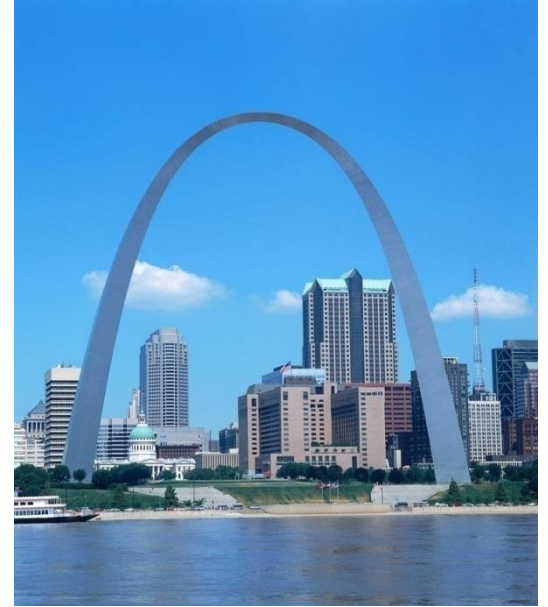


コンクリート構造物設計の要点

阪 田 憲 次

建設材料

- 鋼
- コンクリート
- れんが
- 木材



コンクリートの特徴

- 世界のあらゆる地域において製造可能
- 多種多様な強度、形状、寸法の構造物に適用
- 信頼性、耐久性の高い材料
- 価格低廉(セメント、砂、砂利、水)
- 圧縮には強いが引張には弱い
- アルカリ性 ⇔ 鉄筋の腐食を防ぐ
- 線膨張係数が鋼の線膨張係数と同一
- 付着力(接着力)が大きい

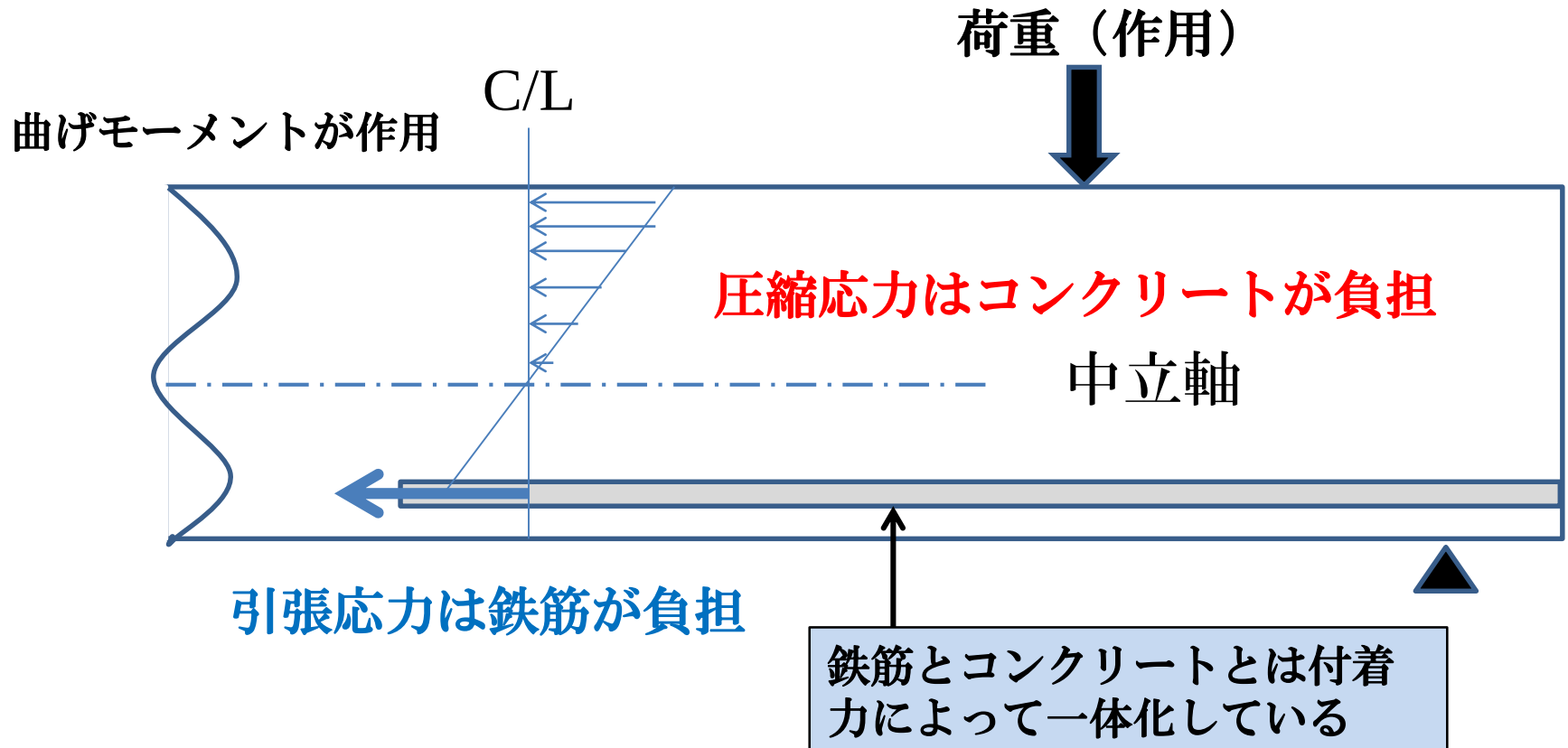
鋼とともに、主要な建設材料である

コンクリート構造物の設計

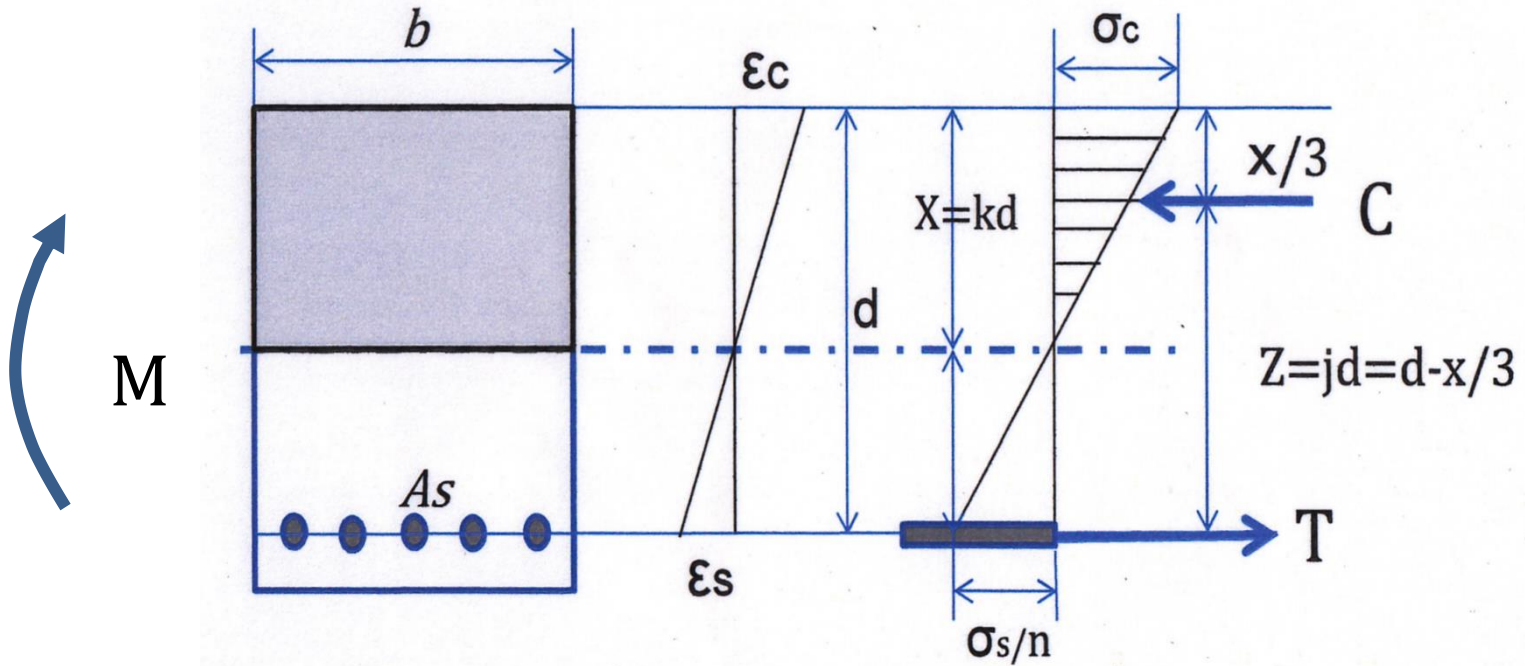
構造物が具備すべき条件(要求性能)

