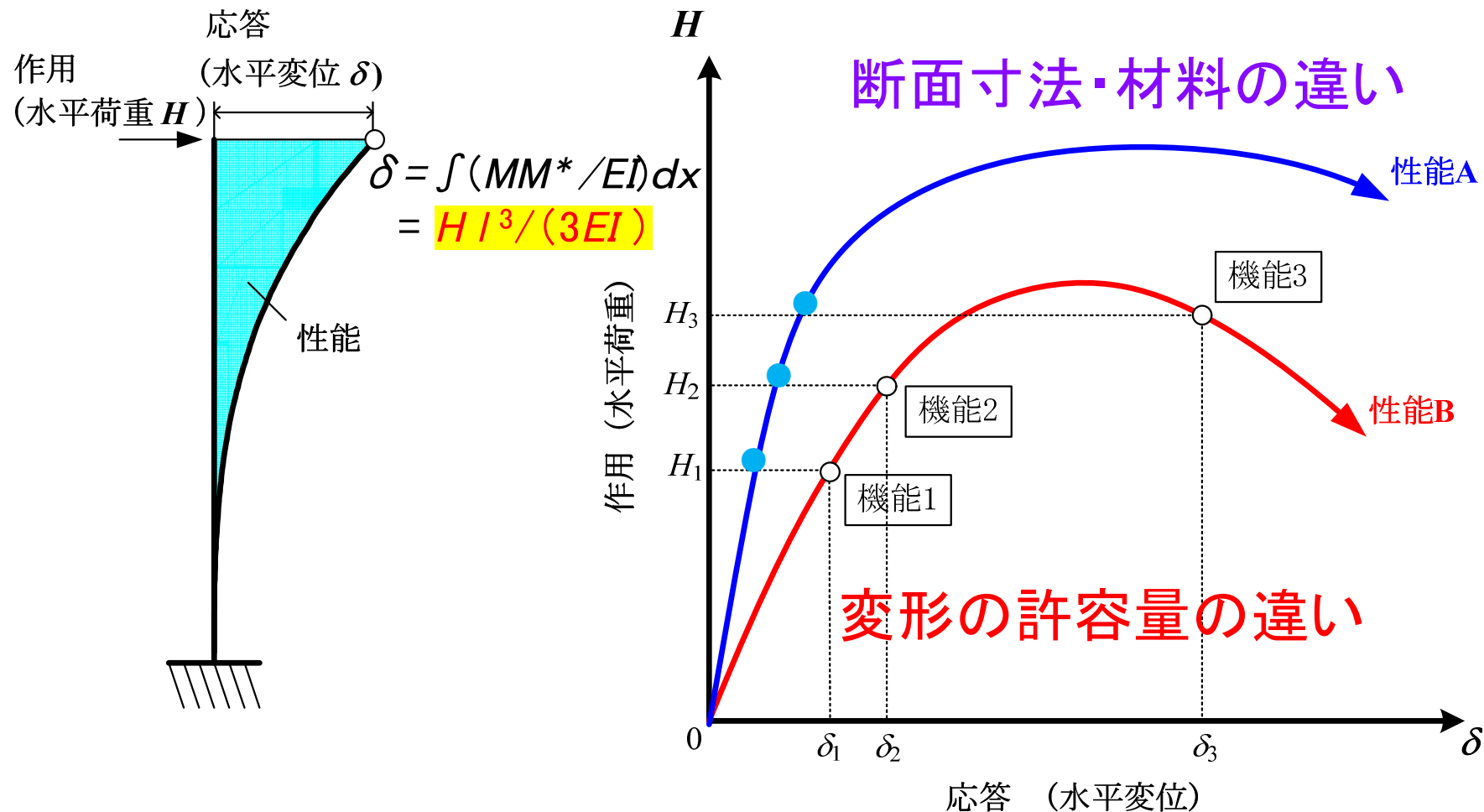
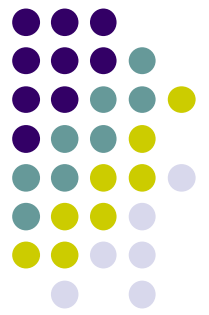


3.6 道路橋の整備費用の推移



4.1 構造物の性能

性能 (performance) と機能 (function)



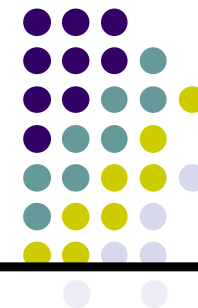
(a) Relation between action, and response and performance

