

橋梁の耐震設計の 変遷（歴史）

前原 康夫（八千代エンジニアリング）
矢部 正明（長大）

橋梁の耐震設計法 の変遷(歴史)

関東大震災から兵庫県南部地震まで

八千代エンジニアリング(株) 前原康夫

地震被害と耐震設計

- | | |
|----------------|-------------|
| • 1891年濃尾地震 | 耐震設計法研究の契機 |
| • 1923年関東地震 | 耐震設計の義務付け |
| • 1964年新潟地震 | 液状化と落橋防止 |
| • 1968年十勝沖地震 | 保耐設計法研究の契機 |
| • 1978年宮城沖地震 | 支承部損傷・せん断損傷 |
| • 1982年浦河沖地震 | 主鉄筋段落し部の破壊 |
| • 1995年兵庫県南部地震 | 大規模地震対策が主流 |

震害・地震観測・実験・計算機
の進展と耐震計算法の変遷

震度法→修正震度法→地震時保有耐力法
動的解析→非線形動的解析

(1) 関東地震と震度法

- 1923年(大正12年) 関東地震(M7.9)

酒匂川国道橋
(神奈川県・小田原市)
の被害



- 1926年(大正15年) 道路構造に関する細則案
[最強地震を考慮。具体的な手法示されず]
- 1939年(昭和14年) 鋼道路橋設計示方書案
[水平加速度0.2G、鉛直加速度0.1G]
- 1956年(昭和31年) 鋼道路橋設計示方書改訂
[水平震度0.1~0.35]

震度法の定義

• 地震力を構造物に静的に作用させて計算する耐震計算法(S47耐震設計指針)

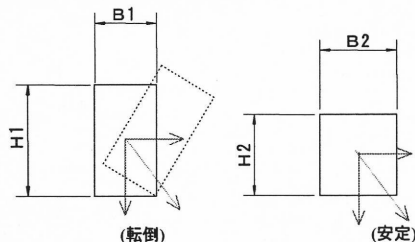
• 地震の影響によって構造物および地盤に生じる作用を震度を用いた静的な荷重に置き換えて耐震性能を照査を行う方法(H14道示V)

水平震度の概略推定法

墓石の転倒条件

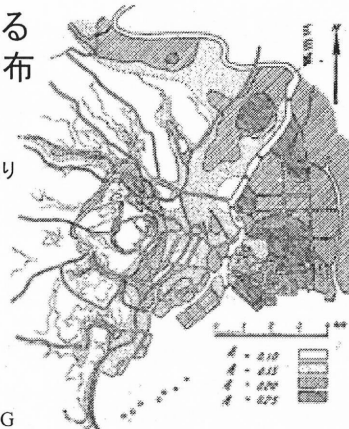
底面作用力の偏心距離 $\geq B/2$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{k_h W \cdot H/2}{W} = k_h \cdot H/2 \geq \frac{B}{2} \rightarrow k_h \geq \frac{B}{H}$$



関東地震による 東京の震度分布

今村博士による推定
土木耐震学(昭和8年)より



<現在の推定>

地盤加速度0.3~0.4G

弾性応答加速度0.7~1.0G

昭和31年鋼道路橋設計示方書 設計水平震度

地域	地盤	軟弱地盤	やや良好な地盤	良好な地盤
しばしば大地震が起った地域		0.35~0.30	0.30~0.20	0.20~0.15
大地震が起った事にある地域		0.30~0.20	0.20~0.15	0.15~0.10
その他の地域		0.20	0.15	0.1

(2)新潟地震と強震動観測

- 1964年(昭和39年)新潟地震(M7.5)
周辺地盤の液状化による落橋等の被害



昭和大橋の落橋

昭和大橋の被害から

⇒液状化対策・落橋防止対策の必要性

- 1971年(昭和46年)道路橋耐震設計指針
[落橋防止と液状化の対策が初めて規定]
[修正震度法] ← 地震動観測分析結果の反映

昭和46年耐震設計指針の 主要改訂点

- 地域や地盤種別に応じた震度の具体化
- 鉛直震度・地中部震度は考慮しない
- 液状化による支持力を無視する地盤を設定
- 高橋脚に対する修正震度法の適用
- 落橋防止構造の設置
 - 可動支承部における移動制限装置
 - 下部構造頂部縁端を支承縁端までの距離
 - 桁間連結装置

強震動特性の反映

- 昭和30年頃から、強震計(加速度計)が設置される。
- 強震動の分析結果により、固有周期によって構造物の応答特性が異なることが判明。
0.4~1secで応答が2~3倍に増幅
長周期では応答が低減

固有周期に応じた設計震度(昭和46年)

固有周期 T

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

m : 質量
 k : 剛性

$m = W/g$ W : 重量 g : 重力加速度
 $k = W/\delta$ δ : 自重を水平方向に作用させた場合の変位

基礎変形考慮した固有周期

基礎固定の場合 $\delta = \frac{h^3}{3EI} W$

基礎変形考慮 $\delta = \left(\frac{h^3}{3EI} + \frac{h_0}{k_R} + \frac{1}{k_H} \right) W$

$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ 、 $\delta = 2.01 \cdot \delta$ (昭和55年)

加速度応答スペクトル

1質点系の運動方程式

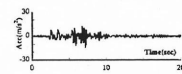
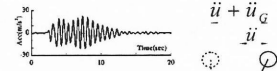
$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = -m \frac{d^2 u_G}{dt^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