- 1) **安全性**: 自重、自動車、列車、群衆、地震、風、雪、土圧、水圧、波圧、潮流圧、温度変化、収縮差等の種々の荷重作用 に対して安全である。
- 2) **耐久性**: 凍結融解、繰返し荷重、高温、中性化等の作用および、海水(硫酸塩)、塩化物イオン、酸・アルカリ等の環境作用に抵抗し、長年月にわたって使用に耐える。
- 3) **使用性**: 通常の使用に際し、過度のたわみ、振動等の不都合を生じない。
- 4) **環境性**: 景観、環境負荷などが問題になることもある。
- 5) **経済性**

鉄筋コンクリートの原理



許容応力度法



- 1) つり合い条件: $C = T$ ($C = bx\sigma_c/2$ $T = \sigma_s A_s$)
- 2) 平面保持の仮定: $\sigma_c/\sigma_s/n = x/(d-x)$
- 3) モーメントのつり合い条件: $M = CZ = TZ$
 $\sigma_c = M/\alpha b d^2 \leq \sigma_{ca}$ $\sigma_s = M/\beta b d^2 \leq \sigma_{sa}$
- 4) 許容応力度: $\sigma_{ca} = f'_c/3$ $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2 \doteq f_y/1.5$

許容応力度法における耐久性への対応

・水セメント比の制限

1) 耐凍害性:表1の値以下でなければならない。

表 1 コンクリートの耐凍害性をもととして水セメント比を定める場合における
AE コンクリートの最大の水セメント比 (%)¹⁾

気 象 条 件 断面 構造物の露出状態	気象作用が激しい場合または凍結融解がしばしば繰返される場合		気象作用が激しくない場合、氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い場合 ²⁾	一般の場合	薄い場合 ²⁾	一般の場合
(1)連続してあるいはしばしば水で飽和される部分 ¹⁾	55	60	55	65
(2)普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合	60	65	60	65

1) 水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分および、これらの構造物のほか、桁、床版等で水面から離れてはいるが融雪、流水、水しぶき等のため、水で飽和される部分。

2) 断面の厚さが 20 cm 程度以下の構造物の部分。

2) 海洋構造物(塩分環境下)に用いるコンクリートの水セメント比は表2の値以下とする。

表 2 海洋コンクリートにおける耐久性から定まる
AE コンクリートの最大の水セメント比 (%)¹⁾

施工条件 環境区分	一般の現場施工 の場合	工場製品、または材料の選定および 施工において、工場製品と同等以上 の品質が保証される場合
(a) 海上大気中	45	50
(b) 飛 沫 帯	45	45
(c) 海 中	50	50

注：実績，研究成果等により確かめられたものについては，耐久性から定まる最大の水セメント比を，表 5.4 の値に 5～10 程度を加えた値としてよい。

3) 耐化学薬品性：

① SO_2 として0.2%以上の硫酸塩を含む土や水に接するコンクリートは表2の(C)の値以下とする

② 融氷剤を用いることが予想される場合は、(b)の値以下とする。

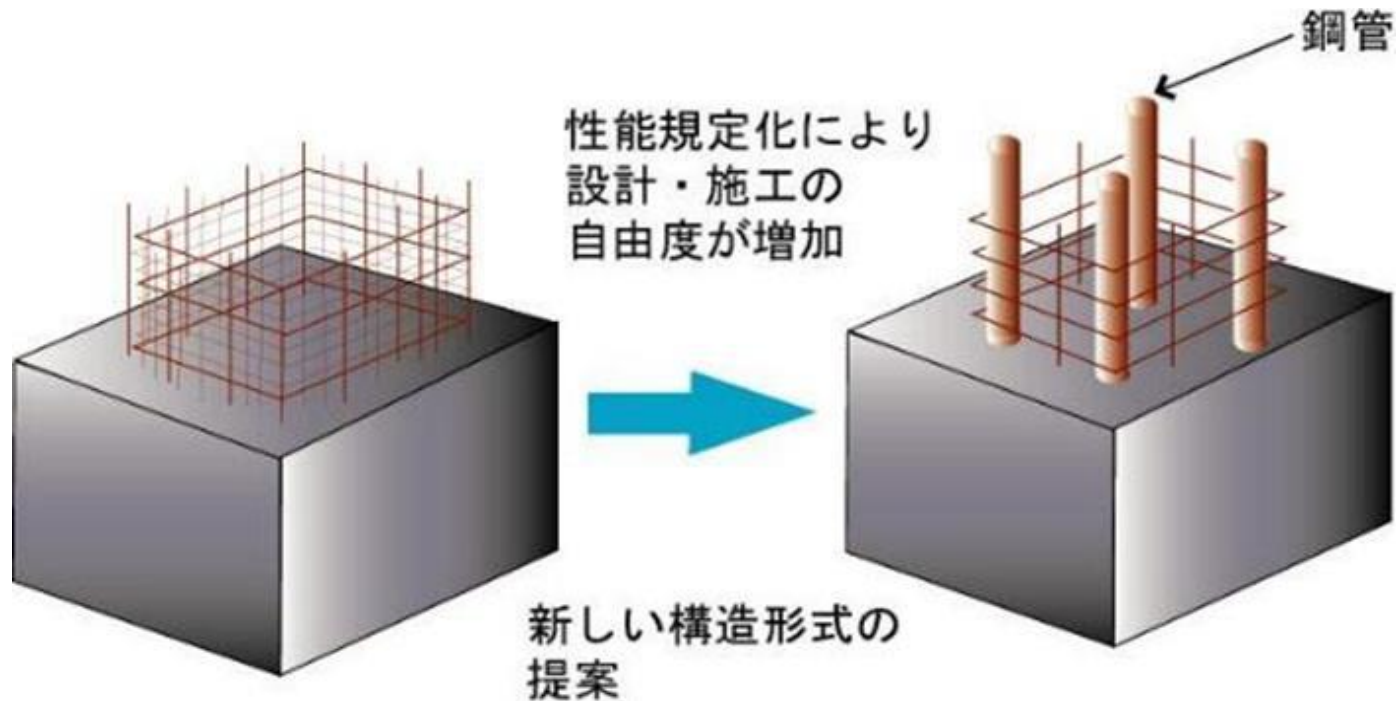
4) 水密性:普通および軽量コンクリートで55%以下、ダムの外部コンクリートで60%以下とする。

仕様規定から性能規定への移行

- **仕様規定**が、構造物の材料や工法、寸法を具体的に規定するのに対して、**性能規定**は、構造物に要求される「**性能**」を規定するものです。
- 性能規定化の効果
 - ①社会への説明性の向上
 - ②基準類など国際標準との整合を確保
 - ③設計・施工の自由度の増加が新技術の採用を促進
 - ④技術競争力の向上による品質の向上とコスト縮減

(国土交通省ホームページより)

性能規定の効果 (国土交通省HPより)



- 鉄筋が過密
- 鉄筋組立が複雑
- コンクリート打設が大変

← 照査 →

- 鋼管を活用して鉄筋を少量化
- 鉄筋加工、組立の省力化
- コンクリートの打設が容易

土木学会コンクリート標準示方書

要求性能

性能照査型設計
(2002年)

安全性

限界状態設計法
(1986年)

耐久性

耐久性照査
(1999年)

.....

