

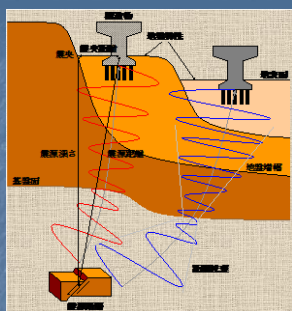
構造物設計法: 耐震設計法 都市工学科 専門科目

都市工学科 災害軽減工学 吉川弘道

地震工学/Earthquake Engineering 耐震設計/Seismic Design

- 地震被害: 近年, 多くの深刻な被災例がある
 - 日本: 兵庫県南部地震 (M7.3, 1995), 新潟県中越前地震 (M6.8, 2007)
 - 海外: 1994年 Northridge 地震, 2004年 大連湾 中越前地震
- 耐震工学: 多くの要素技術から構成される:
 - 地震学/地震工学: 震源断層, 地震の伝播, 地震動幅, 液状化
 - 構造物の応答: 線形/非線形応答解析, 動的/静的解析
 - 構造力学: 線形/非線形力学, コンクリート工学, 鋼構造学, 橋梁工学
 - 設計理論: 数値解析/実験計画法, 信頼性理論, 性能設計, 標準設計, 標準設計の評価
 - 耐震対策: 耐震補強, 免震/制震
- 特定構造物を対象とした設計示方書
 - 道路橋示方書, 鉄道標準, コンクリート標準示方書, 鋼構造, 複合構造
 - 建築: 建築基準法/施行令, 構造規格と告示/指針, 住宅性能表示
 - 原子力: 本体建屋, 屋外土木構造物
- 耐震工学: '4つのPhase' で説明したい

4



地震波の発生/伝播/増幅/構造物の応答/被害

2

耐震工学: 4つのPhase

- Phase1: 地震被害
 - lessons learned from past earthquakes
- Phase2: 構造実験と実証実験
 - experimental studies and verification
- Phase3: 数学モデル/解析プログラム
 - mathematical model/computer programs
- Phase4: 設計基準/ガイドライン
 - specification, design guideline

5

耐震設計法

1: 耐震工学 4つのPhase

Phase1: 地震被害



地震被害/兵庫県南部地震(1995)におけるRC橋脚の地震被害

6

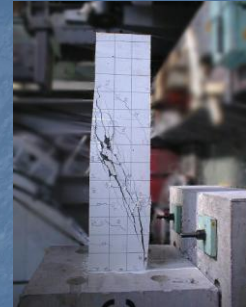
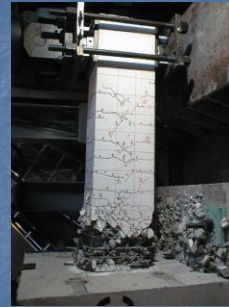
Phase1:地震被害

阪神大震災(1995年 M7.3)



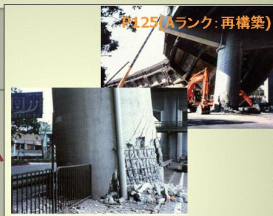
(c) 地震で崩壊した
阪神高速神戸線
(提供 朝日新聞社)

戦後最大被害となった都市直下型地震。17基のピルツ橋脚の倒壊など、衝撃的な光景は全世界の耳目を集めた。



RC単柱の静的載荷実験: 構造実験棟/1998年

10



曲げ破壊

flexural failure

せん断破壊

shear failure

RC梁の小型静的載荷実験 (試験体の終局状況)

Phase2:部材実験/実証実験

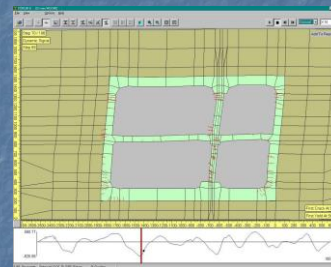


- ・鉄筋コンクリートの柱部材載荷実験の試験体2体
- ・実大モデル(奥側)と縮小モデル(手前側)による比較(試験体の寸法効果(size effect))
- ・アクチュエーターにより水平方向の荷重を漸増正負交番にて付与し、通例、破壊するまで変位(または荷重)を増加させる。

RC柱部材による静的載荷実験 : 東急建設提供

9

Phase3:数学モデル/解析プログラム

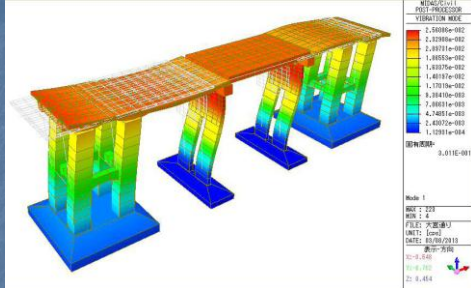


- ・地中構造物(中柱を有する2層RCラーメン部材)とその周辺地盤の横断面/一体モデル
- ・部材を平面応力モデル、周辺地盤を平面ひずみ要素としてモデル化
- ・地震動(時刻歴加速波形)を入力し、全体系の動的弾塑性解析を実施
- ・強震時の変位/損傷/コンクリートのひび割れ