$$\ddot{u} + 2h\omega_0 \dot{u} + \omega_0^2 u = -\ddot{u}_G$$

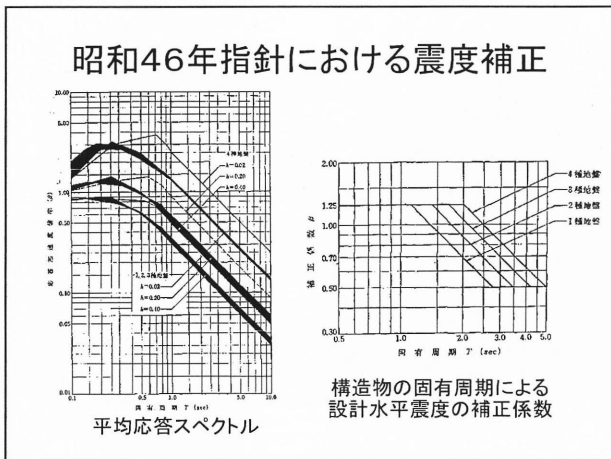
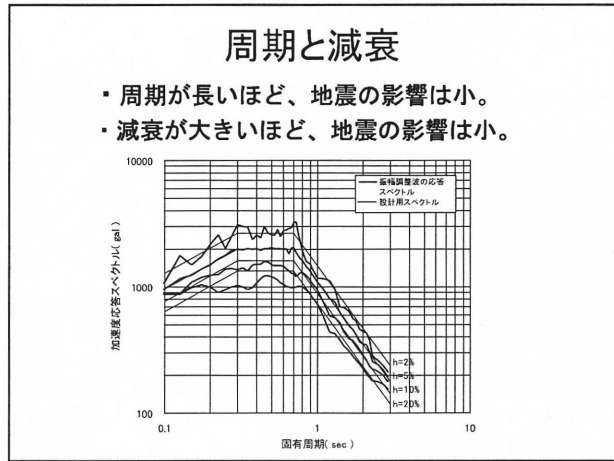
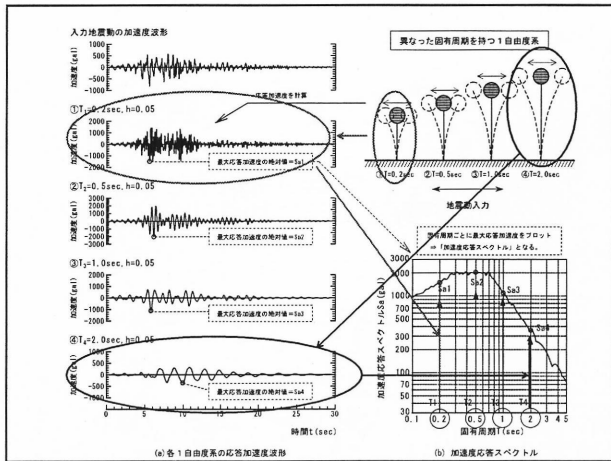
強震動記録($\ddot{u}_G(t)$)を用い、一つのTとhに対する上記2階微分方程式を解く。

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$



Tとhをパラメータとして、応答絶対加速度の最大値 $(\ddot{u} + \ddot{u}_G)_{\max}$ を算定

絶対加速度応答スペクトル



(3) RC構造や支承部の震害

- ・ 1968年(昭和43年)十勝沖地震 RC建物のせん断破壊
- ・ 1978年(昭和53年)宮城県沖地震 支承部・RC橋脚の損傷
- ・ 1982年(昭和57年)浦河沖地震 RC橋脚主鉄筋段落し部

↓

ゲルバー桁部の落橋

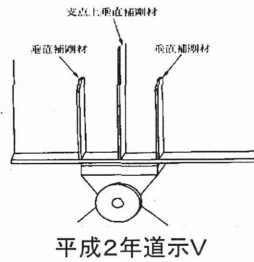
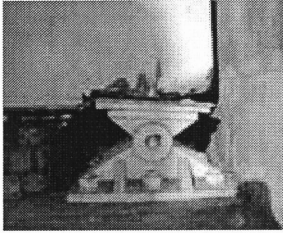
⇒落橋防止、支承、配筋細目、
靱性の重要性

- ・ 1980年(昭和55年) 道示V耐震設計編
[主鉄筋段落し・動的解析・変形性能の照査の規定]
- ・ 1990年(平成2年) 道示V耐震設計編訂
[地震時保有水平耐力法・震度0.7~1.0]

- ### 昭和55年道示の主要改訂点
- ・ 地盤特性値による地盤種別の区分
 - ・ 地域別補正係数の改訂
 - ・ FLによる液状化判定と土質定数の低減法を規定
 - ・ 動的解析による照査
 - 不等高橋脚や吊橋など全体系を考慮すべき橋
 - 長径間の橋、ダンパーを用いる等の新形式橋
 - 地盤がきわめて軟弱な橋
 - 橋の終局状態を照査する場合
 - ・ けた端から下部構造頂部縁端までのけたの長さについて規定(桁掛り長)
 - ・ 支承に鋳鉄を使用しない(鋳鋼を用いる)

- ### 平成2年道示の主要改訂点
- ・ 震度法と修正震度法の統一
 - ・ 地盤種別区分の変更(3→4区分)
 - ・ 連続橋の耐震計算法の充実
 - ・ 砂質土層の液状化判定に細粒分の影響考慮
 - ・ RC橋脚の地震時保有耐力法を規定
 - ・ 動的解析に用いる地震動の規定

垂直補剛材による 固定支承上腹板の補強

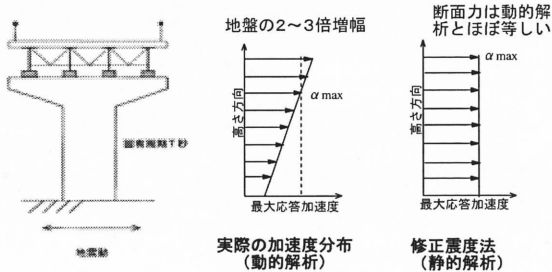


震度法の位置づけの変化

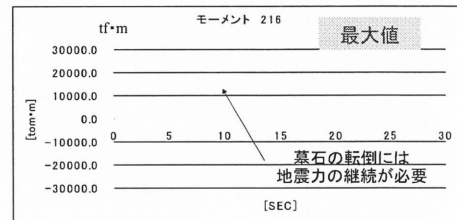
- ・震度法は、地盤加速度80galに対し応答が2～3倍に増幅した状況に対する照査と位置付け
- ・関東地震クラスについては、部材の塑性化を考慮した照査法
→ 地震時保有耐力法

動的挙動の静的近似

設計水平震度 $k_h \equiv$ 応答加速度/重力加速度



地震による動的挙動は、時々刻々と変化する。
静的設計では、下図の示す最大の応答を静的荷重として作用させる。



地震時保有水平耐力法 (平成2年道示から導入)