許容応力度設計法
(1931年)

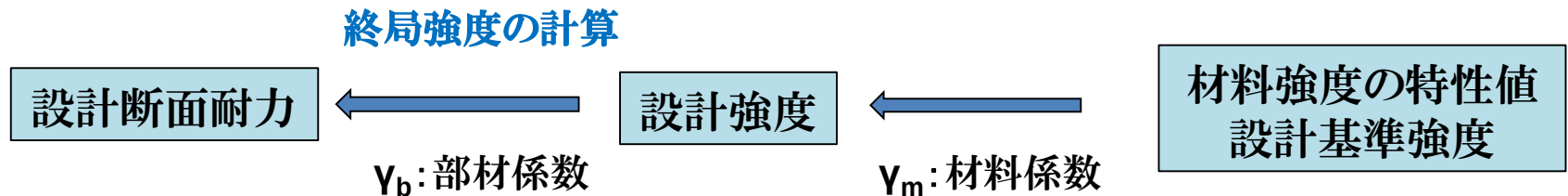
仕様規定

安全性の照査(限界状態設計法)

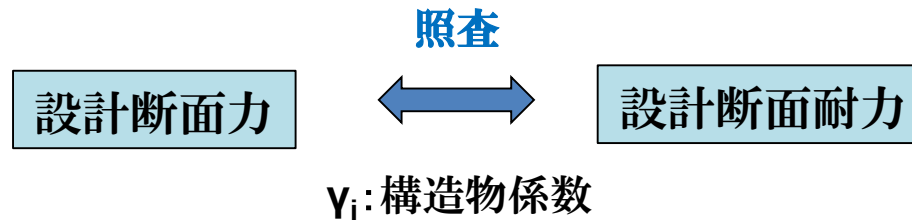
• 断面力の決定



• 断面耐力の決定



• 照査



ブロック積み擁壁工法 「道路土工－擁壁工指針」

- 擁壁の設計に当たっては、原則として、想定する**作用**に対して**要求性能**を設定し、それを満足することを**照査**する。
- 擁壁の設計は、論理的な妥当性を有する方法や実験等による検証がなされた手法、これまでの**経験・実績**から妥当とみなせる手法等、適切な知見に基づいて行うものとする。
- **通常**の**ブロック積み擁壁**では、**経験に基づく設計法**により、**ブロックの積み方は原則として練積で、水平方向の目地が直線とならない谷積にするものとする。**(仕様規定)



耐久性の照査

設計の段階で耐久性を保証する

予測式 ← コンクリートの配合条件等

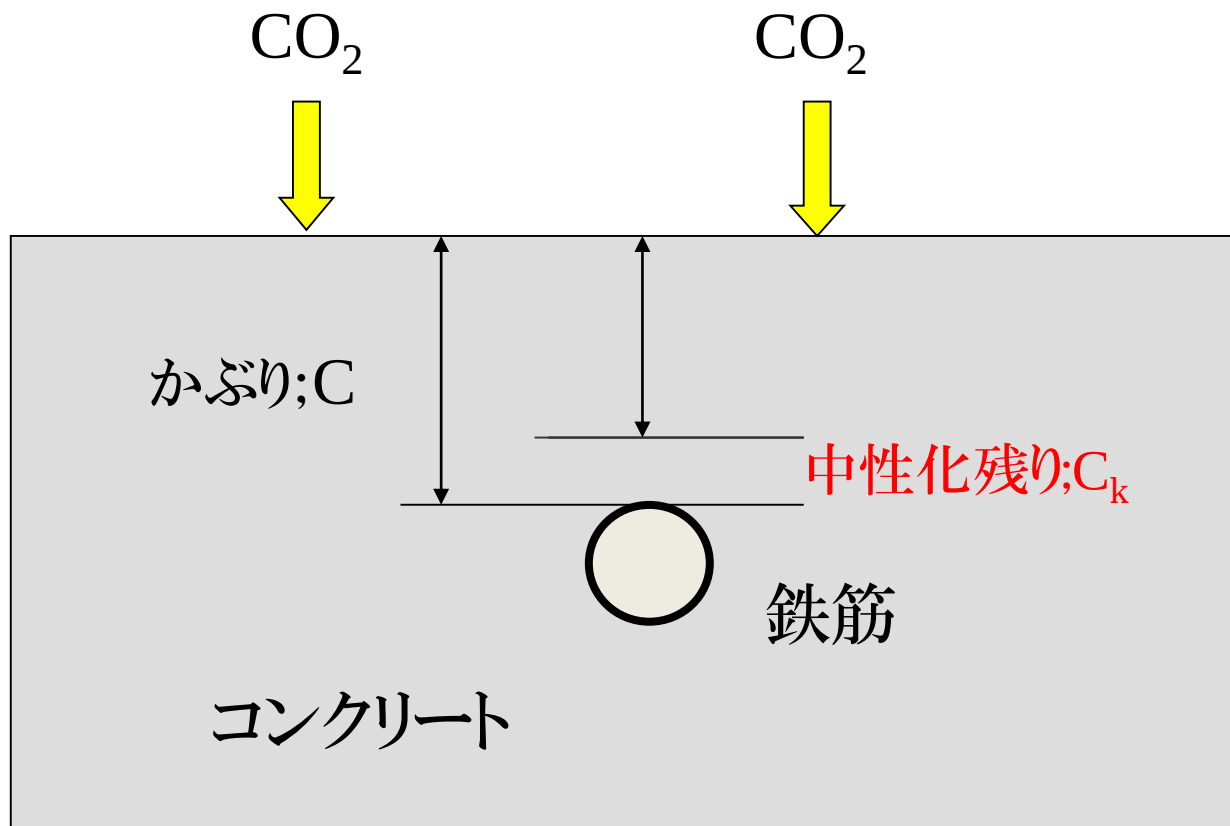


(安全係数)X(劣化現象の設計値) ≤ (制限値)



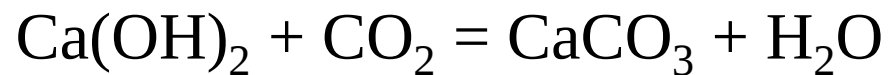
実験、実績

中性化



pH=12.5

pH=8.5



中性化の照査

構造物係数:1.0（重要構造物1.1）

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0$$

鋼材腐食発生限界深さ = $C - C_k$
 C : かぶりの期待値（設計かぶり）
 C_k : 中性化残り

通常環境；10mm

塩分環境下；10～25mmとするのがよい。

中性化深さの設計値 = $\gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$

$$\alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

α_k : 中性化速度係数の特性値

β_e : 環境作用の程度を表す係数

γ_c : コンクリートの材料係数

中性化に対する
耐用年数（年）

各種係数等予測値

- 中性化速度係数 : $\alpha_p = 3.57 + 9.0 \cdot W/B$
- 塩化物イオンに対する拡散係数 :
普通ポルト ; $\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5$
高炉、シリカ ; $\log D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2$
- 相対動弾性係数 : 試験 JIS A 1148(A法)で求めてよい。
最大 W/C を表で与える。
- 耐化学的侵食性 : 最大 W/C を表で与える。
- コンクリートの透水係数 : 試験で求める。
 $\log K_p = 4.3(W/C) - 12.5$

耐震設計

- 1891年(明治24年):濃尾地震(M=8.0程度)、死者7万人余
- 1916年:震度法の提案(佐野利器)