(b) Horizontal load – horizontal displacement curves

Fig. Definition of function and performance for infrastructures

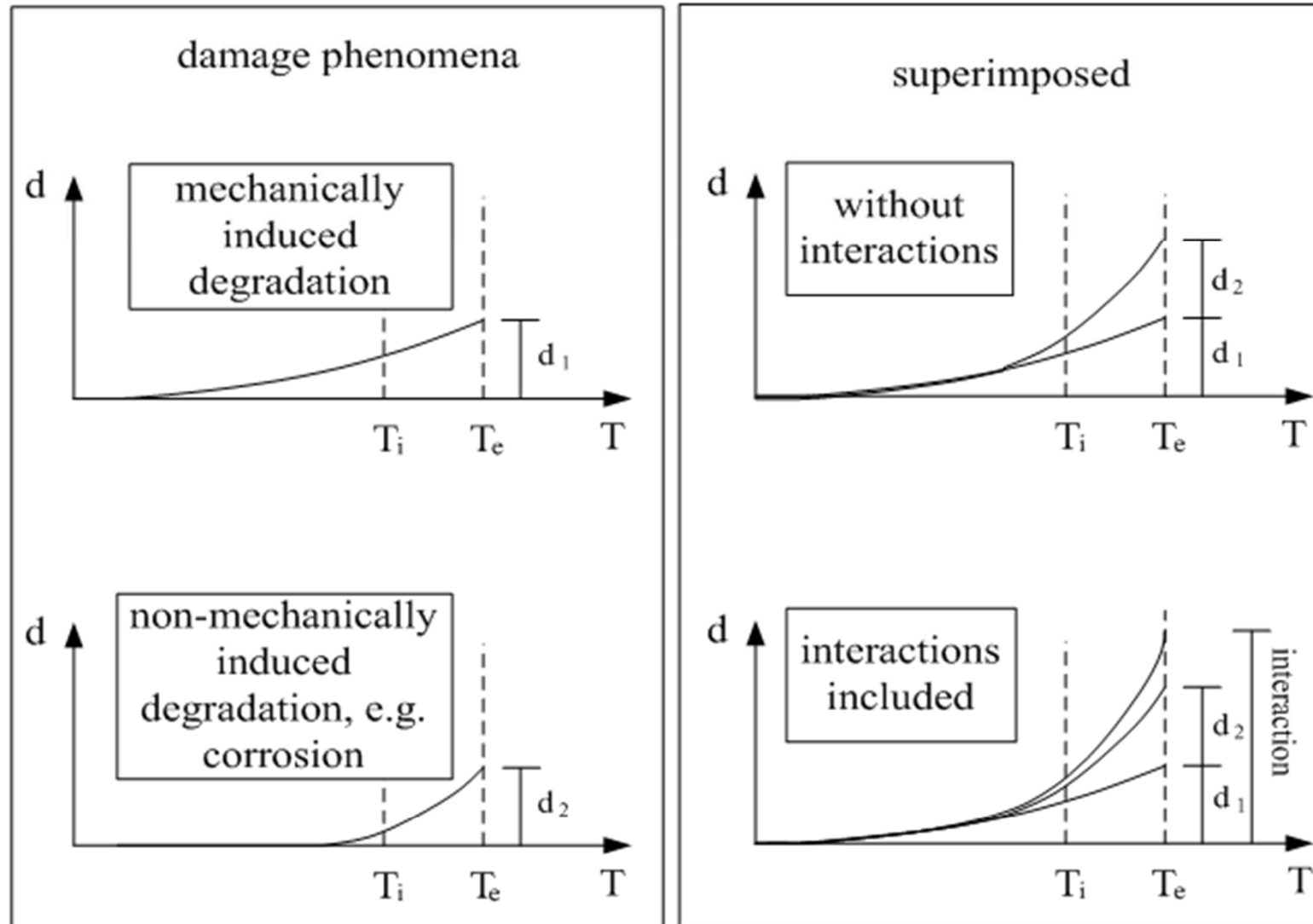
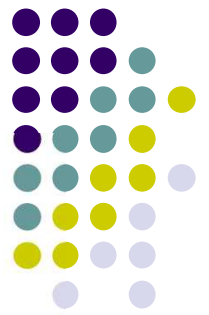
4.1 構造物の性能評価

強度解析に汎用有限要素法と評価指標



解析法	解析結果	考慮できる項目
弾性解析 固有値解析	変形と強度 弾性固有値と固有モード	
弾性有限変位解析 幾何学的非線形解析	初期降伏強度	初期たわみ
弾塑性有限変位解析 (複合非線形解析)	終局強度	材料特性 初期たわみ 残留応力