- ・1968年の十勝沖地震におけるRC建物の被害が契機で建築の耐震設計に導入(S55)
- ・昭和55年道示Vの参考資料にも類似の設計手法が提示されるも、設計地震動は平成2年道示より小さく、その位置付けがあいまい。
- ・平成2年道示Vでは、関東地震における東京の地震動(300～400gal)を想定して、設計地震動を設定
- ・高さ15m以下の単柱橋脚、壁式橋脚橋軸方向を対象

地震時保有水平耐力法の概要

構造物の塑性域の地震時保有水平耐力や変形性能、エネルギー吸収を考慮して静的に耐震性能を照査する方法

耐力と変形性能の算定

震度と応答値の算定

耐震性の判定

地震時保有水平耐力法による照査

$$k_{he} \cdot W \leq P_a$$

k_{he} : 等価水平震度 $k_{he} = \frac{k_{hc}}{\sqrt{2\mu_a - 1}}$ μ_a : 許容塑性率

k_{hc} : 地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度

$$k_{hc} = C_Z \cdot C_I \cdot C_R \cdot k_{hc0}$$

C_Z : 地域別補正係数

C_I : 重要度別補正係数

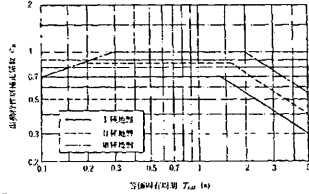
C_R : 振動特性別補正係数

k_{hc0} : 標準値(1.0とする)

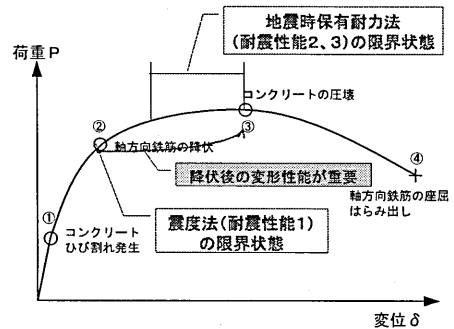
$$W = W_U + C_P \cdot W_P$$

W_U : 上部構造重量 W_P : 橋脚重量

P_a : 地震時保有水平耐力



RC橋脚の限界状態



(b) 鉄筋コンクリート部材の荷重と変位の関係

M-φ から P-δ の算定

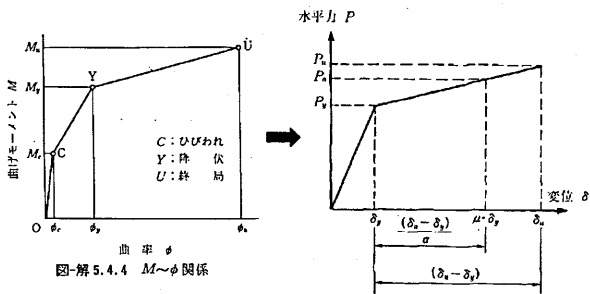
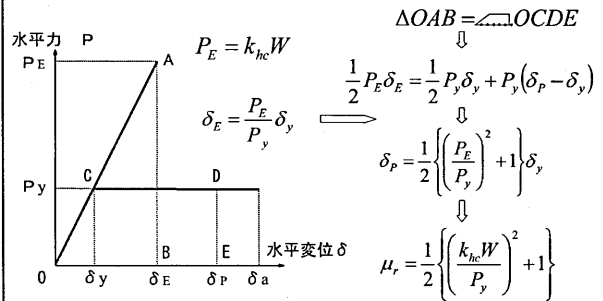


図-解 5.4.4 M-φ 関係

地震時保有水平耐力法による照査 エネルギー一定則による弾塑性応答変位の推定



変位の照査と耐力の照査

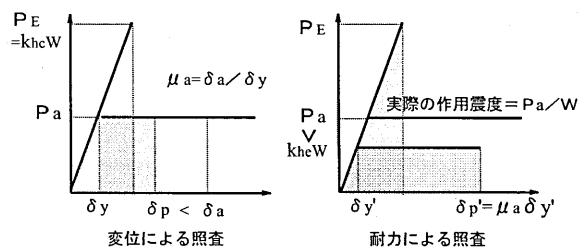
$$\delta_r \leq \delta_a \iff k_{he} W \leq P_a$$

同等

$$\mu_r = \frac{\delta_r}{\delta_y} \leq \mu_a = \frac{\delta_a}{\delta_y}$$

$$\mu_r = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{k_{hc} W}{P_y} \right)^2 + 1 \right\} \leq \mu_a \iff \frac{k_{hc} W}{P_y} \leq \sqrt{2\mu_a - 1}$$

変位の照査と耐力の照査

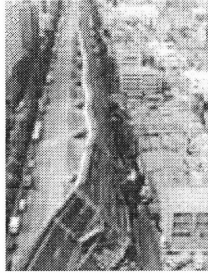


(4) 兵庫県南部地震

- 1995年(平成7年)
兵庫県南部地震(M7.2)
- RC橋脚の脆性的な破壊
- 鋼製橋脚、支承部、落橋防止装置等
での被害発生



- 1996年道示V耐震設計編改訂
耐力と変形性能の向上により橋梁全
体系で大地震に耐える構造を目指す
[内陸直下型地震・震度1.5~2.0]



高架橋の倒壊

S31年鋼橋設計示方書で設計

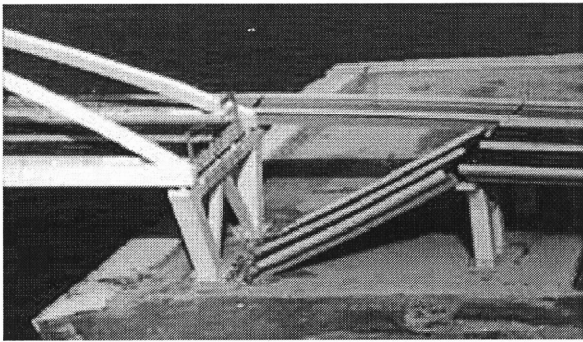
RC橋脚の倒壊

RC橋脚主鉄筋段落とし部のせん断破壊
被りコンクリートの剥落、主鉄筋の座屈など



アプローチ桁の落下

振動位相差と地盤流動による大きな相対変位が原因



鋼製橋脚の圧潰

鋼製T型橋脚基部の面板の座屈、コーナー溶接部の破
断により、中詰めコンクリート上面位置まで桁が沈下



「鋼橋の耐震設計—その歴史変遷, 海外・他分野との比較から最新情報まで—」
橋梁の耐震設計の変遷(歴史)