建物に動的に作用する地震力を静的に慣性力に置き換え、これを建物の水平方向に作用させたときに生じる応力やひずみが限界値に達しないようにする。

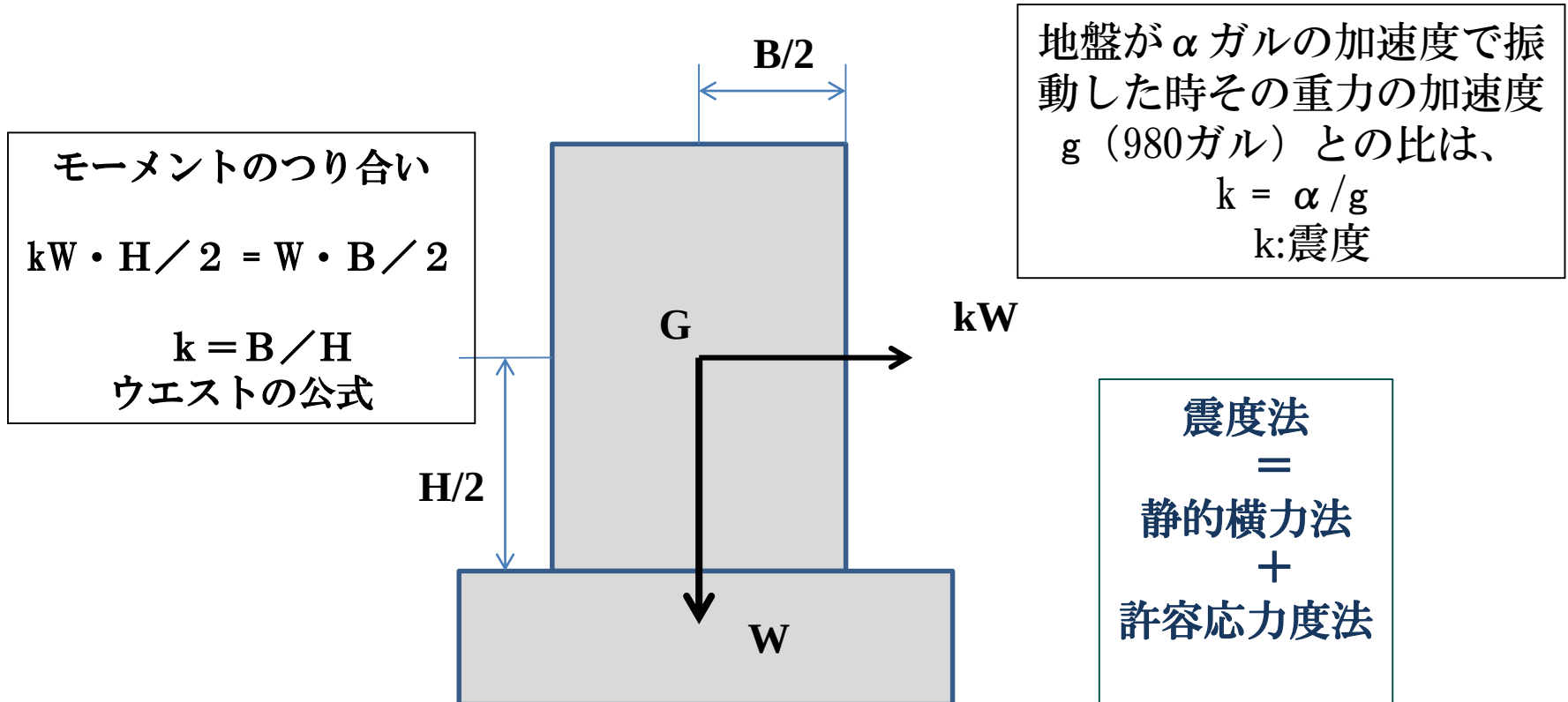
$$\text{震度} = \frac{\text{建物に作用する慣性力}}{\text{建物の重量}}$$

- 地盤の揺れ＝構造物の揺れ
- 震度法＝静的横力法＋許容応力度法
- 震度(k)をいくりにするか？

地域、地盤、建物の損傷状況、重要度、経済性等を考慮して決定する。

例えば、名古屋;0.25～0.3、大阪;0.35

震度とは



- 1923年：**関東地震** (M=7.9)

橋脚、橋台、基礎に耐震上問題があることが分かった。

日本興業銀行ビル(震度=0.067で設計)；関東地震で無傷であり、**震度法**が評価されたが、内藤多仲理論による**耐震壁**、塑性域の変形性能、不静定次数等が影響しての結果である。

- 1926年：道路構造に関する細則案(物部長穂)

橋の建設地点に生じる最も強い地震力を対象とし、橋の各部に最大の応力を生じさせる震度を考慮する。これは**橋に対する世界初の耐震基準**であるが、設計の具体的な記述はなく、耐震設計の実務は技術者に委ねられていた。

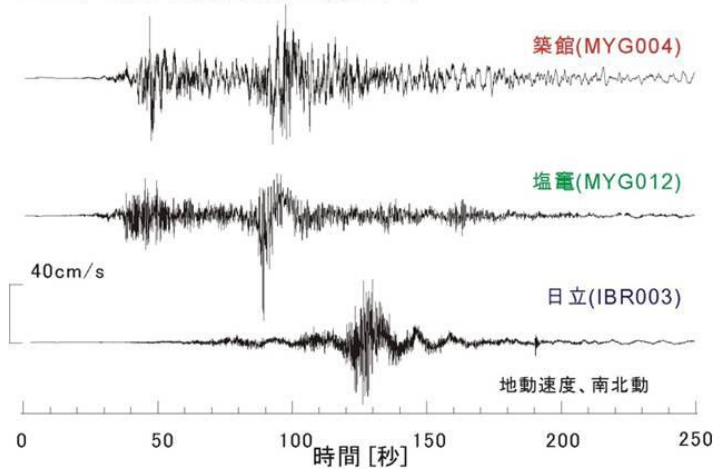
新潟地震までの38年間、震度法が必要以上に過信され、橋の耐震技術に関する進歩はなかった。

- 1964年:新潟地震(M=7.5)
- 1971年:道路橋耐震設計指針(耐震基準)
 - ①標準震度を0.2とし、これに地域、地盤、重要度の補正係数をかけて設計震度を求める。
 - ②震度は地盤の揺れではなく、橋の揺れ(応答加速度)に基づいて定める。「応答を考慮した修正震度法」(動的概念)
橋の固有周期に基づく修正係数は最大で1.5(過少評価)<2.5(神戸)
 - ③液状化対策 ④落橋防止装置
- 1990年:地震時保有耐力法
RC橋脚にだけ適用され、設計地震動は、関東地震の加速度
応答スペクトル(最大1g)で与える。
- 1995年:兵庫県南部地震(M=7.3)→コンクリート標準示方書(後述)
- 2011年:東北地方太平洋沖地震(M=9.0)
津波に対する備え(後述) 長周期地震動

