



建設ICTマスター養成講座
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習

『エンジニア教育 / 大学教育における ソフトウェアの役割と活用』 ー構造解析はかくもエキサイティング！ー

東京都市大学(旧武蔵工業大学) 名誉教授 吉川弘道

Tokyo City University, Professor Emeritus

➤ 研究内容：

- RC構造物の非線形解析と耐震性能評価
- 性能照査型耐震設計と地震リスク解析
- インフラツーリズム（土木観光学）の調査研究

➤ Web & SNS活動：

- ◆ 土木が好きになる27の物語（フォーラムエイト）：

<https://www.forum8.co.jp/topic/civil27-129.htm>

<https://www.facebook.com/forum8JP/posts/3069703536399260/>

- ◆ Discover Doboku 日本の土木再発見（Facebookページ）：

<https://www.facebook.com/DiscoverDoboku>

- ◆ 土木ウォッチング -インフラ大図鑑-：

<https://www.doboku-watching.com/>

講演メニュー

- 1 : 導入/構造エンジニアへのメッセージ
- 2 : 数値シミュレーションの意義と活用 :
—数値解析の醍醐味と深遠さ—
- 3 : 大学教育における導入事例
—設計演習/RC橋脚の耐震設計—
- 4 : 図書の紹介 :
『数値シミュレーションで考える構造解析』 (建通新聞社)

1：導入

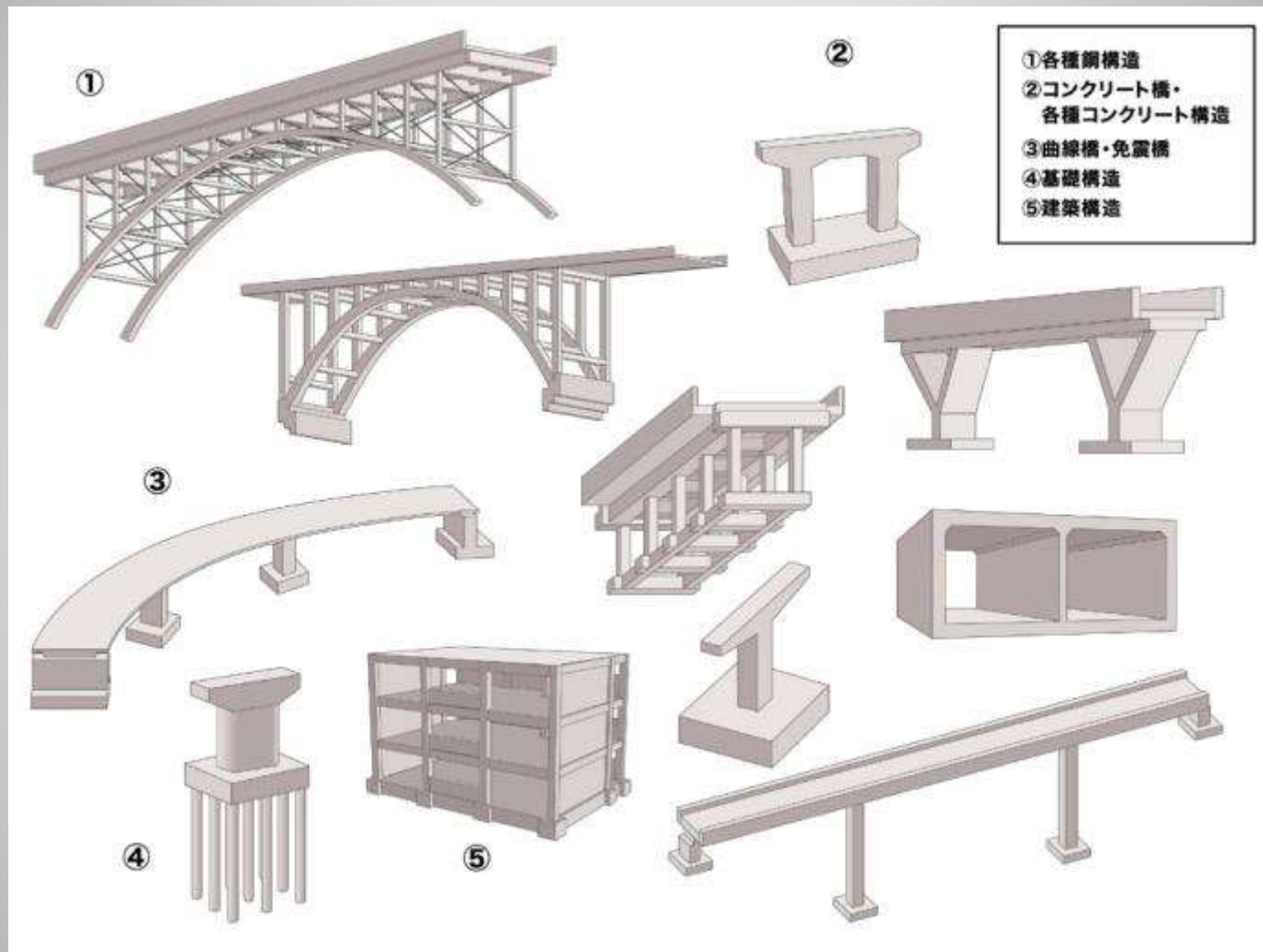
構造エンジニアへのメッセージ

- 構造解析/耐震設計における商用ソフトの高度化と普及は目覚ましい.
- このことは、エンジニアリング教育と大学教育にも重要な意義を持つ.
- 格段に進歩した商用ソフトと計算機環境のもと、数値解析から学ぶことは大きい.
- 日常の設計業務に止まらず、さらなるスーパーエンジニアへの成長を期待したい.