兵庫県南部地震から中越地震、中越沖地震、岩手・宮城内陸地震と未来への展望

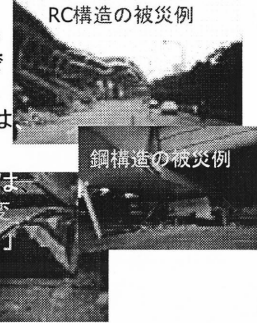
株式会社長大 構造事業本部

耐震技術部 矢部正明

土木学会 鋼構造委員会 鋼構造継続教育推進小委員会
 第17回鋼構造基礎講座 2009年11月16日

1995年兵庫県南部地震で構造物に生じた被災と耐震設計

- 震度法=許容応力度法による設計では、変形を無視し、力で耐える構造物を設計していた。(地震動強度が小さい場合には耐えることができる。)
- 強度が大きい地震動に対しては「適度な力(耐力)」と「適度な変形性能(塑性域における変形)」で耐える設計が必要となった。



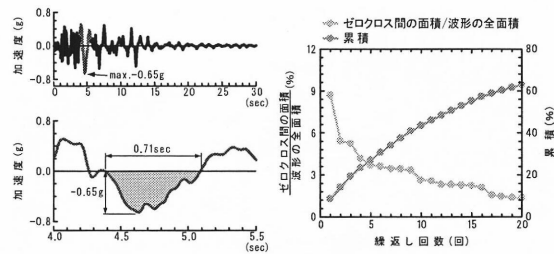
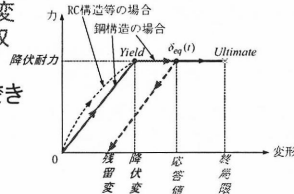
力と変形を考慮した耐震設計=レベル2地震動に対応した耐震設計

- 「力」と「変形」を同時に考慮する耐震設計=じん性設計, 地震時保有水平耐力法

“降伏点Yより大きな力を加えようとすると、その力は変形のエネルギーとして吸収される。”

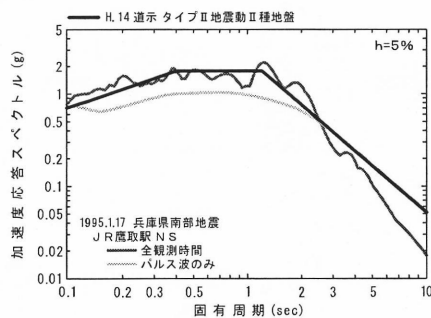
⇒ “降伏した後も十分変形できる構造物の方が、エネルギーの吸収能力が大きい。”