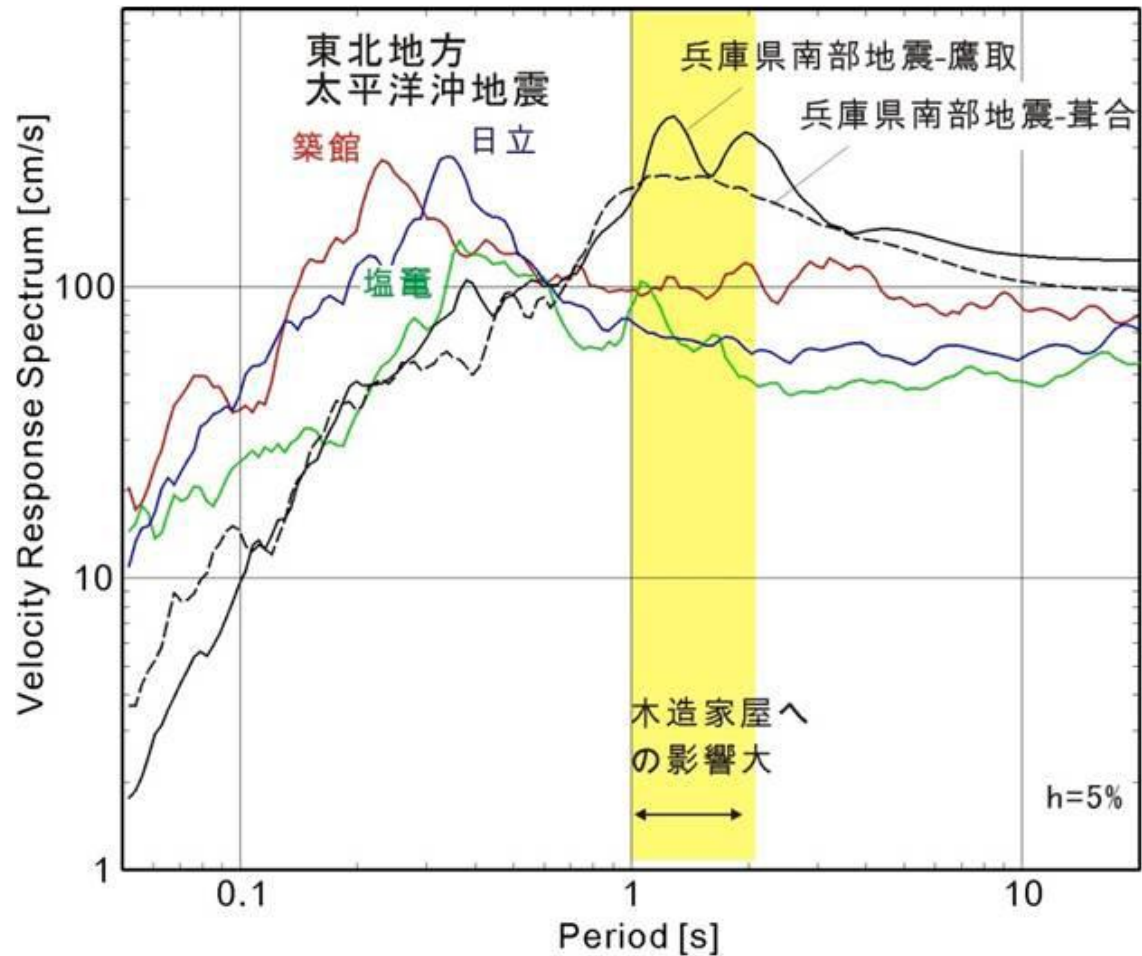
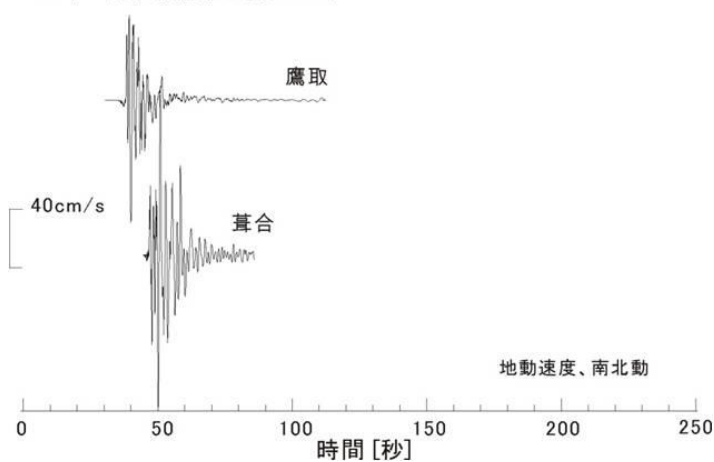
速度波形と速度応答スペクトル

東京大学地震研究所古村教授作成

2011年 東北地方太平洋沖地震(M9.0)



1995年 兵庫県南部地震(M7.3)



地震による構造物の破壊

阪神高速道路3号神戸線8径間PC高架橋

(1969年完成) 設計震度:
0.2(水平方向) 0.1(上下方向)



土木学会コンクリート標準示方書（2017年制定）

4.2 地震の影響(設計編：標準)

- (2) **レベル1地震動**は、設計供用期間中に生じる可能性が比較的高い地震動としてよい。
- (3) **レベル2地震動**は、設計供用期間中に生じる確率は小さいが、非常に強い地震動とし、一般に、以下の地震動のうち、その影響の大きい方としてよい。
 - (i) 直下もしくは近傍における**内陸の活断層**による地震動（**兵庫県南部地震における神戸ポートアイランド強震計の記録（12年版）**）
 - (ii) 陸地近傍で発生する大規模な**プレート境界地震**による地震動（**中央防災会議が提唱している想定東海地震の断層モデル；MW=8.0(12年版)**）

耐震補強、耐震設計の効果



在来線(阪神以降の耐震設計)

東北新幹線
(未補強のものでのみ軽微な損傷)

津波による橋梁の破壊

(2011年：東北地方太平洋沖地震)



北リアス線 島越駅付近 ラーメン高架橋

土木学会コンクリート標準示方書(2012年制定)

6.4 作用の種類(設計編:本編)

6.4.1 一般

性能照査にあたっては、一般に以下に示す荷重を考慮することとする。

- 死荷重 ・ 活荷重 ・ 土圧 ・ 水圧 ・ 流体力 ・ 波力
- プレストレスト力 ・ 風荷重 ・ 収縮およびクリープによる影響 ・ 温度の影響 ・ 日射の影響 ・ 地震の影響
- 施工時荷重 ・ その他

土木学会コンクリート標準示方書（2012年制定）

6.4.5 水圧、流体力および波力（設計編：本編）

- (1) 静水圧、地震時動水圧、流体力および波力は、構造物の種類、環境条件、部材の寸法等に応じて定めるものとする。

【解説】流れによる流体力の特性値 P_w は、次式により求めている。

$$P_w = 0.5 \rho \cdot v^2 \cdot C_v \cdot A \quad (\text{N})$$

ここに、

ρ ：水の密度

v ：流速

C_v ：抵抗係数

A ：構造物を流れ方向に投影した面積

津波に対する備え (中央防災会議・港湾空港技研)

- **レベル1津波**：津波の内陸への侵入を防ぐ海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波であり、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波である。

発生確率；1回/100年 **防災（ハード対策）**

- **レベル2津波**：住民避難を柱とした総合防災対策を構築する上で想定する津波であり、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波である。