地中構造物の2次元有限要素解析:
要素分割と応答結果(Phase3)

12

Phase3:解析プログラム (FEM解析)



鉄道高架橋の耐震設計: 3次元有限要素解析
提供: クレアテック㈱:

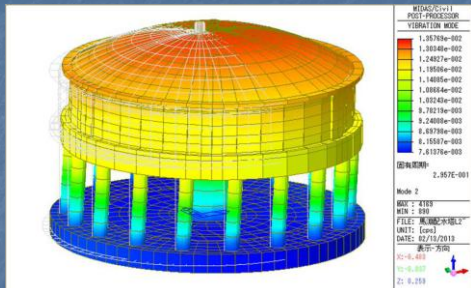
13

耐震工学: 4つのPhase

- Phase1: 地震被害
 - lessons learned from past earthquakes
- Phase2: 構造実験と実証実験
 - experimental studies and verification
- Phase3: 数学モデル/解析プログラム
 - mathematical model/computer programs
- Phase4: 設計基準/ガイドライン
 - specification, design guideline

15

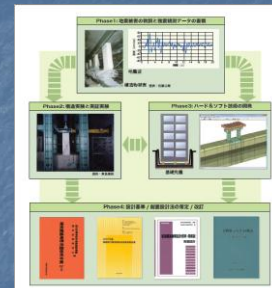
Phase3:解析プログラム (FEM解析)



鉄PCタンクの地震応答解析: 耐震照査と耐震補強
提供: クレアテック㈱:

14

耐震工学: 4つのPhase(フロー図)



耐震地震工学→耐震工学への道程

Phase4:設計基準/設計示方書



設計基準/design concept, specification, guideline(Phase4)

15

耐震設計法

2: 耐震設計と設計照査

2.1 耐震設計

耐震設計法

- 耐震設計法は、多くの設計法の一つであるが、地震大国日本では、最も重要な設計法である。
- 多くの荷重・作用の中でも、地震荷重は強大かつバラツキが多い(予測が困難)。
- このため、欧米/日本において、耐震設計の手法/手順が研究されてきた。
- 現在では、性能設計法が主流となっている。

耐震設計法 小史

- 第1段階 静的解析:
20世紀前半(～1950年頃まで)
- 第2段階 応答スペクトル法:
1930年代から始まる
- 第3段階 動的解析:
概ね1970年ころ始まる
- 現在: 20世紀⇒21世紀
許容応力度設計法、限界状態設計法、性能設計法

2.1 耐震設計とは

➢ 耐震設計(seismic design):

- ・簡単にいうと→
「構造物が地震に対して壊れないように設計すること」
- ・工学的には→
「構造物が設定した設計地震動に対して、所定の耐震性能を有するように設計すること」

➢ 耐震設計の実施:

地震荷重(seismic load)、構造物の耐震性能(seismic performance)を算定し、設計照査(OKか、NGか)を行う:

- ・地震荷重 < 耐震性能 ⇒ OK
- ・地震荷重 > 耐震性能 ⇒ NG(不可)

震度法/修正震度法

■ 震度法:

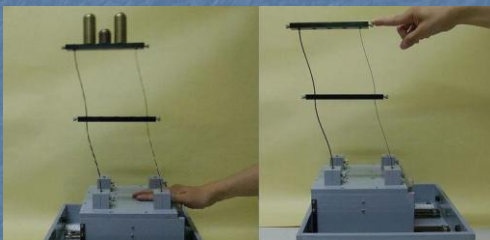
地震荷重 = $k_h \times W$

(k_h = 震度, W = 重量)

レベル1地震動: $k_h = 0.2 \sim 0.3$

レベル2地震動: $k_h = 1.0$ 、または2.0

設計照査: 動的荷重と静的荷重



動的荷重(左)と静的荷重(右)

震度法/修正震度法

■ 震度法: 地震荷重 = $k_h \times W$

(k_h = 震度, W = 重量)

震度 $k_h = 0.2$ とは?

震度 $k_h = 1.0$ とは?