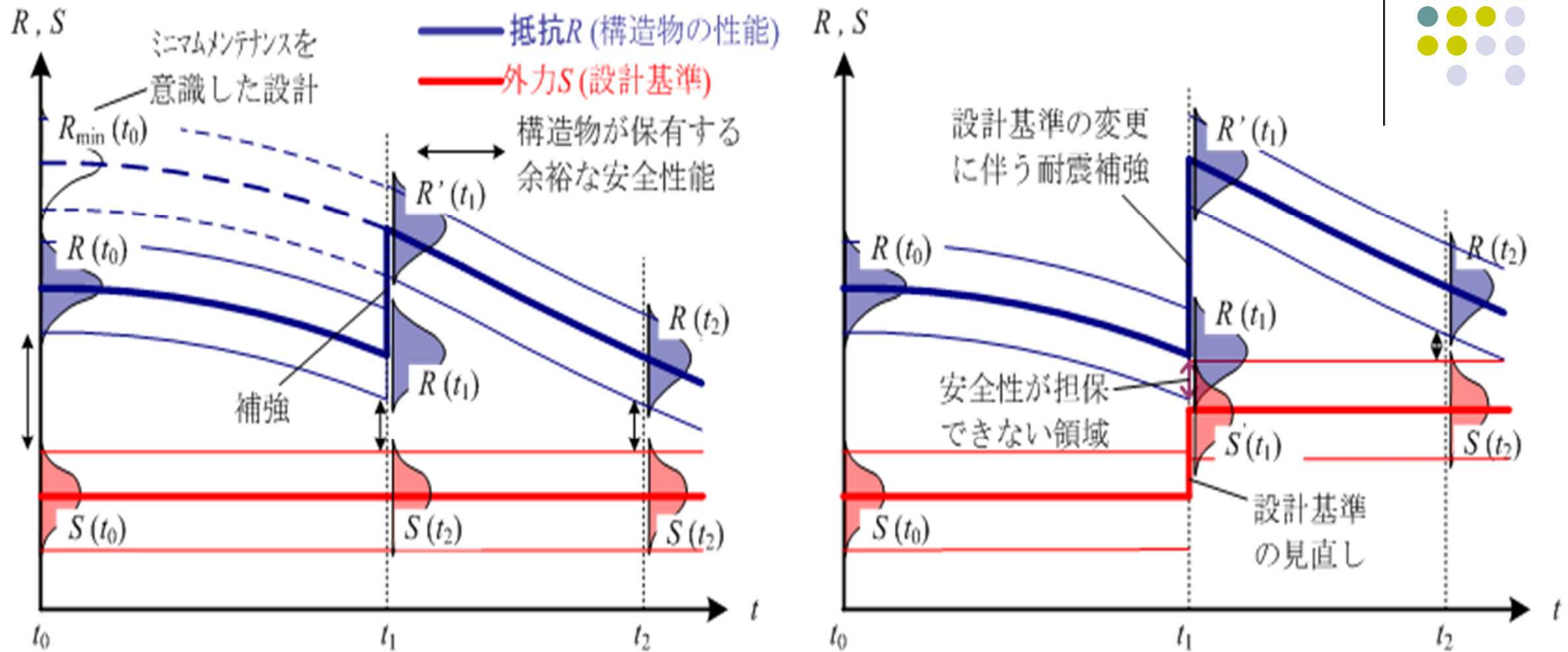
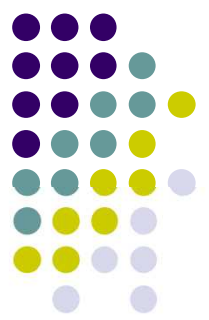
4.2 構造物の経年劣化過程と劣化度



T_i : intermediate time

T_e : end of observation time

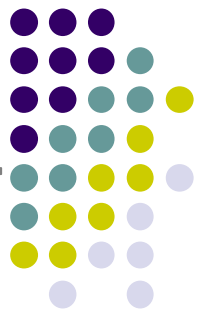
4.3 構造物の性能と外力作用の経年変化



Stangenberg, F., Breitenbücher, R., Bruhns, O. T., Hartmann, D., Höffer, R., Kuhl, D., Mesche, G. (Eds.) : **Lifetime-Oriented Structural Design Concepts**, Springer, pp.2-4, 2009.