2 : 数値シミュレーションの意義と活用 —数値解析の醍醐味と深遠さ—

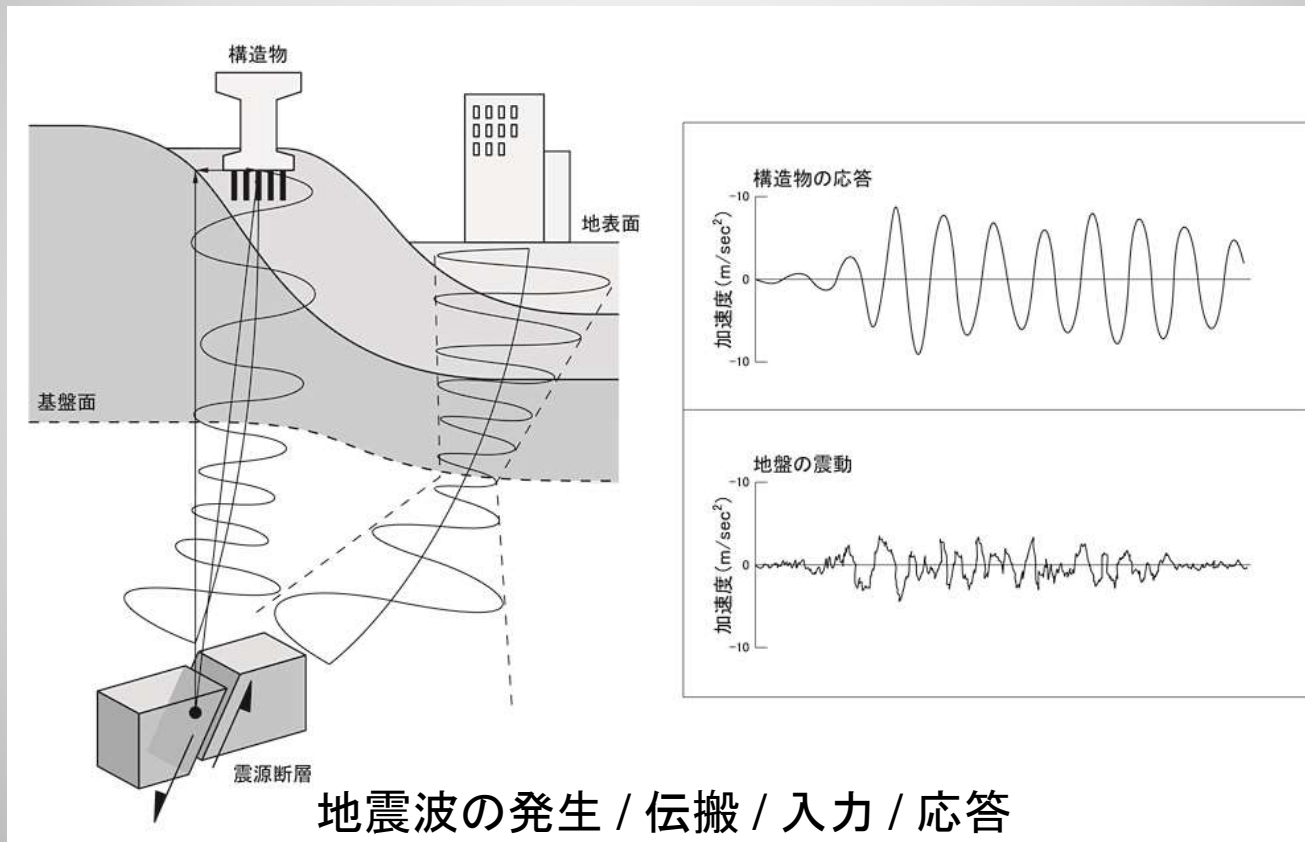
1.1 構造解析で取扱う構造物： 構造解析の分類

- 解析の種類 #1: 静的解析, 動的解析
- 解析の種類 #2:
荷重ケース毎の解析, 単調増分解析, 繰返し荷重
- 構造の次元数: 1次元, 2次元, 3次元
- 材料非線形性: 材料線形解析, 材料非線形解析
- 幾何学非線形性:
幾何学的線形/非線形解析 (大ひずみ解析, 大変位解析)