= 耐震性に優れた構造物

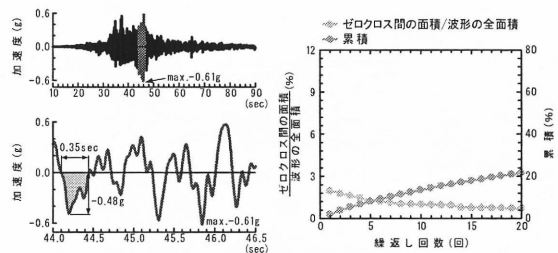


1995.1.17 兵庫県南部地震 JR鷹取駅 NS成分: II種地盤 S I値=142.1cm/sec

1995年兵庫県南部地震(内陸地殻内地震)で観測された強震記録の特性

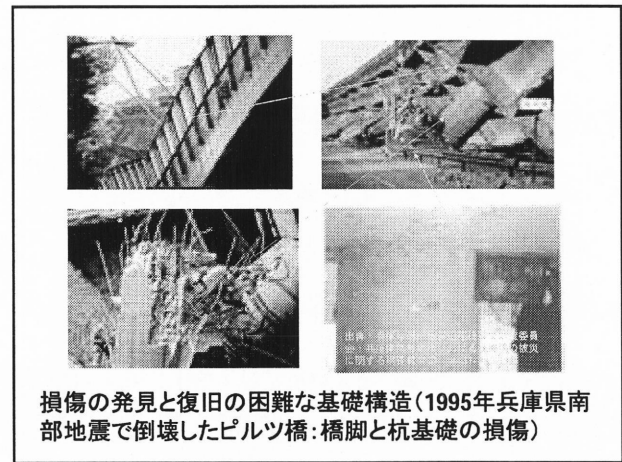
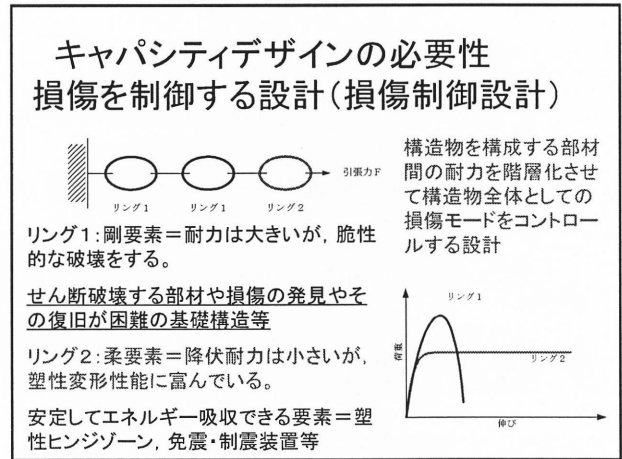
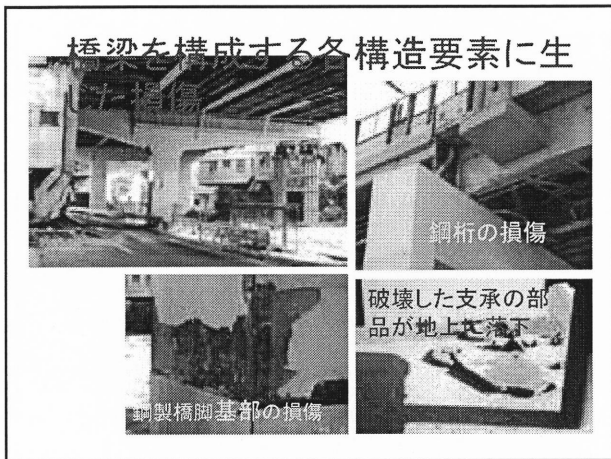
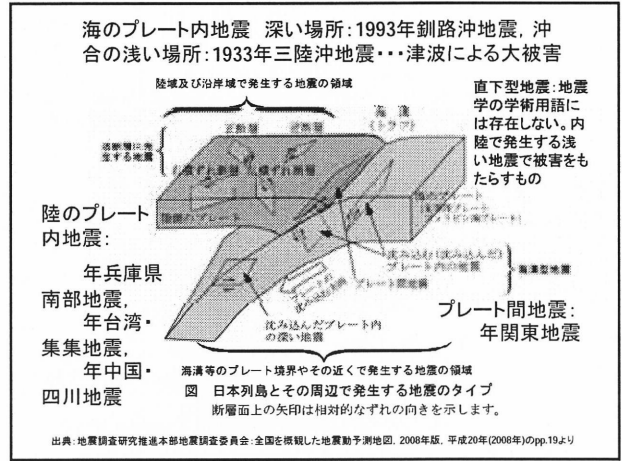
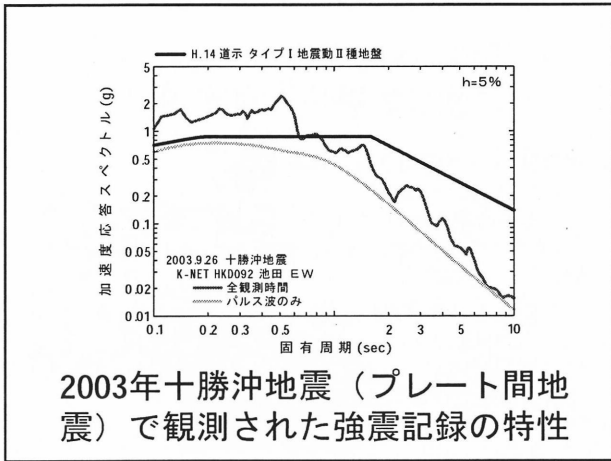


1995年兵庫県南部地震(内陸地殻内地震)で観測された強震記録の特性



2003.9.26 十勝沖地震 K-NET HKD092 池田 EW成分: II種地盤 S I値=70.2cm/sec

2003年十勝沖地震(プレート間地震)で観測された強震記録の特性



残留変位の照査性に関する照査

地震後の修復

平成7年兵庫県南部地震により被災した橋脚では、橋脚の残留変位が橋脚高さの1/60程度又は150 mm程度以上生じた場合には、残留変位を強制的に修復することが困難であったこと、支承部の嵩上げが必要になる等復旧が困難であることから橋脚の取り替えを必要とした事例があったこと、また、耐震性能2は地震による損傷を限定された範囲にとどめ、橋としての機能の回復を速やかに行うことを目標としていることから、これらの点を考慮して許容残留変位を橋脚高さの1/100と定めた。

隣接する構造物の固有周期の関係を考慮した相対変位の推定(相対変位応答スペクトル比)

出典：阪神高速道路公団 震害調査報告書「阪神高速道路1号線(1)区間」(財)阪神高速道路株式会社 平成10年3月31日現在より

流動に対する杭の設計法の大別土圧法、変位+ばね法(応答変位法的方法)