4.3 構造物の性能確認

設計時, 供用時(劣化過程下, 突発時)の性能評価



$$Z = R - S$$

R : 構造物の抵抗性能(制限値)

S : 外乱で構造に生起される状態(作用値)

安全性の評価(性能評価)

$Z > 0$ 安全 $S/R \leq 1.0$ 1.4(許容応力度設計)

$Z < 0$ 危険 $S/R > 1.0$

$(\sum \gamma_s S) / (R / \sum \gamma_r)$ (部分係数設計による照査)

4.4 構造物の設計法と設計基準

ハンムラビ法典 (Code of Hammurabi)

社会基盤施設や建築物 ➡ 設計基準や法律に則って建設
ハンムラビ法典: 世界で2番目に古いとされる法律 バビロン (Babylon) の王ハンムラビ (King Hammurabi) がBC1792～1750に制定 「目には目を, 歯には歯を・・・」で知られ, 慣習法を成文化

1901年にイラン・スサで発見 アッカド語 282条の条文は①まえがき, ②本文, ③あとがき 法典の229条に建物に関する規程 現在, **パリ・ルーブル博物館**で保管



ウル・ナンム法典 (UR-NAMMU law)

世界最古 (BC2115頃-BC2095頃)

シュメール語による粘土板の法典 全57条

損害賠償法: 殺人, 窃盗, 傷害, 姦淫, 離婚, 農地

イスタンブール (トルコ) 考古学博物館所蔵

4.5 構造物の設計基準の変遷



The earliest known building laws were published by King Hammurabi of Babylon, in about 2200 BC.

They are preserved as a cuneiform inscription on a clay tablet and include such provisions as:

- ㊦ If a builder builds a house for a man and does not make its construction firm and if the house which he has built collapse and causes the death of the owner of the house, then that builder shall be put to death.
- ㊦ If it causes the death of the son of the owner of the house, then a son of the builder shall be put to death.
- ㊦ If it causes the death of a slave of the owner of the house, then the builder shall give the owner a slave of equal value.

4.5 構造物の設計基準の変遷



(2) 許容応力度設計法 (Allowable stress design method)

(3) 終局強度設計法 (Ultimate strength design method)

(4) 限界状態設計法 (Limit state design method)

使用限界状態 (serviceability), 終局限界状態 (ultimate),
疲労限界状態 (fatigue)

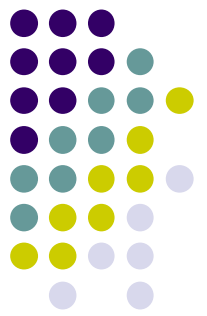
(5) 信頼性設計法 (Reliability design method)

Level I, Level II, Level III

(6) 性能照査型設計法 (Performance-based design method)

→ 性能準拠型設計法

4.5 構造物の設計基準の変遷 (道路橋示方書)



㊦1973(昭48), ㊩1978(昭53), ㊵1980(昭55)

構造物の設計・施工を行なうにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない。橋はできるだけ直橋とするのがよい。

㊿1994(平成6)

構造物の設計・施工を行うにあたっては、構造物の安全性、使用目的との適合性、施工および維持管理の容易さ、経済性、環境との調和を考慮しなければならない

㊿2002(平成14)

橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。

4.5 構造物の設計基準の変遷

(道路橋示方書・同解説 I 共通編 2014)

橋の設計にあたっては、つぎの項目を考慮しなければならない。

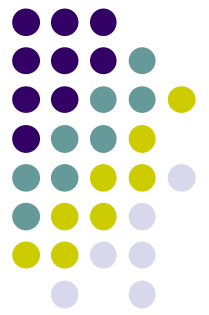
- 使用目的との適合性
- 構造物の安全性
- 耐久性
- 施工品質の確保

● **維持管理の確実性及び容易さ**

- 環境との調和
- 経済性

餘部鉄橋:トレスル鉄道橋. 1912(M45)/3/1-2010(H22)/7/16

4.6 道路橋示方書の変遷 1/2



1) 1886(M19)年道路築造保存方法, 内務省土木局

2) 1926(T15)年道路構造に関する細目案

3) 1939(S14)年鋼道路橋設計示方書(案)