発生確率；1回/1000年

減災（ハード対策＋ソフト対策）

コンクリート構造物の劣化



塩害による鉄筋の腐食:国総研木村嘉富氏提供

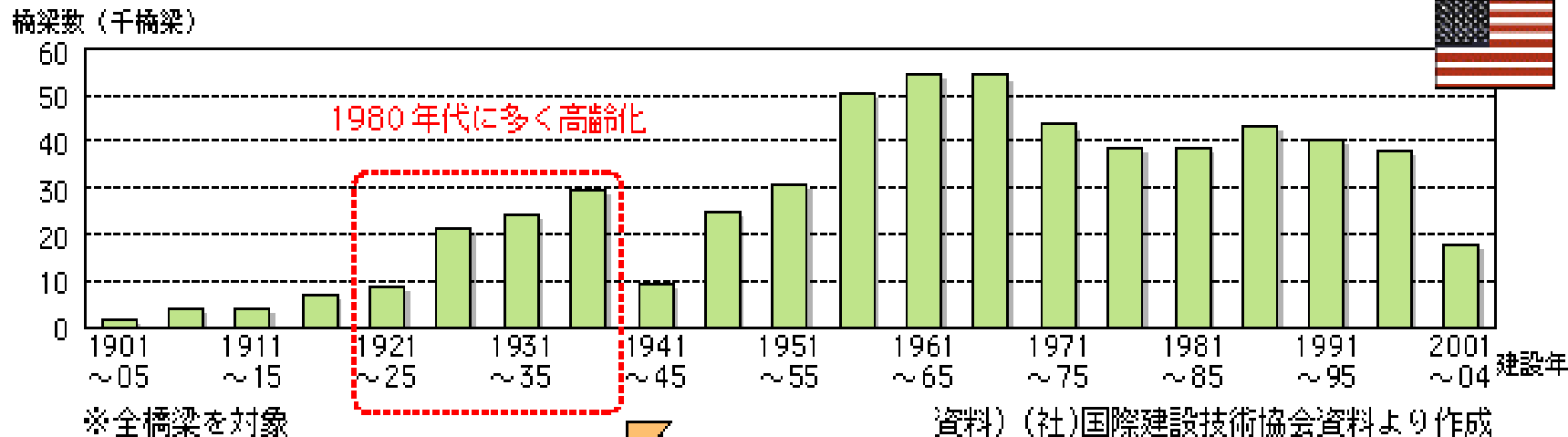
アルカリ骨材反応によるひび割れ



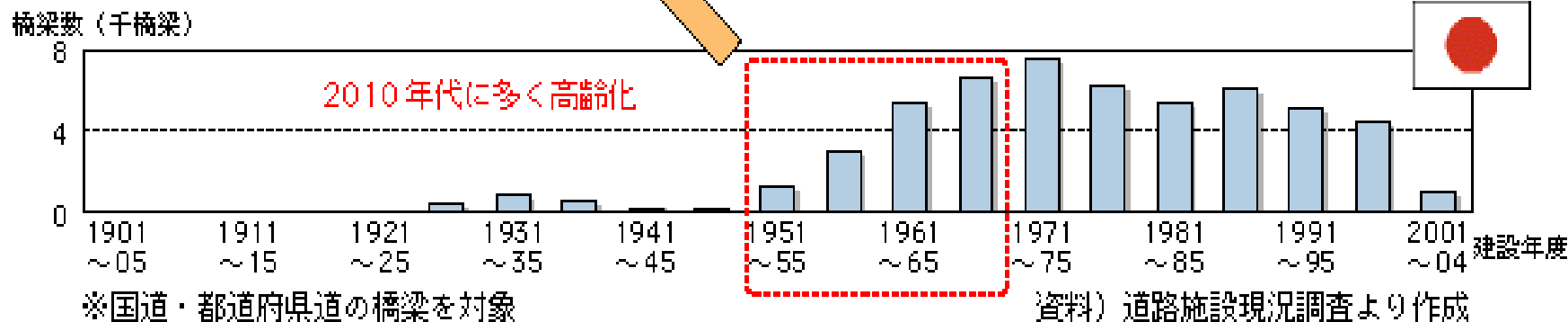
橋梁の劣化状況

日米の橋梁の建設年の比較

【米国の橋梁の建設年】



【日本の橋梁の建設年】



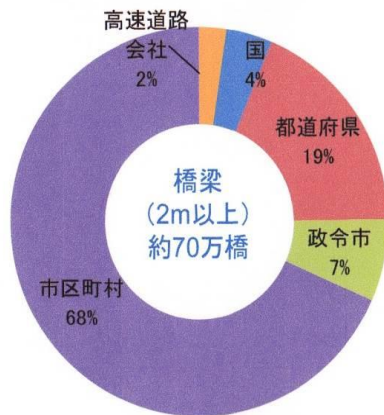
インフラの老朽化と維持管理

道路構造物の現状(橋梁)

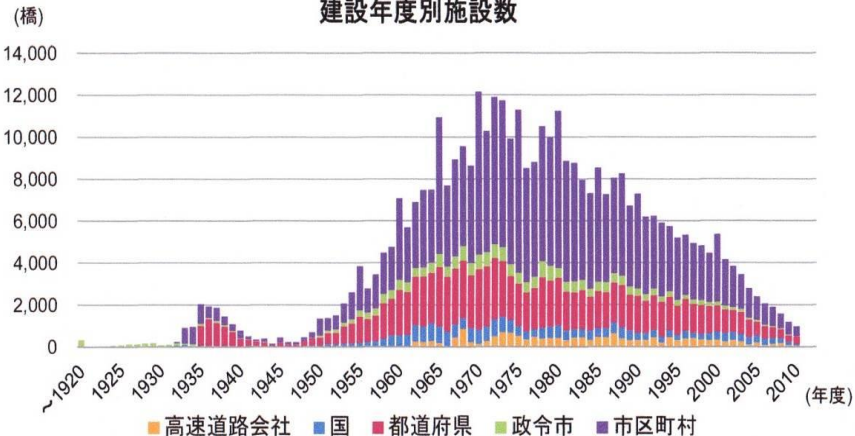
※東日本大震災の被災地域は一部含まず
 ※都道府県・政令市は、地方道路公社を含む
 ※H25.4道路局集計

全国の橋梁数は約70万橋。このうち、建設後50年を超えた橋梁(2m以上)の割合は、現在は18%であるが、10年後には43%、20年後には67%へと増加

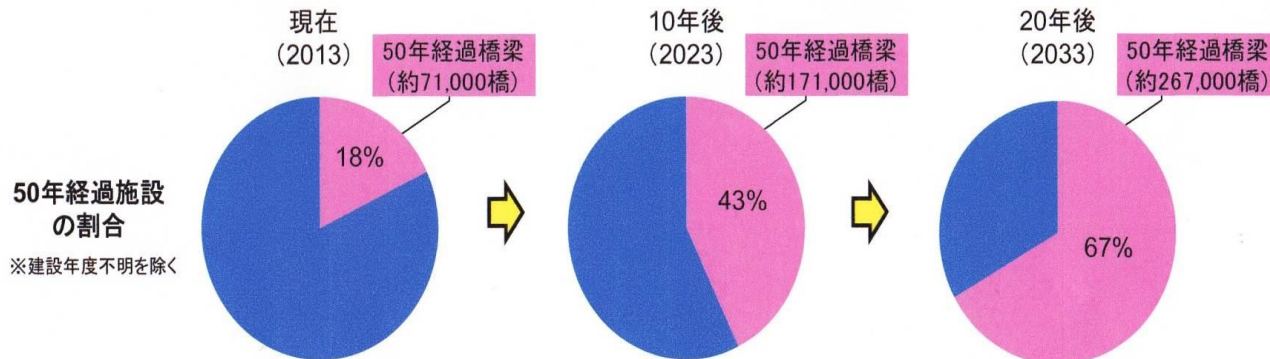
道路管理者別ごとの施設数



建設年度別施設数



注)この他、古い橋梁など記録が確認できない建設年度不明橋梁が約30万橋ある ※2011~2012年度はデータ無し



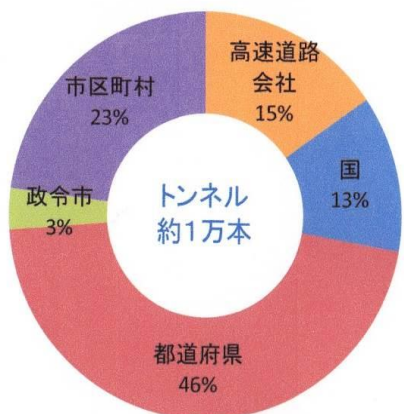
(国土交通省HP)

道路構造物の現状(トンネル)