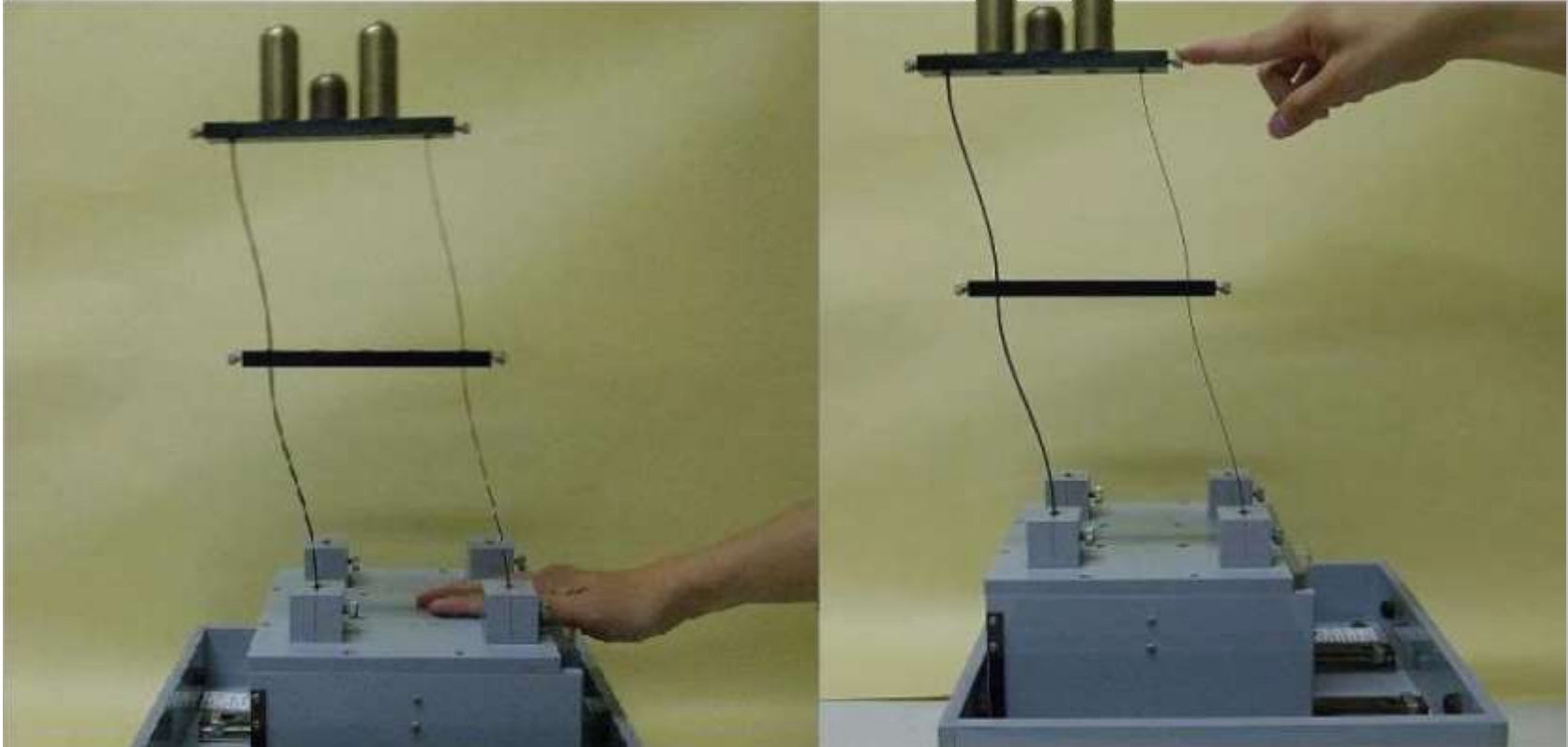
構造解析に取扱う各種構造物：
 解析意欲を湧き立たせる！

1.2 構造物にはどのようにして、 断面力 / 応力が作用するのか

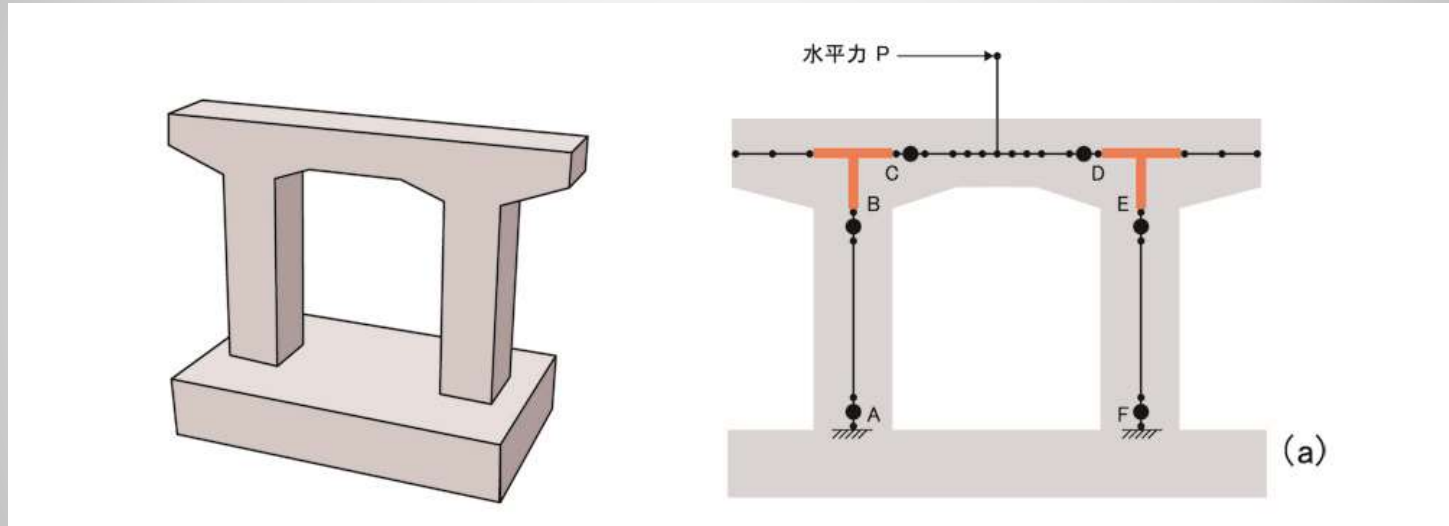


Tehnical Notes

目で見てカラダで理解する動的荷重と静的荷重

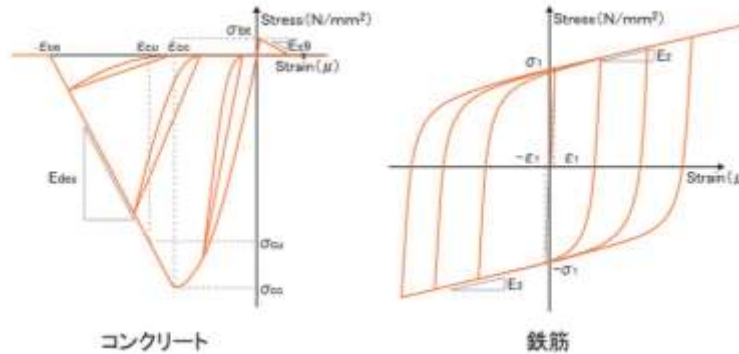


1.3 構造解析の手順： 構成則→断面特性→部材特性

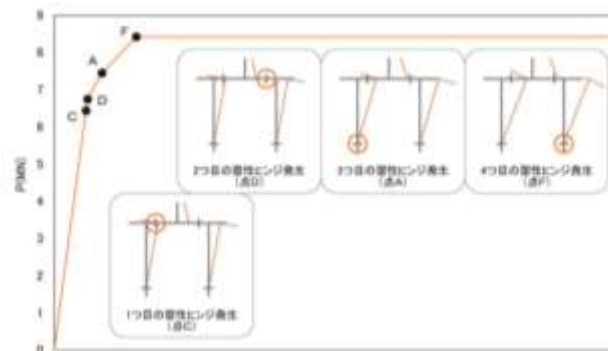


門型ラーメン橋脚と骨組みモデル

門形ラーメン橋脚の構造解析：構成則→部材特性



材料構成則の特性(左図：コンクリート，右図：鋼材)



部材特性：P-δ関係

材料構成則と構造解析結果：
門型ラーメン橋脚の非線形解析事例

1.4 構造解析から分かること

1 次情報

- 全体量：変位，変形，反力
- 局所量：断面力，曲率，変形角
- 材料レベル：ひずみ，応力
- 動的解析の場合：速度，加速度

2 次情報

- 最大値：最大断面力，最大変位，最大加速度，最大曲率
- 材料判定：ひび割れ，降伏，破断，(材料の種別による)
- 損傷レベルの判定：大破，中破，軽微 etc.(損傷レベルの定義が必要)

設計照査

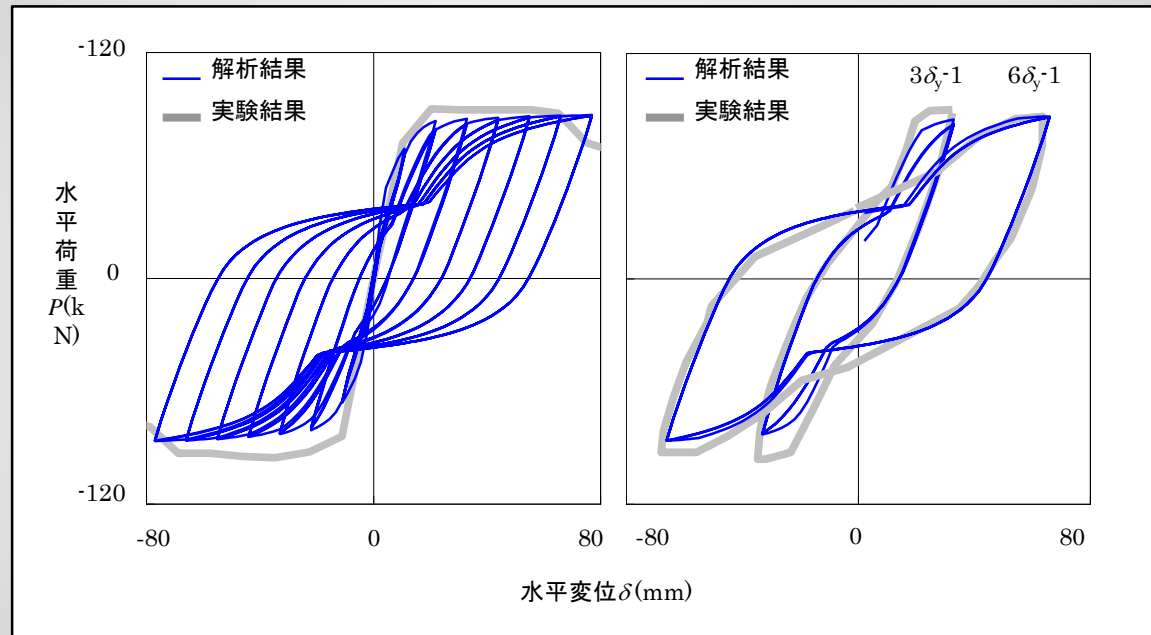
- 設計条件(*design criteria*)の判定：OK，NG(示方書の特定が必要)

1.3 橋軸 荷重正方向(1: 前面側引張)

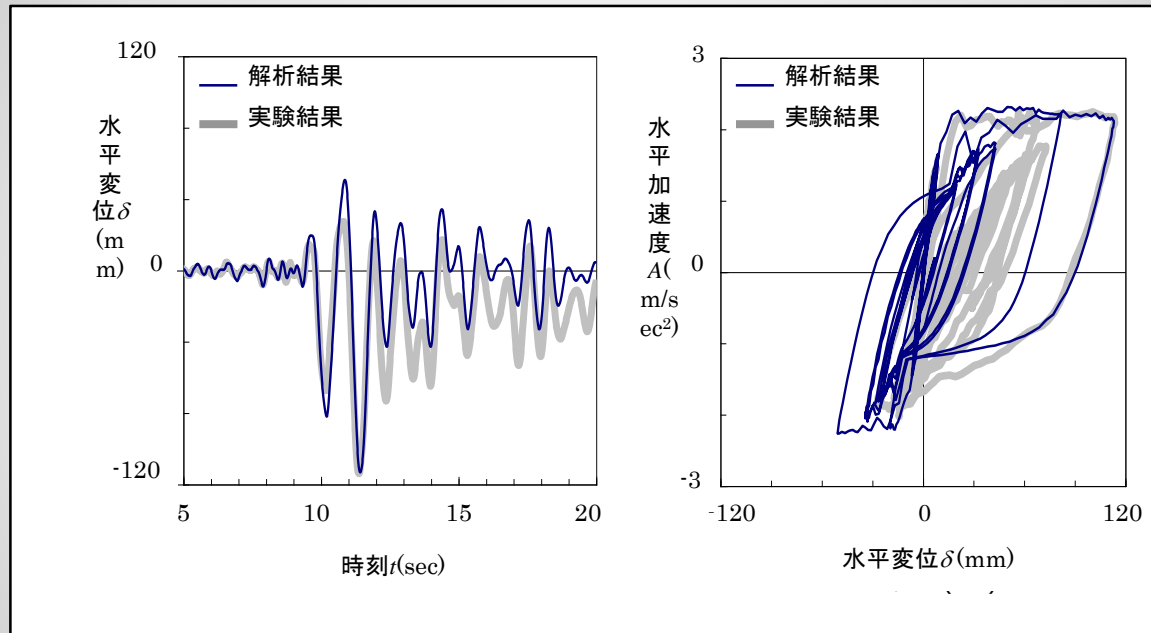
1.3.1 結果一覧

地震動の種類	レベル2 (タイプI)	レベル2 (タイプII)
耐震性の判定	OK	NG
水平耐力に対する判定	$P_a \geq k_h c \cdot W / 3$	$P_a < k_h c \cdot W / 3$
終局位置	基部	基部
地震時保有水平耐力 P_a (kN)	4365.90	4367.03
破壊形態	曲げ破壊型	曲げ破壊型
終局水平耐力 P_u (kN)	4365.90	4367.03
せん断耐力 P_{sc} (係数1.0) (kN)	6683.42	6683.42
せん断耐力 P_s (kN)	5354.0%	5371.2%
$k_1 \cdot W$ (kN)	3161.64	4584.59
設計水平震度 $k_h c$	0.40	0.40
構造物特性補正係数 α	0.437	0.297
許容塑性率 μ_p	2.367	6.453
$c_1 \cdot k_h c$	0.7000	2.0000
等価重量 W (kN)	7804.11	7904.11
等価重量算出係数 c_2	0.5	0.5
残留変位に対する判定	$\delta_s \leq \delta_{s, OK}$	$\delta_s > \delta_{s, NG}$
許容残留変位 $\delta_{s, OK}$ (mm)	100.00	100.00
慣性力作用位置 h (m)	10.000	10.000
残留変位 δ_s (mm)	5.38	113.64
残留変位補正係数 α	0.3	0.6
最大応答塑性率 μ_p	1.907	7.082
線弾塑性に対する非線形性の比 γ	0.1	0.0
降伏変位 δ_y (mm)	32.50	32.50