4) 1956(S31)年鋼道路橋設計示方書

5) 1964(S39)年鋼道路橋設計示方書

1964(S39)年鉄筋コンクリート道路橋示方書

1964(S39)年杭基礎の設計指針

6) 1965(S40)年合成ゲタ設計施工指針

7) 1966(S41)年鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針

8) 1968(S43)年プレストレストコンクリート道路橋示方書

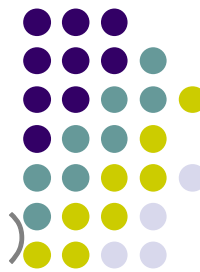
9) 1972(S47)年道路橋示方書(統合) I 共通編, II 鋼橋編

10) 1978(S53)年 III コンクリート橋編

11) 1980(S55)年 IV 下部構造編, V 耐震設計編

12) 1990(H2)年道路橋示方書

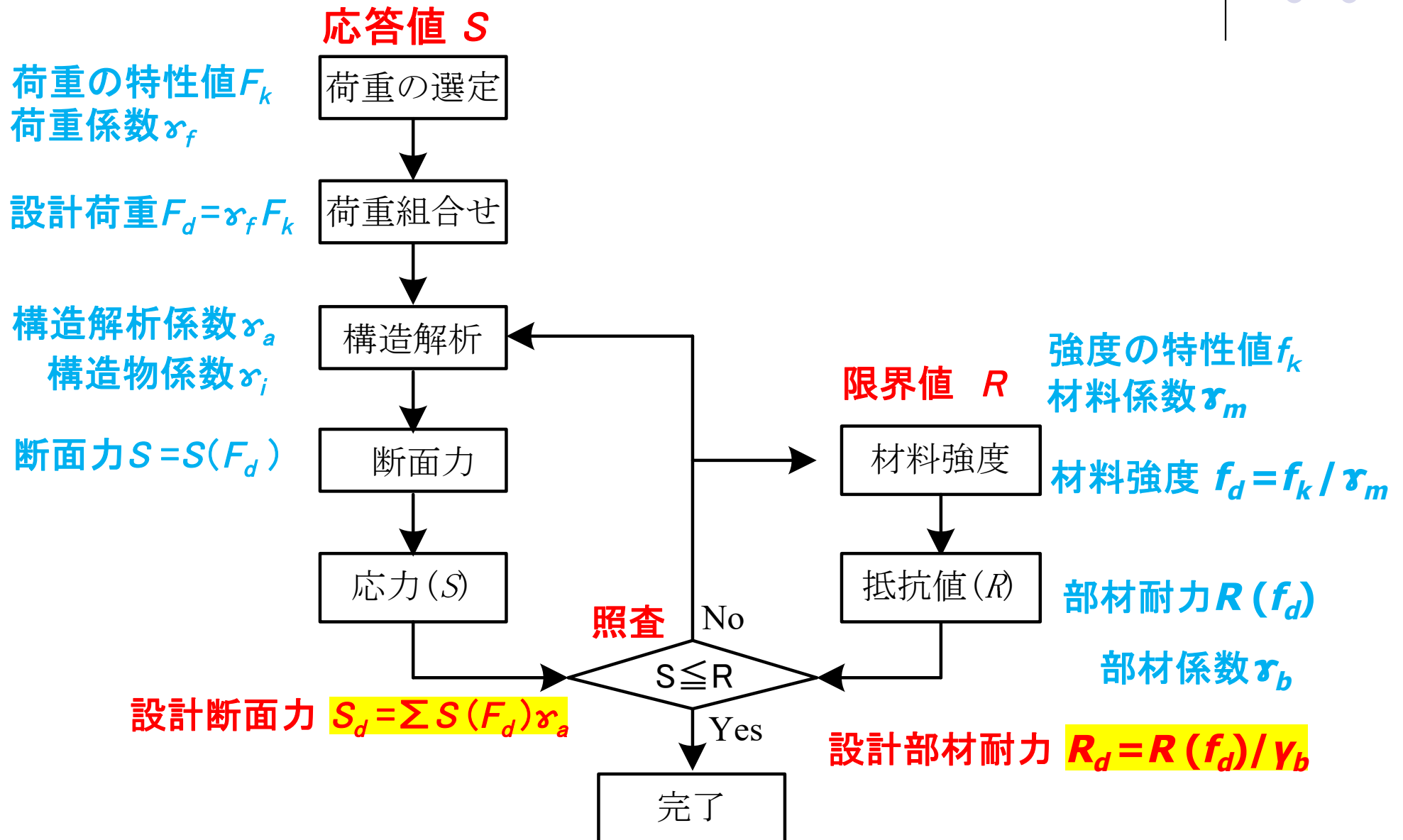
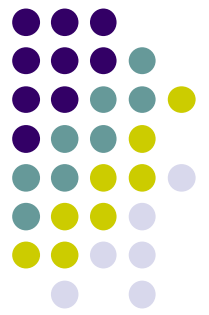
4.6 道路橋示方書の変遷 2/2