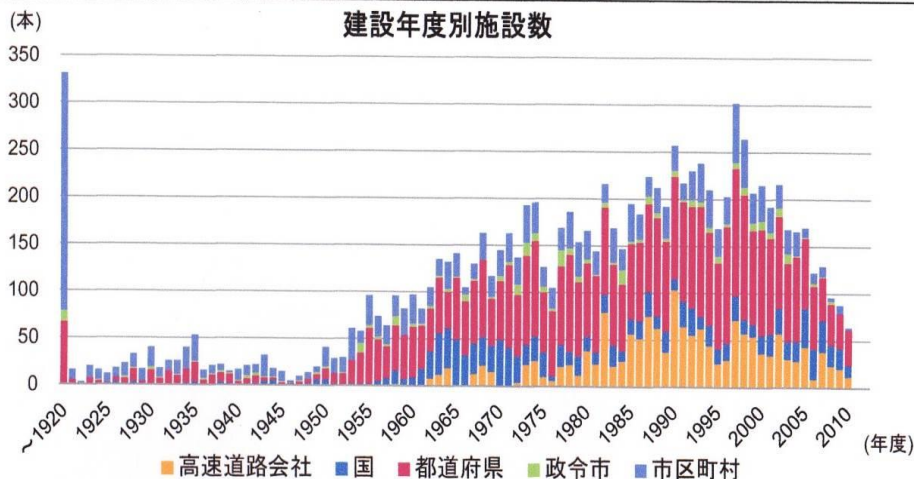
※都道府県・政令市は、地方道路公社を含む
※H25.4道路局集計

全国のトンネル数は約1万本。このうち、建設後50年を超えたトンネルの割合は、現在は20%であるが、10年後には34%、20年後には50%へと増加

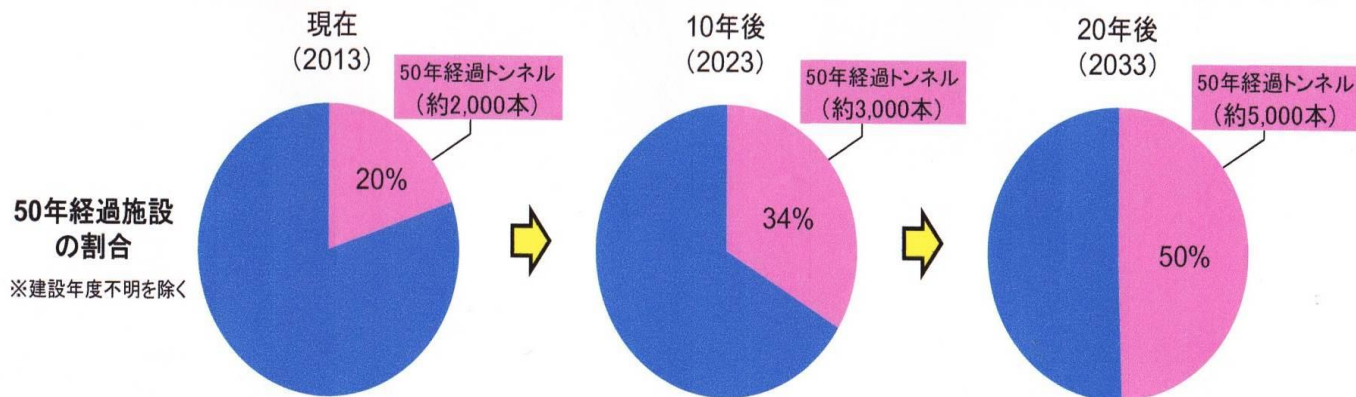
道路管理者別ごとの施設数



建設年度別施設数



注)この他、古いトンネルなど記録が確認できない建設年度不明トンネルが約250本ある ※2011～2012年度はデータ無し



インフラのメンテナンス

社会基盤(インフラ)の長寿命化・長期効用



メンテナンスの時代
(2013年メンテナンス元年)

* メンテナンスマネジメントシステムの構築

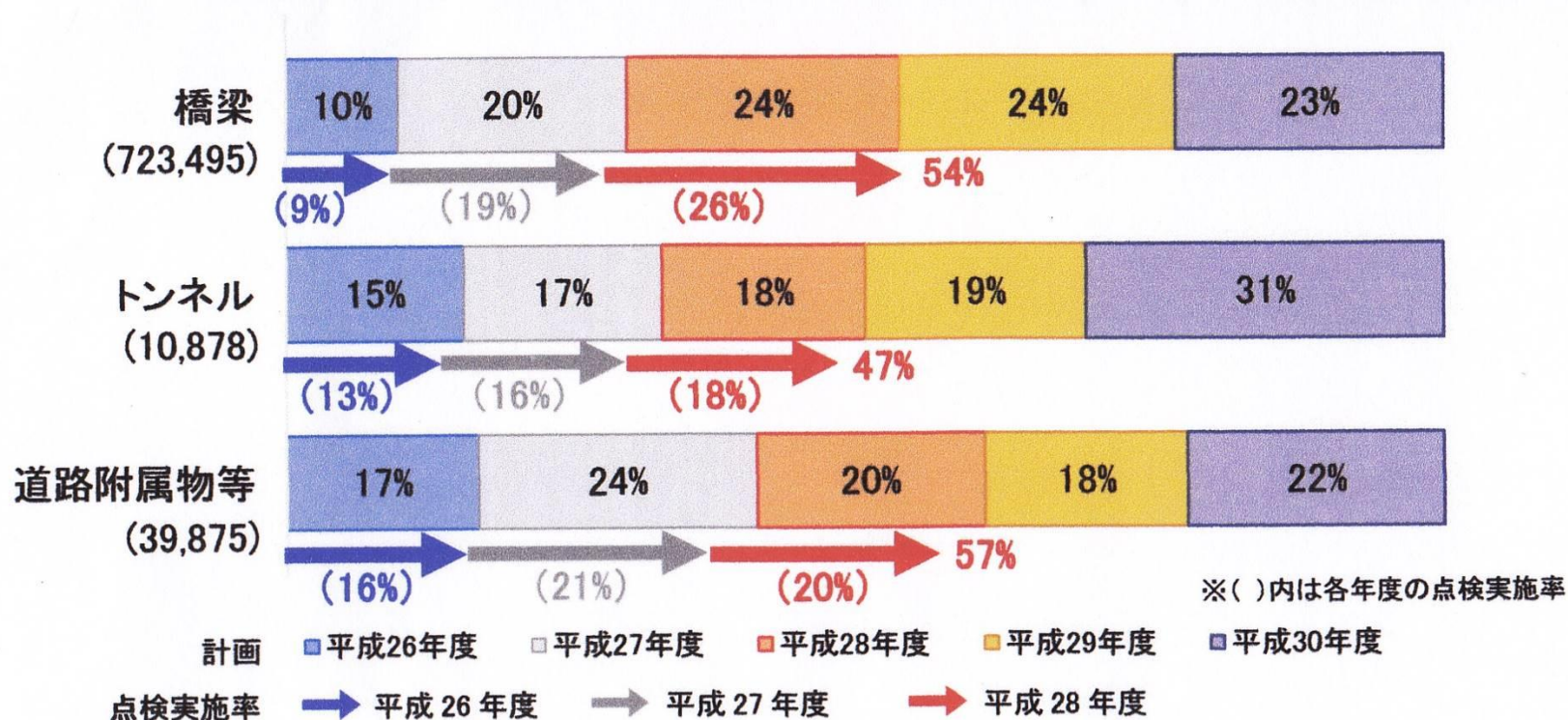
- 1) データベース、カルテの整備
- 2) **予防保全**(劣化が進む前に、こまめに補修して長寿命化を図る、更新投資額の削減と維持管理費の増加:アセットマネジメントで評価)
- 3) メンテナンス技術の開発
 - **劣化度検査の頻度(5年に一度、近接目視)**
 - **検査箇所及びその方法(どこをどう検査するか)**

インフラのメンテナンス(続)

- ・劣化度の判定(診断の標準化)
- ・劣化度に応じた補修あるいは補強の程度と方法
- * 社会構造および環境変化に応じたメンテナンスの高度化、高機能化
- ・人口減少(インフラの廃棄or 更新)
- ・異常気象(ゲリラ豪雨に対応する貯水量の増加)
- * メンテナンスを担う人材の育成と資格認定
- ・地方における人材確保と官民学の協働(住民参加)
- ・公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者資格登録(国土交通省)
- * 財源の確保(道路特定財源等)