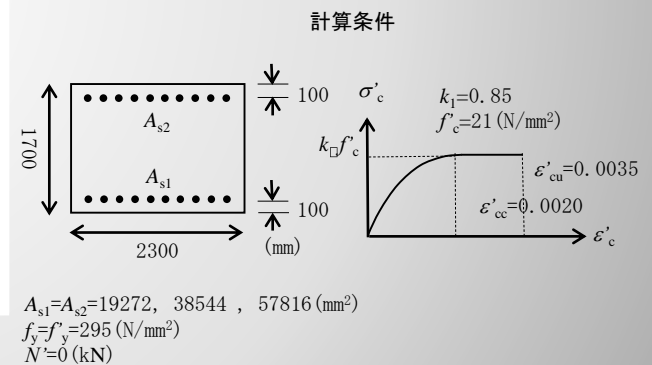
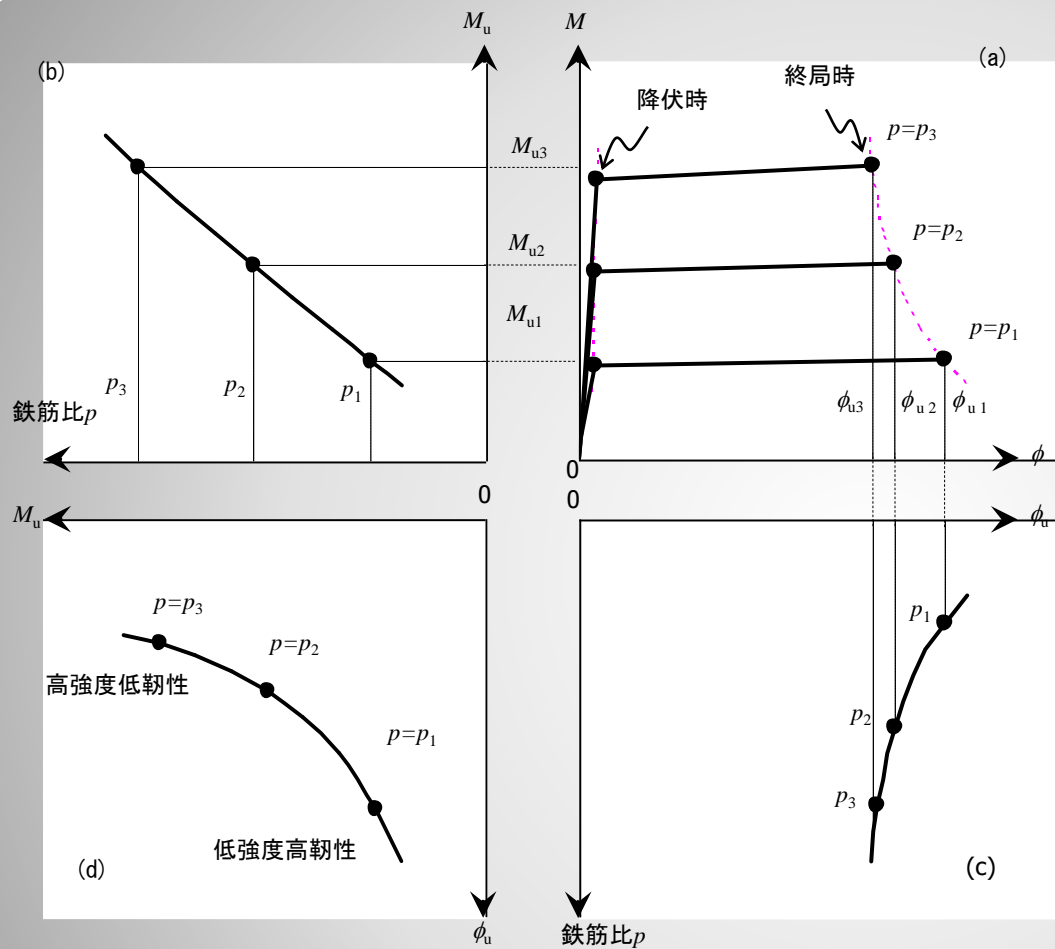
荷重ケース毎の解析/設計判定



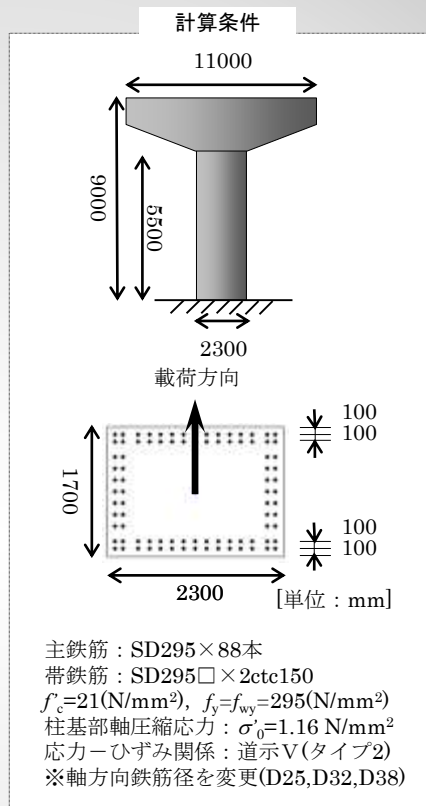
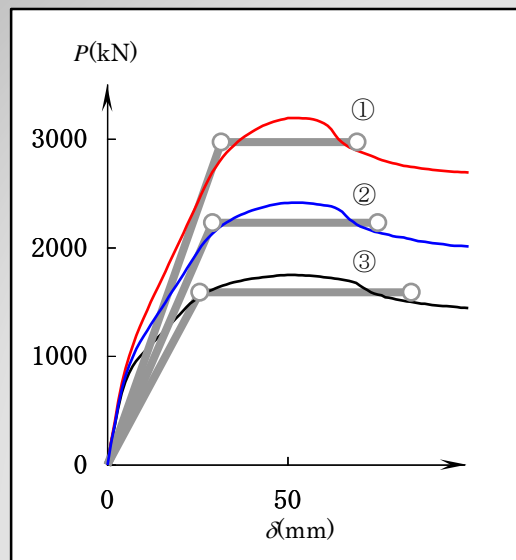
実験結果と解析結果の比較: 静的繰返し