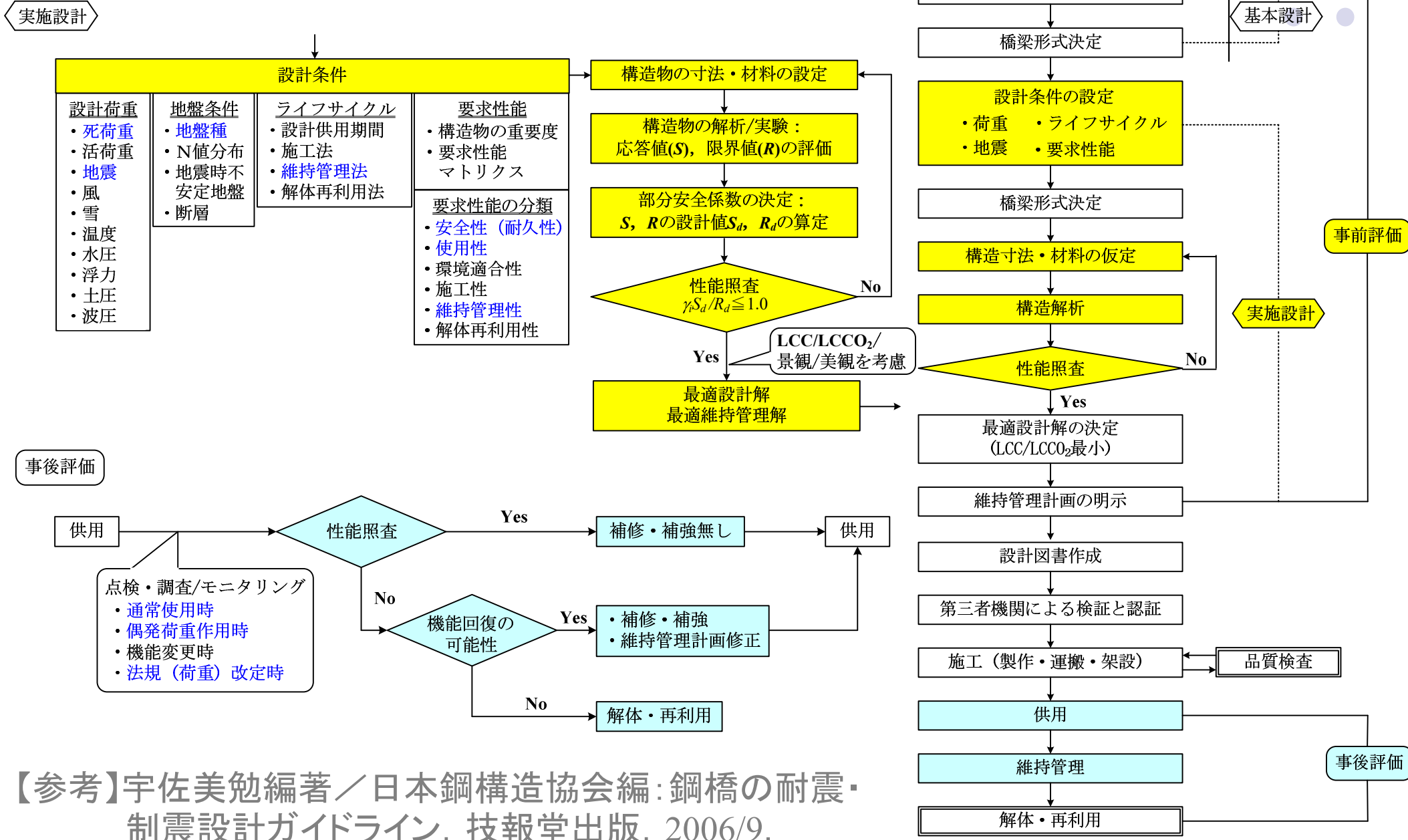
- 13) 1994(H6)年道路橋示方書(A・B活荷重)
- 14) 1996(H8)年道路橋示方書 V 耐震設計編(兵庫県南部地震1995/1)
- 15) 2002(H14)年道路橋示方書(**仕様規程** ➡ **性能規程**, II 鋼橋(疲労追加))
- 16) 2012(H24)年道路橋示方書(**設計段階から維持管理への配慮**, 東北地方太平洋沖地震後の見直し)
- 17) 2017(H29)年道路橋示方書(安全性や性能に対しきめ細やかな設計が可能な設計手法の導入, **設計供用期間100年の導入**. 適切な維持管理)
 - I 共通編, II 鋼橋・鋼部材編, III コンクリート橋・コンクリート部材編,
 - IV 下部構造編, V 耐震設計編