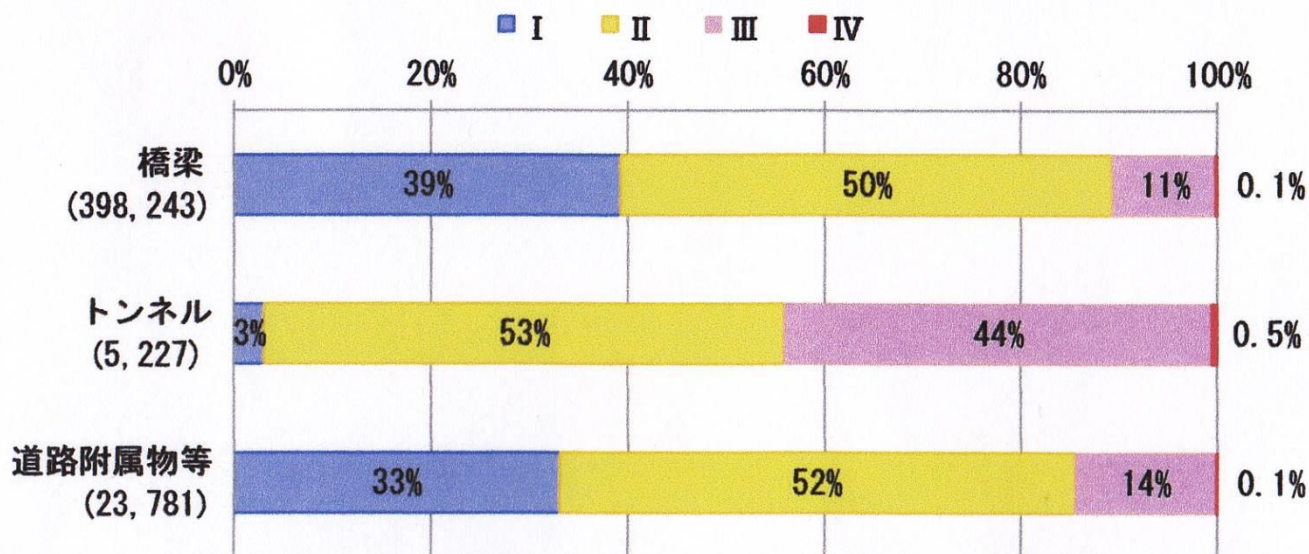
点検・修繕の進捗状況(平成26年度～28年度)

○ 5年間の点検計画と平成 26～28 年度の累積点検実施率(全道路管理者合計)



点検・修繕の進捗状況(平成26年度～28年度)

○橋梁、トンネル、道路附属物等の判定区分の割合(全道路管理者合計)



※四捨五入の関係で合計値が 100%にならない場合がある(次頁以降も同様)。

点検が実施された橋梁の数 (3年間) : **398,243**件

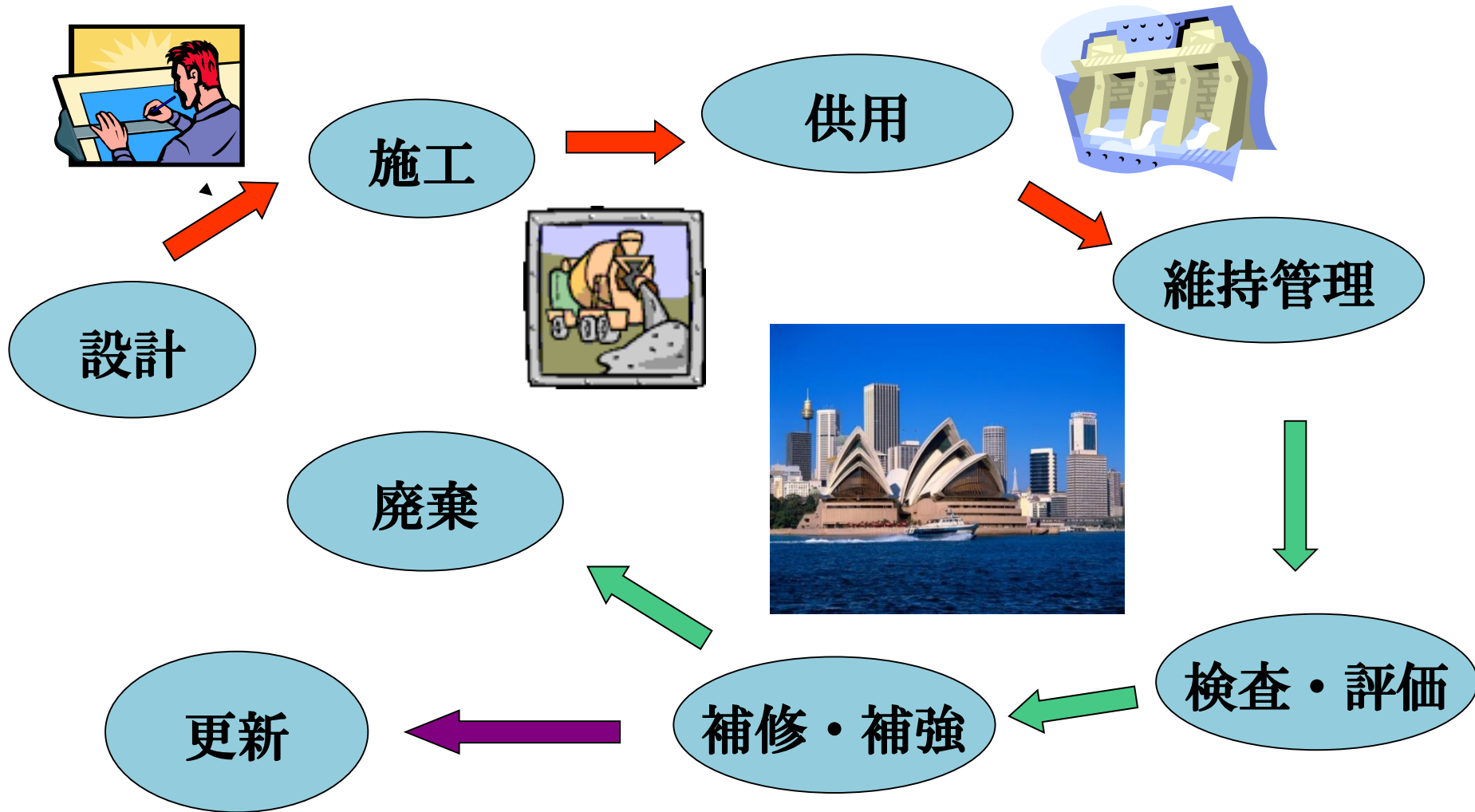
判定 I (健全)、判定 II (経過観察段階)、判定 III (早期措置段階)

判定 IV (機能に支障があり、緊急措置が必要) : **396**件(0.1%)

修繕・架替 ; **272**件(57%)、撤去・廃止 ; **92**件(23%)

機能転換 ; **1**件(0.3%)、未定**76**件 ; (19%)

コンクリート構造物のライフサイクル



まとめ

- コンクリート構造物の設計は、その施工および維持管理等、そのライフサイクル全体を考慮したものでなければならない。
- コンクリート構造物の設計は、従前の仕様規定型から性能規定型に移行する。
- 従前の仕様規定型も、過去の実績、経験の蓄積の中で、目的とする性能を満足することが確認されたもので、要求性能に至る一つの方法である。
- コンクリート構造物の性能照査の方法、すなわち設計法は、基準や示方書等に取り上げられることによってはじめて普及する。
- 津波がコンクリート構造物へ及ぼす影響については、今後解決すべき設計上の課題である。