出典：吉田 隆、世羅 耕作、平原 勲監修・建築・土木 基礎の耐震設計と解析例、基礎工、2008.10. pp.70-73より

積層ゴム系支承を用いた地震時水平力分散構造

地震時挙動がより複雑な構造系の耐震計算は、静的設計から動的照査に重きが置かれるようになった。

道路橋示方書・同解説V耐震設計編

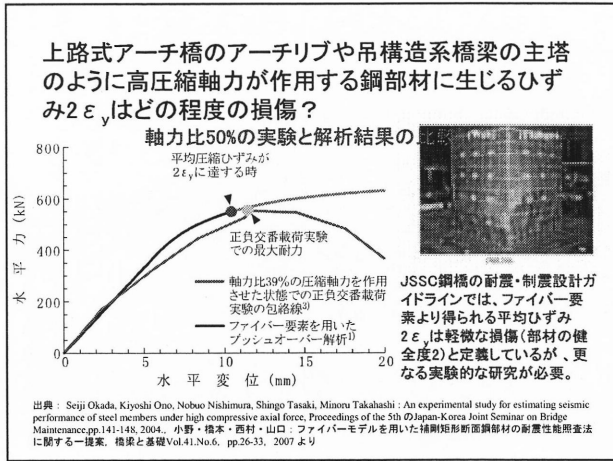
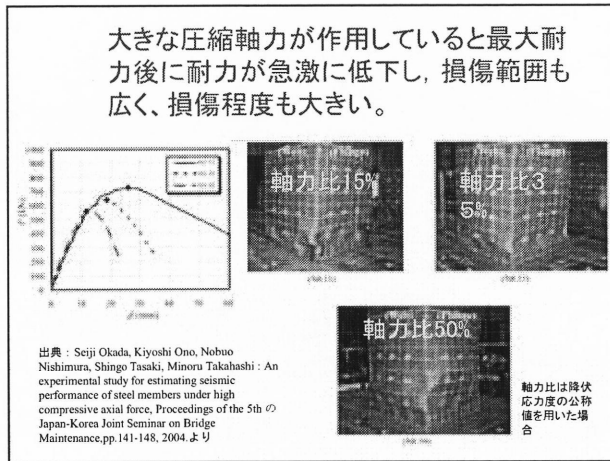
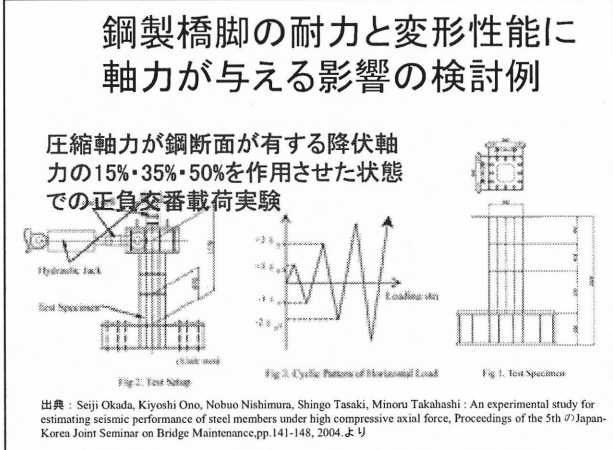
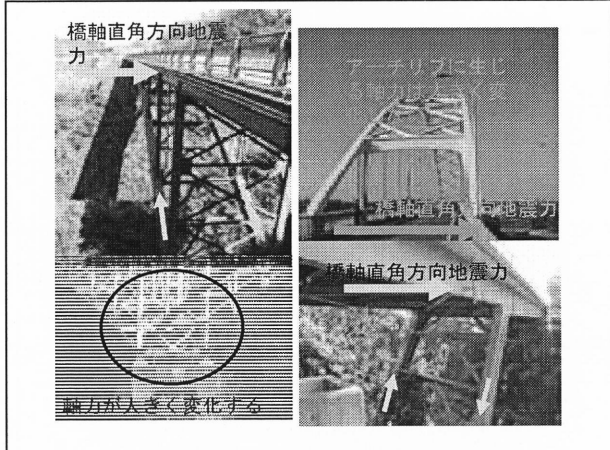
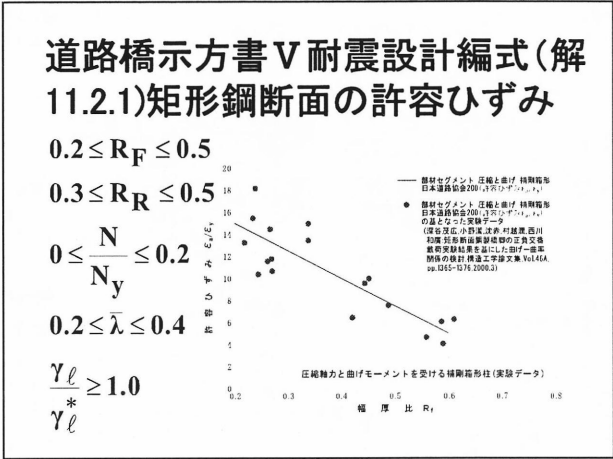
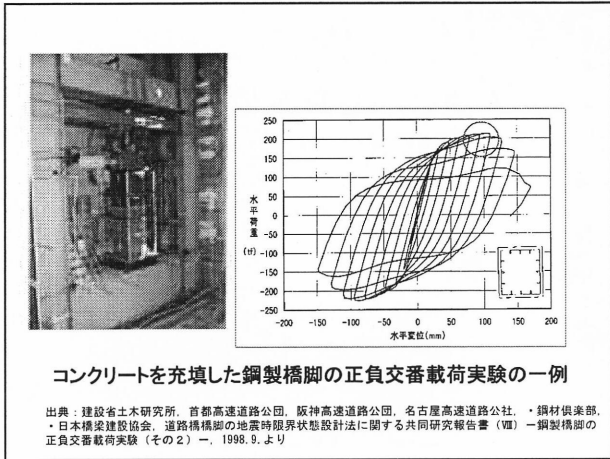
平成 年 月・平成 年3月

地震時保有耐力法を基本とした設計体系

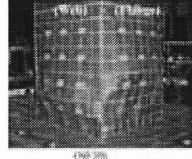
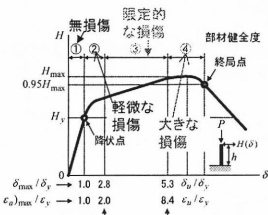
動的照査の実用化・地震時水平力分散構造

- 1章 総則
- 2章 耐震設計の基本条件
- 3章 耐震設計上考慮すべき荷重および設計条件
- 4章 既設法による耐震設計
- 5章 動的照査による耐力法による耐震設計
- 6章 動的照査による耐力法の概要
- 7章 動的照査による耐力法の適用範囲
- 8章 動的照査による耐力法の適用範囲
- 9章 動的照査による耐力法の適用範囲
- 10章 動的照査による耐力法の適用範囲
- 11章 地震時保有耐力法による耐震設計
- 12章 支承構造
- 13章 橋脚防止システム
- 14章 地震の影響を軽減するシステム

鋼構造は、作用する圧縮軸力の大きさ、座屈特長(座屈パラメータ)、状況に応じて耐力や変形性能が大きく変化する。



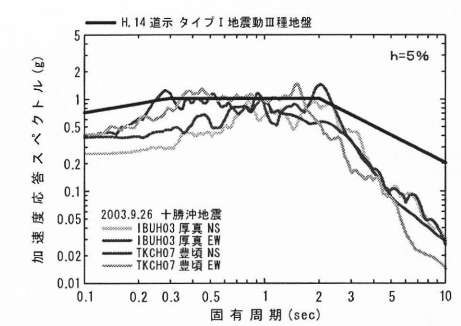
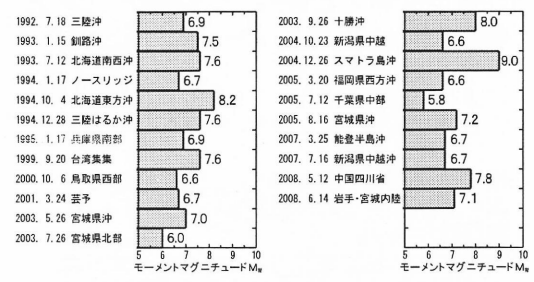
上路式アーチ橋のアーチリブや吊構造系橋梁の主塔のように高圧縮軸力が作用する鋼部材に生じるひずみ $2\varepsilon_y$ はどの程度の損傷？



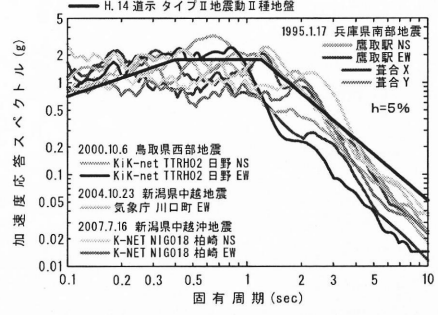
出典：Seiji Okada, Kiyoshi Ono, Nobuo Nishimura, Shingo Tasaki, Minoru Takahashi: An experimental study for estimating seismic performance of steel members under high compressive axial force. Proceedings of the 5th Japan-Korea Joint Seminar on Bridge Maintenance, pp.141-148, 2004.