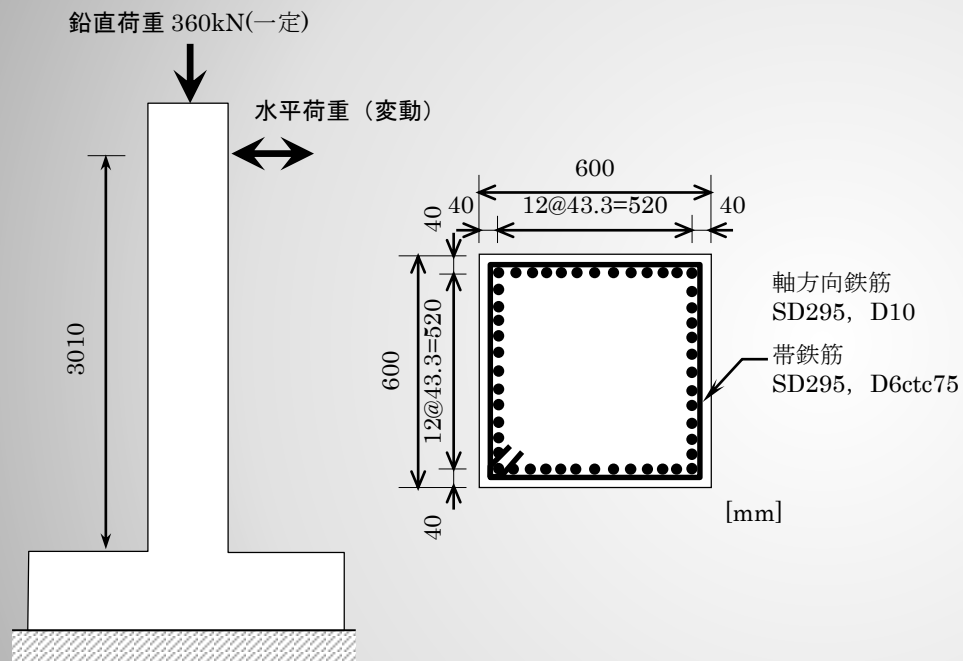
実験結果と解析結果の比較:動的



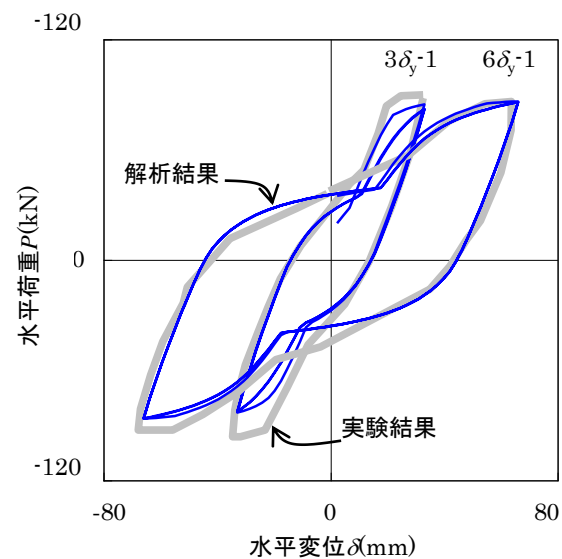
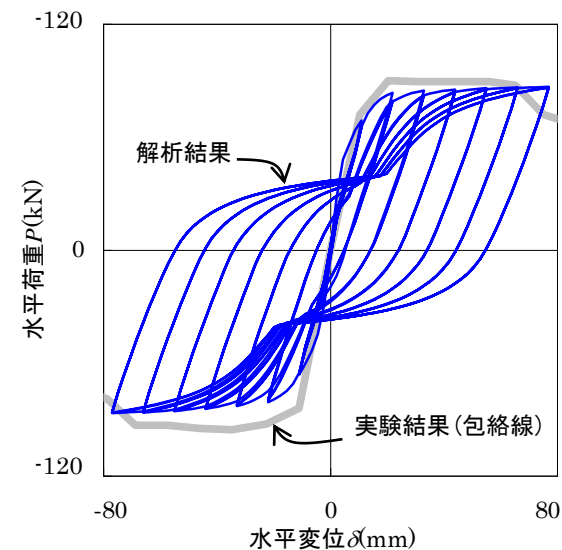
パラメトリック解析： 主鉄筋比を変化させた時の曲げ耐力と曲率靱性