4.7 構造物の安全性照査

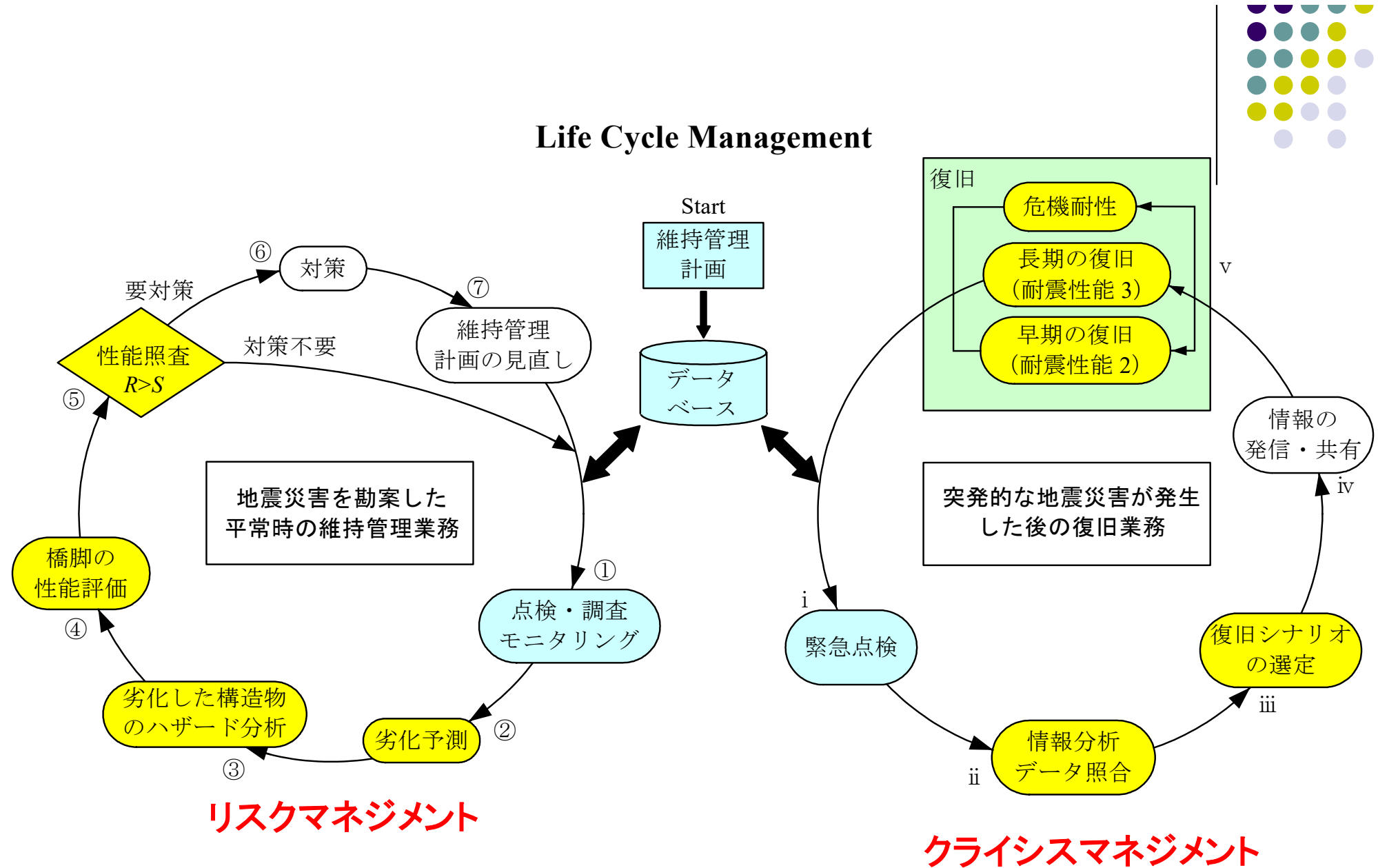
部分係数設計法 (partial factor design method, PFDM) による設計の手順



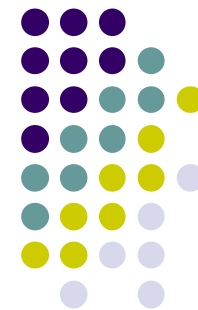
4.7 構造物の安全性照査 (維持管理を含む)



4.8 Life cycle management of infrastructures



5.1 橋の設計－基本理念



1) 既存橋梁の場合

長寿命化戦略に基づいた維持管理の充実

事後保全：施設の機能や性能に不具合が生じてから修繕等の対策を講
じること



予防保全：施設の機能や性能に不具合が発生する前に修繕等の対策を
講じる方法

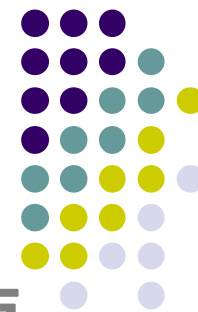
2) 新設の道路橋

Maintenance freeの思考



Minimum maintenance 思考への展開

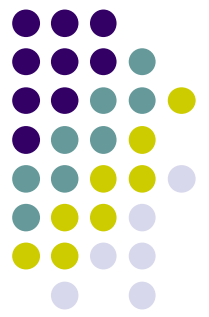
5.2 維持管理の確実性及び容易さが 確実な橋梁設計



- (1) 目視点検 ➡ ①容易な構造, ②容易な架橋地点
- (2) 構造形式 ➡ ①単純な構造, ②耐震性に優れた構造
- (3) 部材数や要素数 ➡ 少ない構造
- (4) 材料 ➡ 高規格より汎用的な材料
- (5) RC構造, PC構造の鋼棒 ➡ 耐腐食性に優れたもの

5.3 橋梁の維持管理に必要な技術

玉越隆史：性能保証型インフラアセットマネジメント
トー 道路と道路橋のリスクマネジメント，コロナ社
，2022.11.