JSSC鋼橋の耐震・制震設計ガイドラインでは、ファイバー要素より得られる平均ひずみ $2\varepsilon_y$ は軽微な損傷(部材の健全度2)と定義しているが、実験結果は、大きな損傷域にある。更なる実験的な研究が必要な課題である。

近年発生した被害地震の規模 決して大きな地震でない1995年兵庫県南部地震



道路橋の耐震設計に用いる設計地震動と強震記録の比較



道路橋の耐震設計に用いる設計地震動と強震記録の比較



目標とする耐震性能を実現するためには、多様な選択肢がある。

- ① 構造物(部材)を地震力(による応力)よりも強くする(耐震設計),
- ② 構造物に地震力が働いても構造物(部材)が変形して耐えきることができる(耐震設計)ようにする,
- ③ 構造物の固有周期を長くして加速度応答倍率を小さくし地震力が働かないようにする(免震設計),
- ④ 地震のあいだに地震力と反対向きの力が構造物に働くような仕組みにする(制震設計)。

耐震構造・免震構造・制震構造

■ 耐震構造(耐震設計)

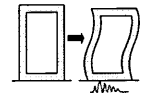
剛構造 = 震度法で設計された構造物

小さな変形しか許容せず大きな力(耐力)で地震に耐える。



柔構造 = 地震時保有耐力法(じん性設計)で設計された構造物

ある程度の変形を許容し(変形性能に期待し)ある程度大きな力で地震に耐える。



力と変形を考慮した耐震設計(地震時保有水平耐力法)と免震設計・制震設計

- 構造物の塑性変形性能に期待する設計
材料特性値(降伏点等)のばらつきによって、設計で想定したとおりの降伏耐力で塑性化しない。
塑性変形を期待する = 損傷を許容する ⇒ 地震後に復旧作業が必要となる。
- 地震後にも完全にその機能が確保されなければならない構造物も存在する。
- 人為的に塑性変形を生じさせる装置や部材を設置

耐震構造・免震構造・制震構造

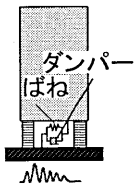
■ 免震構造(免震設計)

究極の免震構造 = 地震動が構造物に伝達する経路を遮断()する。例えば、空中に浮かぶ構造物。

【現在の免震構造】

軟らかいばねで支持し構造物の固有周期を長くする。

長周期化によって生じる大きな変位は、ダンパー等のエネルギー吸収装置によって小さくする。



耐震構造・免震構造・制震構造

■ 制震構造(制震設計)

ダンパー等のエネルギー吸収装置によって構造物の減衰性能を高める。

剛性を変化させ、地震動と構造物の共振を避ける。

(制御)力を地震応答が成長する方向とは逆に作用させる。

制振と制震

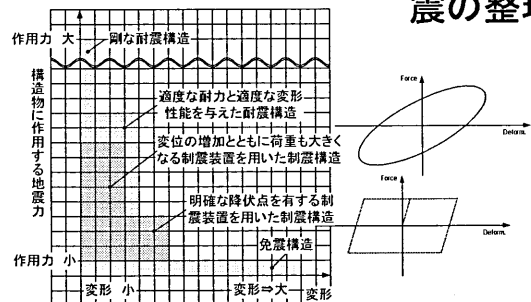
構造物に生じる振動を制御するという観点から考えると制振は地震も対象となる。

制震は、地震以外の外乱(風、交通振動)

にも有効に機能することが多いが、風や交通振動の制御を目的とした制振が地震に対して有効に機能するとは限らない。

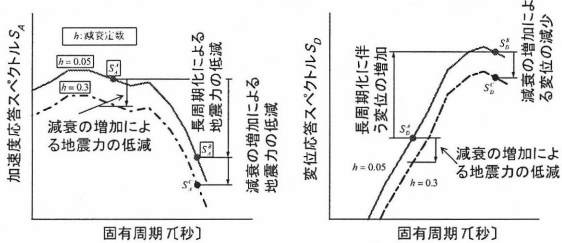
地震 >>> 風・交通振動

力と変位に着目した耐震・免震・制震の整理

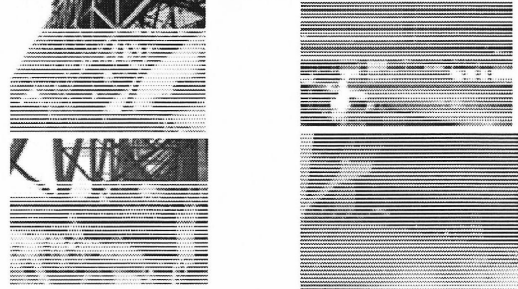


出典、石丸辰治：6. 免震・制震構造、ヴィジュアル版建築入門3 建築の構造、株式会社彰國社、2002.7の51頁図6-3に修正加筆

地震応答スペクトルにみる耐震構造・免震構造・制震構造



免・制震構造を積極的に採用した阪神高速道路港大橋の耐震性能向上策



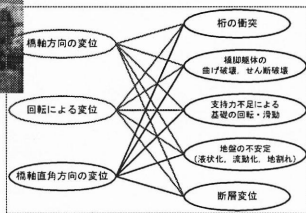
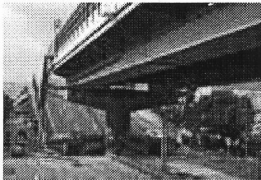
座屈拘束ブレース(制震部材)