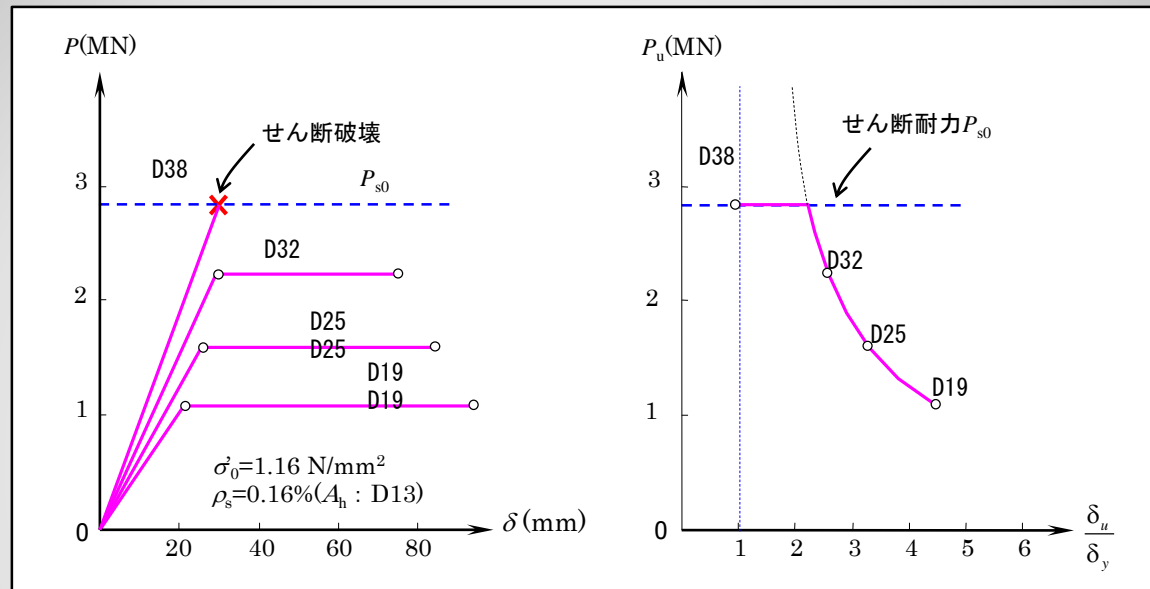


プッシュオーバー解析と道路橋示方書 RC橋脚の比較解析



解析結果と実験結果との比較： RC橋脚の静的繰返し挙動

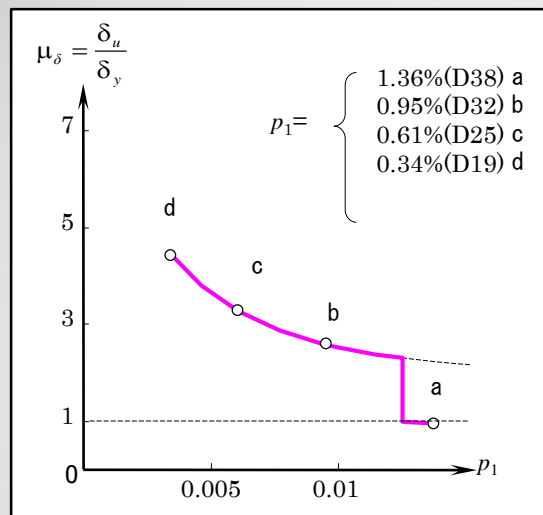




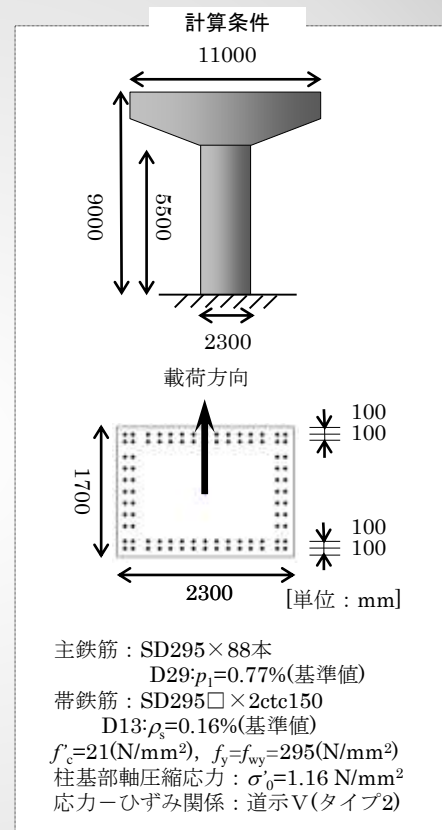
(a) $P \sim \delta$ 関係

(b) 終局水平耐力と靱性率

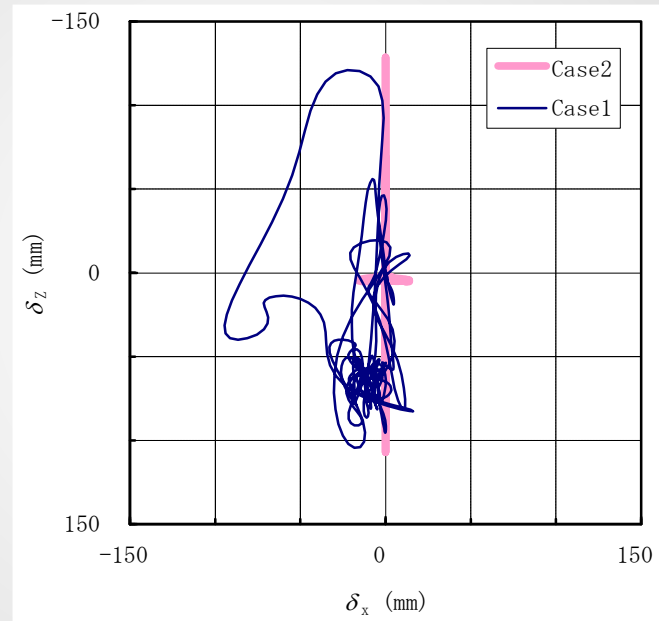
**パラメトリック解析：
主鉄筋比を変化させた時の耐力と靱性評価**



(c) 軸方向鉄筋比と靱性率



パラメトリック解析： 主鉄筋比を変化させた時の曲げ耐力と靱性評価

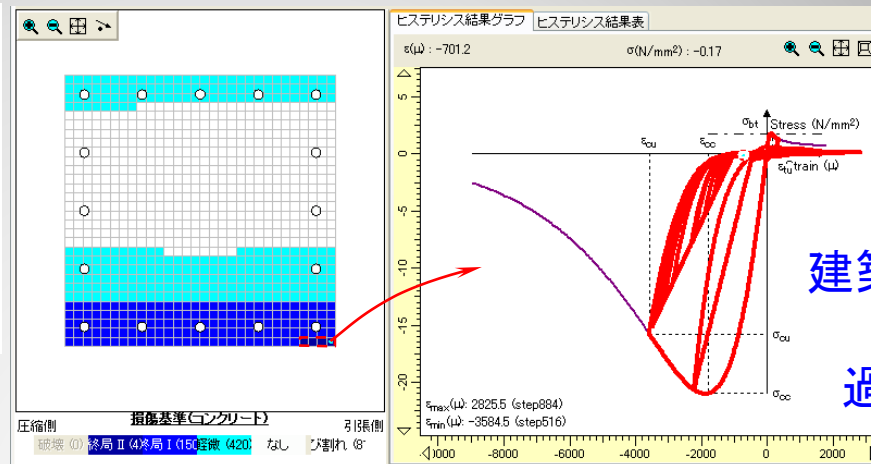
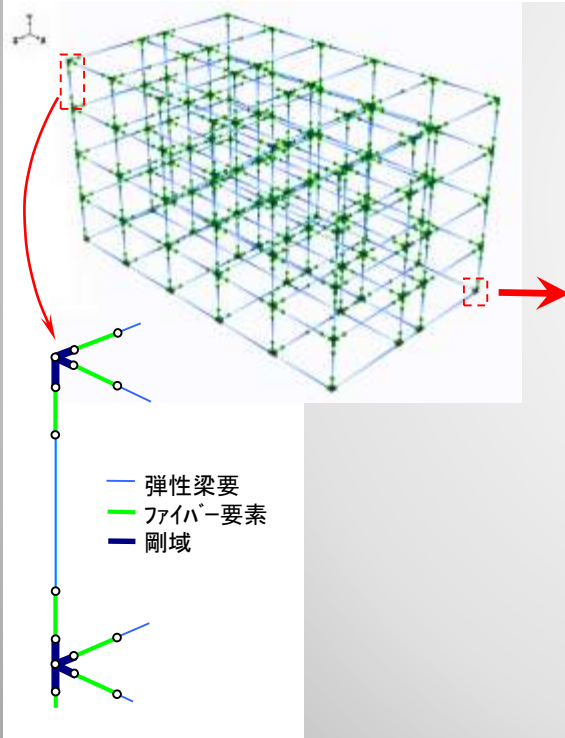
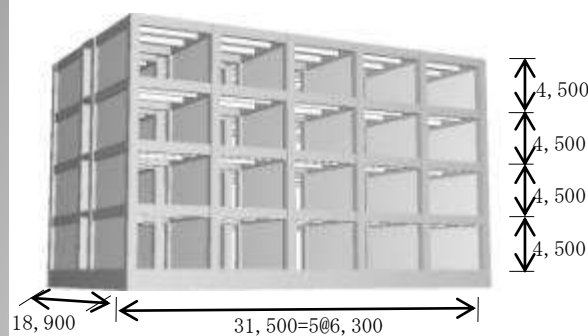


動的非線形解析：天端の応答変位軌跡 水平2方向同時加振と単独加振

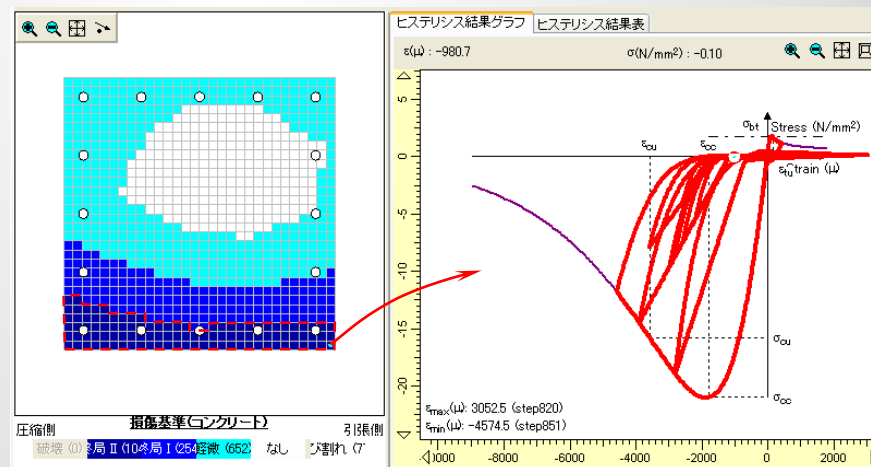
RC造建築の動的応答解析：

加振方法が損傷評価に与える影響

- 被災度による加振方法の影響
地震動の入力方向：1方向⇔3方向同時
RC建物の部材損傷をもとに考察
- 被害予測から被災度の推定
3次元動的非線形解析による被害予測結果から
被災度を推定する方法を提案



(a)Case1:X方向のみ加振



(b)Case2:XYZ同時加振

建築基準法OK
 しかし
 過小評価?

RC造建築の動的応答解析：加振方法が損傷評価に与える影響

テキスト:P.162

3 : 大学教育における導入事例

ー設計演習 / RC橋脚の耐震設計ー

設計演習 / RC橋脚の耐震設計： 演習課題

課題1：橋脚基部の断面解析

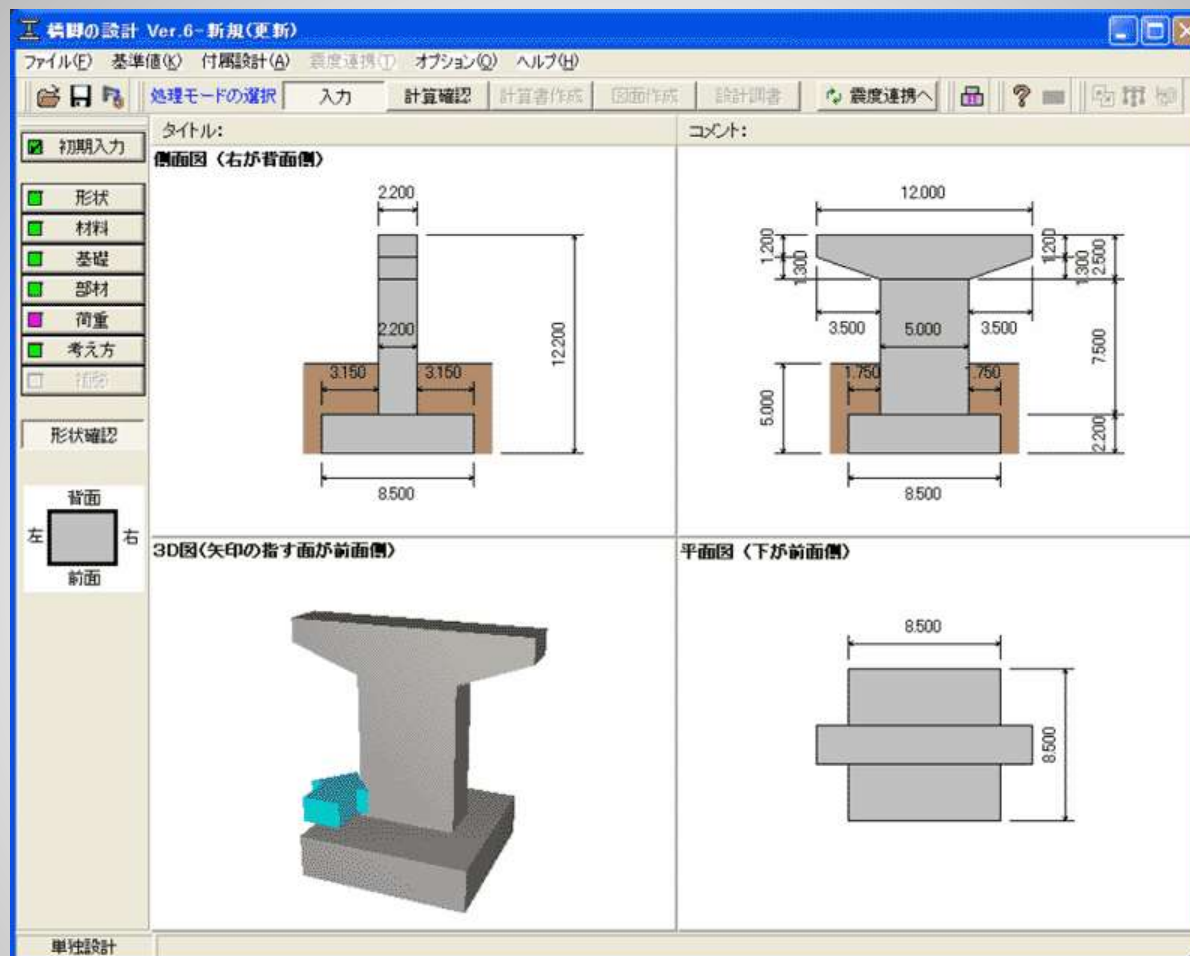
- ・ 基部断面の配筋決定， *UC-win/Section*による断面解析
- ・ $M-\phi$ 関係， 曲げ耐力の算定