(1) アセットマネジメント	第6章	
㉠ ライフサイクルコストの分析	第4章	
㉡ 予算の平準化		
(2) 点検，モニタリング，調査	第6章	6.1
(3) 劣化，耐久性などの予測技術	第6章	
(4) 健全性評価システム	第6章	6.2
(5) データ管理	第6章	6.3

5.3 橋梁の維持管理に必要な技術開発

土木学会誌: Vol.102, No.10, Oct. 2017

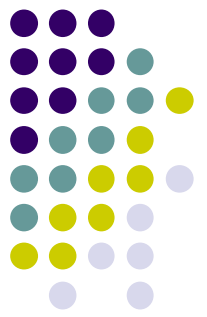
分野横断インフラ維持管理技術の開発とその社会実装－戦略的イノベーション創造プログラム(71テーマ)－

SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation

Promotion Program

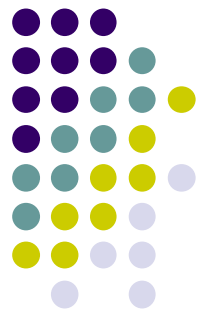
- ①アセットマネジメント技法
- ②点検・モニタリング・診断の技術
ロボット技術(点検・災害対応用)
- ③情報・通信活用技術 ICT, IoT
- ④構造材料, 劣化メカニズム, 補修・補強技術

http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/pamphlet_2017.pdf



Epilogue 1/4

持続可能な社会の構想・実現



SDGs ➡ Sustainable Development Goals とは？

- 持続可能な開発目標
- 国連総会(2015/9/25)で、持続可能な開発のために必要不可欠な、向こう15年間の新たな行動計画として「我々の世界を変革する”持続可能な開発のための2030アジェンダ”(Transforming our world the 2030 Agenda for Sustainable Development)」が採択
- 17の世界的目標, 169の達成目標

Epilogue 2/4

SDGsの世界的目標17

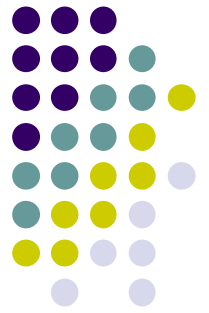
SUSTAINABLE
DEVELOPMENT GOALS

世界を変えるための17の目標



Epilogue 3/4

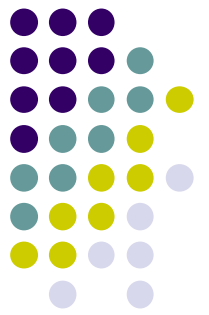
SDGsの世界的目標17



- 目標1 : 貧困をなくそう
- 目標2 : 飢餓をゼロに
- 目標3 : すべての人に健康と福祉を
- 目標4 : 質の高い教育をみんなに
- 目標5 : ジェンダー平等を実現しよう
- 目標6 : 安全な水とトイレを世界中に
- 目標7 : エネルギーをみんなにそしてクリーンに
- 目標8 : 働きがいも経済成長も
- 目標9 : 産業と技術革新の基盤をつくろう
- 目標10 : 人や国の不平等をなくそう
- 目標11 : 住み続けられえるまちづくりを
- 目標12 : つくる責任つかう責任
- 目標13 : 気候変動に具体的な対策を
- 目標14 : 海の豊かさを守ろう
- 目標15 : 陸の豊かさも守ろう
- 目標16 : 平和と公正をすべての人に
- 目標17 : パートナリーシップで目標を達成しよう

Epilogue 4/4

持続可能な社会 (Social Development Goals, SDGs) の構想・実現



① **耐久性**(durability)に富んだ社会基盤の継続的整備

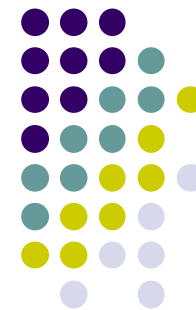
☞ 長寿命化

② **自然災害に脆弱**な社会システムの改善

☞ 強靱化 (resilient society)

③ **想定以上を想像した**危機管理に基づいた社会インフラ整備

☞ 設計・建設・維持管理 (total management society)



ご清聴ありがとうございました

Thank you for your attention !