すべり支承を用いた床組免震

提供：阪神高速道路管理技術センター 金治英貞氏

落橋崩壊形を想定した落橋防止構造の設計が望まれる

どう落橋するか？≡落橋損傷モード



性能設計 (Performance-Based Design) とは

- 構造設計＝要求された機能をもつ構造物をいかに実現するかという行為
⇒どのような設計法も狭い意味で性能設計となる。
- 目標性能の明確化，目標性能を実現する設計法の総称
- 「性能規定」とは法令が性能を規定していること，あるいは，法令で規定された性能のこと
- 理想：目標とする性能だけを法令で規定し，その検証方法は設計者に委ねるというスタイル
- 現実：目標とする性能だけを法令で規定(性能規定)しても，現実問題としてこれだけでは耐震設計ができるだけのレベルに達していない。

仕様規定：「手段」・「やりよう」 性能規定：「結果(状態)」・「ありよう」

- 使用材料や形状、寸法等を規定するため、**具体性があり理解しやすい。**
- 設計に特別高い能力を必要とせず、**基準に対する適合性の審査が容易である。**
- 新しい材料や構造には対応しにくい。
＝代替性に乏しく、技術の進歩の障害になる。
- 実現すべき目標性能が明確でない。
- 国際間の互換性が乏しい。
- **設計の自由度が大きく柔軟性がある。**
- **実現すべき目標性能が明確であり、技術の進歩に対応しやすい。**
- **基準の国際調和に資する。**
ISO2349, Eurocode, AASHTO(LRFD)等
- 審査、適合性の判断に高度な技術が必要となる。
＝設計者に高い能力が求められる。

性能設計を実現するために必要なもの

- 性能目標をユーザーや国民にもよく理解できる指標(一般的用語＝社会の言葉)で表す
- 性能目標を構造設計の指標(設計の言葉)で表すための技術＝設計のクライテリアの設定
- 強震動下で構造物の崩壊に至るまでの損傷予測技術(種々のレベルの地震動下でどのように構造物が揺れ、それに応じて損傷がどう進展していくかを、崩壊に至るまで精度よく予測できることが基本)

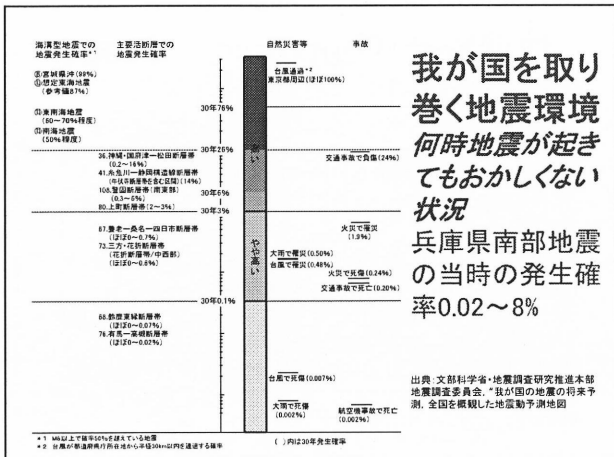
性能設計の実現と普及は、技術者の性能保証が必要

- 《設計者の要件》
- 基礎知識
 - 柔軟な創造力
 - 学際的能力
 - 予測能力(想像力)
 - 判断力(意志決定能力)
 - 社会性・倫理性
 - 解析能力
 - 情報伝達能力
 - 思想と(デザイン)センス
- 構造設計は能動的、意図的に行う必要がある。想像力をたくまけて、設計している構造物が大地震を受けるときの挙動を考え抜き、意図通り挙動するように設計を進める。
出典: Structures and Mechanics Seminar, 和田章, 構造工学の科学—塑性変形と鋼構造建築の耐震設計, 2008.10.31
- 耐震設計には未知の領域に属する多数の事象があることを念頭に置き、謙虚な姿勢で地震被害の軽減に向けた技術開発を行い、実施していくことが必要である。
出典: 川島一彦, 地震時保有耐力法の開発経緯, 第10回地震時保有耐力法に基づく複数層構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-10, 2007.2.
- 出典: JSSCイブニングセミナー「あのすばらしい講義をもう一度」, 伊藤学, “オムニバスの構造設計論”, 2007.2.22

サステナビリティ(sustainability)の概念

出典: 野城智也, 建築ストックのサステナビリティ向上のために, アーバンストックの持続再生, 東京大学講義ノート, 藤野隆三・野口貴文編著, 東京大学21世紀COEプログラム「都市空間の持続再生学の創出」, pp.203-224, 技報堂出版, 2007.11.

- 持続可能な開発(sustainable development)
- サステナブル建築(日本建築学会サステナブルビルディング小委員会の定義): 地域レベルおよび地球レベルでの生態系の収容力を維持しうる範囲内で, 構造物のライフサイクルを通しての省エネルギー, 省資源, リサイクル, 有害物質排出抑制を図り, その地域の気候, 伝統, 文化および周辺環境と調和しつつ, 将来にわたって, 人間の生活の質を適度に維持あるいは向上させていくことができる構造物。
- サステナビリティ概念の3つの側面: 「環境的側面」, 「経済的側面」, 「社会的側面」があり, 3つの側面のサステナビリティが満たされて初めて持続可能な開発が実現する。
- 社会基盤施設の耐震性を向上しなければ継続使用はできない。



国民のニーズに合った性能目標(多様な要求性能)

増大する社会の脆弱性や近い将来に予想される激震な地震被害を減らすには人間社会が持続する

- 安全性
- 機能性
- 使用性
- 安定性
- 耐久性
- 修復性
- 耐震性
- 耐風性
- 構造美

金融の不安定化の長期化⇒財政の硬直化⇒ライフラインの更新等の災害脆弱性の是正の遅延

「地球温暖化」
 「化石燃料の枯渇」
 「食の枯渇」

非常時の災害発生時の食の供給は、社会基盤施設の機能が維持できない。

ご静聴ありがとうございます。