課題2：RC橋脚の耐震設計(その1)

- ・ 現在の設計基準を満たさない既設橋脚の耐震設計計算
- ・ 許容応力度法， 地震時保有水平耐力法による設計計算

課題3：RC橋脚の耐震設計(その2)

- ・ 設計基準を満たすように配筋を変更し， 再度， 耐震設計計算
- ・ 地震時保有水平耐力法による設計計算



基部断面の配筋決定と断面解析：
*UC-Win/Section*の解析画面



**PC演習室における授業風景：
パッケージソフトを援用した設計演習**

設計演習 / RC橋脚の耐震設計： パッケージソフトの活用

- 基部断面：
⇒ 断面：複鉄筋+側方鉄筋，荷重：軸力+曲げモーメント
（手計算では到底無理）
⇒ **UC-win/Section**による断面解析（9セット購入）
- M - ϕ 関係， M_u ， ϕ_y ， ϕ_u の算定
- 許容応力度法：**モバイルUC 1**による解析
⇒ 携帯電話によるアクセス
- 地震時保有水平耐力法（道路橋示方書準拠）：手計算にて

設計演習/RC橋脚の耐震設計： 成果，感想，課題

1. 学生60名全員の設計条件を変えている.
⇒ 他学生に頼ることはできず、自力で計算書作成
2. 手計算で苦勞することも大変重要ですが、実務計算用の商用ツールを活用/習熟することも得るもの大なり.
⇒ 学生は、モバイルソフト、パソコンソフトにすぐに慣れ、嬉々として画面に向っていた.
3. パソコンソフトを実際に使う.
⇒ 横拘束筋、せん断補強筋、曲率など、初めて知る専門用語を自然と使う. 工学的な意味合いも身についていった
4. 習熟の早い学生が、遅れている学生に説明している. 一端のエンジニアのようでもあり、頼もしくもあった.
5. 断面特性や応力計算など、手計算では困難な計算もパッケージソフトウェアの活用により、次のステップに進むことができる.

設計演習/RC橋脚の耐震設計： 成果，感想，課題

6：わざと、照査結果がOUTになる設計条件を与えた。

⇒ 設計変更あるいは補強計算を行う。

⇒ 耐震設計計算の核心を理解させることができた。

7：わざと、照査結果がOUTになる設計条件を与えた。

⇒ 試行錯誤により、鉄筋（横拘束筋）の重要性と効き具合に気付く

⇒ 逆に、講義にて何回説明しても結局は身に付かない。

⇒ 演習の試行錯誤を通して、耐震設計を理解することができる。

4：新書の紹介

『数値シミュレーションで考える構造解析』

ーソフトで学ぶ非線形解析と応答解析ー

(建通新聞社)

数値シミュレーションで考える

構造解析

—ソフトで学ぶ非線形解析と応答解析—

吉川弘道／青戸弘起／甲斐義隆 著



建通新聞社

☆目次

1章：構造解析への誘い

2章：断面の非線形解析

3章：部材の非線形解析

4章：構造物の地震応答解析

5章：骨組み解析の基本知識

Technical Notes

『数値シミュレーションで考える構造解析』 -ソフトで学ぶ非線形解析と応答解析-

➤本書の構成：

材料構成則，断面解析，部材解析，構造物の地震応答解析

➤各解析対象：

静的解析/動的応答解析，線形解析/非線形解析，
2次元解析/3次元解析，が程よくバランス

➤身近な解析事例を採りあげ，

⇒ 多種多用の数値シミュレーション，
パラメトリックシミュレーションを例示

➤主要部（2章，3章，4章）は，独立した記述になっている．

⇒ 興味ある箇所，業務にて必要とする箇所から
読み始めてもらいたい．

『数値シミュレーションで考える構造解析』 -ソフトで学ぶ非線形解析と応答解析-

- 多くの事例解析とシミュレーション：
 - ⇒ 具体的な入力方法，解析結果の見方/判断を涵養することができる
- 解析結果の判断：定性的判断と定量的判断の両者ともに役立つ
- 非線形解析と応答解析：
 - ⇒ 多くの著書では，理論的展開と数学的記述に腐心するが，
 - ⇒ 本書は，シミュレーションと事例解析を主眼
 - ⇒ 高専/大学などの教育教材，若きエンジニアの入門書として勧める

再度繰返しですが. . . . 構造エンジニアへのメッセージ

- 構造解析/耐震設計における商用ソフトの高度化と普及は目覚ましい.
- このことは, エンジニアリング教育と大学教育にも重要な意義を持つ.
- 格段に進歩した商用ソフトと計算機環境のもと, 数値解析から学ぶことは大きい.
- 日常の設計業務に止まらず, さらなるスーパーエンジニアへの成長を期待したい.

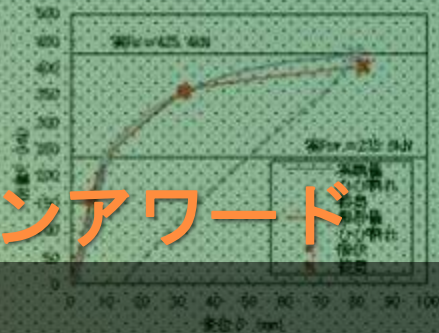
実大実験による耐震性能評価

Design Festival 2020

第7回 ナショナル・レジリエン・デザインアワード

NARDA

National Resilience Design Award



実験値と解析値の比較 (P-δ曲線)



実大実験の試験状況

タイプII橋軸方向加震時の照査結果

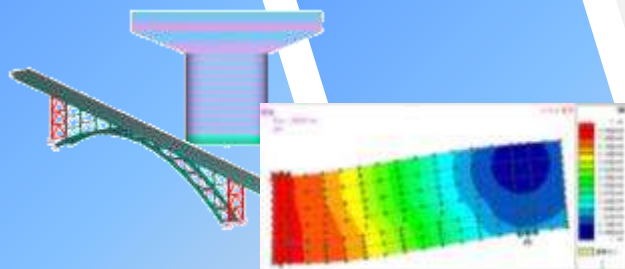
- 目的: 国土強靱化に貢献する具体的な作品を一同に集め、情報共有と技術研鑽の場となるため制定した。
- 対象: 構造解析(土木建築)、地盤工学、水工学、防災、環境 等。
- 各賞: Grand Prix, Excellent Award, 審査員特別賞

降伏

Design Festival 2020

第7回 ナショナル・レジリエン・デザインアワード

応募・選考スケジュール



応募受付開始

応募締切

ノミネート予選
選考会

受賞作品本審査会

各賞発表と表彰式

2020.6.3

2020.10.16

2020.10.23

2020.11.17

2020.11.20

2015 Excellent Award 準グランプリ

**国土強靱化に資するための下水道施設の
合理的な耐震補強設計手法
-汚泥濃縮タンクの非線形有限要素解析-**

株式会社エーバイシー 様

国土強靱化に資するための下水道施設の合理的な耐震補強設計手法

ー汚泥濃縮タンクの非線形有限要素解析ー

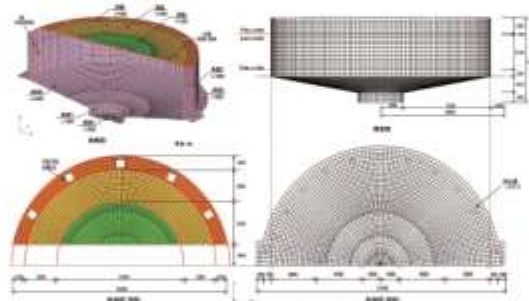
概要

現在、南海トラフ地震や首都直下地震などの大規模地震発生が迫り、これらの地震による被害の防止、軽減は、我が国の喫緊の課題となっている。

将来の地震に備えるにあたり、下水道施設などの社会資本は、既存ストックの有効活用という観点から、可能な限り既存施設を耐震補強して利用していく必要がある。従来の線形解析による照査では、補強箇所が多くなり、経済性との関係で補強工事ができない事例も見受けられるようになった。このような事態を避けるためには、より合理的な設計手法により補強箇所、補強量を減らし、実現可能な耐震補強を行う必要がある。シェル要素でモデル化する構造物に対して合理性を追求するためには、材料非線形を取り入れた有限要素解析を導入して、構造物のより正確な挙動を照査に用いることが有効と考えられる。

このような背景を踏まえ、下水道施設のハード対策としての「耐震補強設計」に着目し、国土強靱化に資するための下水道施設の合理的な耐震補強設計について紹介する。

検討Case



● 目的

下水道処理場内の汚泥濃縮タンクを例に取り、解析手法として非線形有限要素解析を適用することにより、耐震補強設計の合理化を図る。

● 検討内容

- Engineer's Studio(以下、ESと書く)を用いて、非線形有限要素解析を行い、耐震性の照査を行う。
- 解析結果の妥当性確認の観点から、他の解析コード(DIANA)での結果との比較検証を行う。
- 従来の線形解析での照査との比較検証を行う。

● 検討条件

- 構造：鉄筋コンクリート造
- 材料強度：コンクリート $\sigma_{ck}=21.0\text{N/mm}^2$ 、鉄筋 SD295A
- 地震種別：II種地震
- 解析ケース：レベル2地震時・満水
- 設計水平震度： $k_{hf-2}=0.600$ (地表面)
- 質量：自重、慣性力、土圧、水圧、抗頭モーメント
- 解析手法：静的非線形解析(プッシュオーバー解析)
- 解析モデル：頂版、壁、底版・シェル要素性、梁・梁要素
- 構成則：前川鉄筋コンクリート構成則

非線形解析結果

● ひずみのコンター図(左: ES、右: DIANA)

コンクリート
(シェル要素)



コンクリート
(梁要素)



鉄筋
(シェル要素及
び梁要素)



* 着色されているコンクリート要素は、ひび割れが発生している要素である。

線形解析結果

- ・ 構造物特性係数(Cs)を考慮し、レベル2地震時・満水ケースに対して、境界状態設計法による耐震性の照査を行った。
- ・ その結果、頂版、壁、底版において曲げ耐力不足及びせん断耐力不足の箇所があった。
- ・ 梁においては、端部においてせん断破壊モードであった。
- ・ 以上より、線形解析による照査では所要の耐震性を満足しておらず、補強が必要との判定であった。

考察

- ・ 非線形解析において、コンクリートのひび割れは、杭と底版の結合部、頂版の開口部、及び梁の端部・中央部で発生している。
- ・ DIANAでは頂版の剛性が変化する位置にもひび割れが生じているが、これは、解析コードの違いによる鉄筋のモデル化の影響が原因と考えられる。
- ・ ひずみに着目すると、鉄筋の最大発生引張りひずみはESで229 μ 、DIANAで244 μ であり、鉄筋は降伏していない。
- ・ コンクリートの最大発生圧縮ひずみは、ESで264 μ 、DIANAで265 μ であり、コンクリートのピークひずみである2000 μ に達していない。
- ・ せん断の照査では、すべての部材の発生応力度は許容応力度以下であるため、所要の耐震性を満足している。
- ・ ESとDIANAの結果はほぼ一致している。
- ・ 線形解析での結果は、曲げ、せん断耐力不足及びせん断破壊モードであり、補強が必要との判定であった。
- ・ 線形解析と非線形解析の結果の違いは、材料非線形におけるコンクリートの引張抵抗の寄与が大きいためと考える。

まとめ

- ・ 非線形有限要素解析を適用することによって、補強量が減る可能性があり、合理的な耐震補強設計とすることができる。
- ・ 非線形有限要素解析の結果の妥当性確認には、実験や他の解析コードの結果と比較検証を行うことが有効である。



2017 Grand Prix グランプリ

太陽電池支持台の架台設計

-3次元立体骨組み構造解析による詳細設計-

ネクストエナジー・アンド・リソース(株) 様

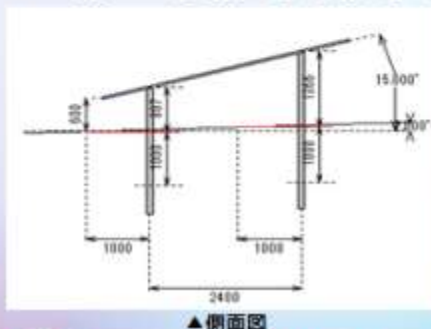
概要

- 本設計は地上設置型太陽光発電システムの架台構造、部材構成を決定する設計
- モジュール(太陽光パネル)には、自然外力として積雪、風圧が作用し、架台には地震力が作用し、モジュールを支える上桟/下桟/支柱には曲げ/引張/圧縮応力が発生し、部材の挙動はより複雑になり、判定結果を得るまでにはかなりの時間を要す
- そこで本検討は3次元FEM解析ソフト「Engineer's Studio®」の機能を活用した専用設計ソフトウェアを開発し、作業効率を向上させた



解析事例

- 架台名称：NEH-TM2、横置き(縦桟先行)4段5列ラミング基礎
- モジュール角度15度、傾斜2度、杭4本



▲側面図



▲モデル図および逆風時風圧荷重図

結果事例

- 変位、断面力は3次元の構造解析結果が得られる
- 照査は、応力度照査および検定比、たわみ照査結果が得られる



▲逆風時-モーメント図



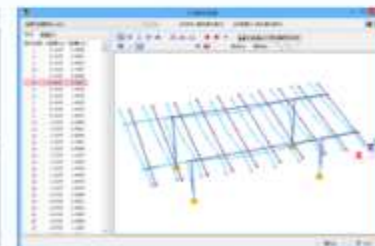
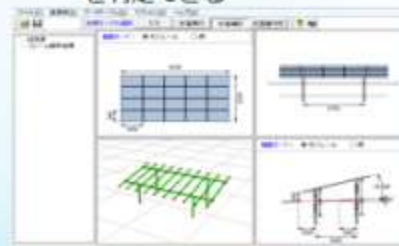
▲逆風時-変形図



▲応力度照査結果、検定比

まとめ

- 専用設計ソフトを開発し、可能な限り入力作業時間と判定結果までの作業時間を短縮し、作業効率を向上させることができる。
- 3次元立体骨組解析による構造計算を行うことから、より現実に近い部材の変位、断面力、たわみが算出されるとともに安全性を判定できる







第5回自動運転カンファランス 今年も開催！
 総務省・経産省・国交省・警察庁登壇予定！！
 ～各種コンテスト 作品募集受付中～

- ・開催時間 2020年11月17日(火)～20日(金)
- ・参加費用 無料(事前申込制)

開催日	開催地	会場
2020年11月17日(火) EVE	Web	オンライン開催のみとなります。
2020年11月18日(水) ～20日(金) Day1～3	東京	品川インターシティホール・ホワイエ MAP およびオンライン ※状況によりオンライン開催のみとなる場合があります。