震度法/修正震度法

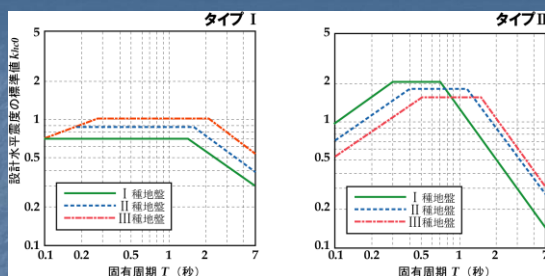
■ 修正震度法:

$$\text{地震荷重} = k_h \times W$$

基本的にこの式を用いるが、構造物の固有周期と地盤の力学特性により、設計震度 k_h を調整する。

近代の構造物設計法

- 許容応力度設計法: Allowable Stress Design
- 限界状態設計法: Limit State Design
- キャパシティデザイン: Capacity Design
- 性能設計法: Performance-Based Design



修正震度法による応答(設計)スペクトルの例
道路橋示方書レベル2地震動(タイプ I、タイプ II)

耐震設計法

2: 耐震設計と設計照査

2.2 性能設計

修正震度法による設計スペクトル 道路橋示方書 V (耐震設計編) レベル2地震動(タイプ I、タイプ II)

地盤	固有周期	タイプ I	タイプ II
I 種地盤	0.2秒		
	2.0秒		
	5.0秒		
III 種地盤	0.2秒		
	2.0秒		
	5.0秒		

性能設計法とは:

- 構造物の建設目的と建設地点の環境によって、発注者/使用者の要求する(必要とする)性能がある。
⇒要求性能
- 一方、構造物は、その構造形状、使用材料の仕様、施工によって、特有の構造性能(達成性能)を有する。
⇒構造性能
- 性能(performance)とは、これまでの耐荷力や変形能にとどまらず、安全性、使用性、美観、(貯蔵物の)遮蔽性など、構造物本来の特性、期待される機能を表すもの

性能設計法とは:

- これらの‘要求性能’と‘構造性能’とを対比し、性能レベルにて設計照査する。
- 構造性能が要求性能を上回ることにより、設計照査が達成される。
- または、発注者の求める要求性能をもとに、目標性能を策定し、建造物が設計／施工される。

耐震設計法

3: 各種構造物の耐震設計

鉄道構造物等設計標準・同解説

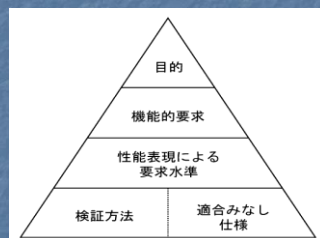
道路橋示方書・同解説

建築建屋(建築構造物)一般

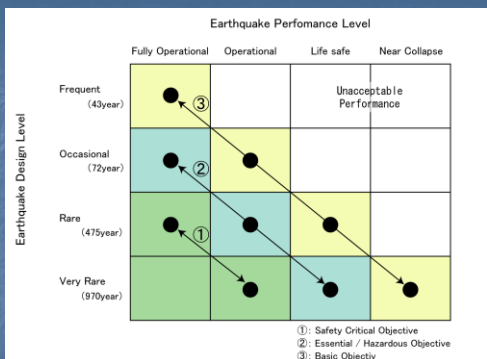
性能設計法と仕様設計:

- 性能設計(performance-based design)
現在の設計法
- 仕様設計(specification-based design)
従来の設計法

鉄道構造物等設計標準・同解説 性能照査に対する基本的考え方



性能照査型設計の階層化モデル



耐震性能マトリックス SEAOC Vision 2000

鉄道構造物等設計標準・耐震設計

		耐震性能 I	耐震性能 II	耐震性能 III
L1 地震動	設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動	○		
L2 地震動	設計耐用期間内に発生する確率は低い、非常に強い地震動		○ 重要度の高い構造物	○ その他の構造物

鉄道構造物等設計標準・耐震設計

設計想定地震動

- L1地震動 設計耐用期限内に数回発生する確率を有する地震動
- L2地震動 設計耐用期限内に発生する確率は低い、非常に強い地震動

耐震性能

- 耐震性能Ⅰ 地震後も補修せずに機能保持できる
- 耐震性能Ⅱ 地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復することができる
- 耐震性能Ⅲ 地震によって構造物全体が崩壊しない

☆ 道路橋示方書(道路協会) :

V : 耐震設計編

- 1: 設計地震動の区分
- レベル1地震動、レベル2地震動
- 2: 耐震性能の区分:
- 耐震性能1、耐震性能2、耐震性能3:
- 3: 橋の重要度:
- A種の橋、B種の橋

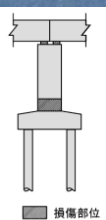
コンクリート部材の損傷レベルと適用補修工法 鉄道標準 解説表2.2.5

	損傷のレベル	補修工法のイメージ
損傷レベル1	無損傷	無補修(必要により耐久性上の配慮)
損傷レベル2	場合によっては補修が必要な損傷	必要によりひび割れ注入・断面修復
損傷レベル3	補修が必要な損傷	ひび割れ注入・断面修復 必要により帯鉄筋等の整正
損傷レベル4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷	ひび割れ注入・断面修復・帯鉄筋等の整正 軸方向鉄筋、鉄骨の座屈が著しい場合は、部材の取替え

☆道路橋示方書/V 耐震設計編: 耐震性能の観点(表-解2.2.1を簡略化)

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1		地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2		地震後、橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久修復を行うことが可能である
耐震性能3	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—

左図: 単柱式橋脚の損傷部位(鉄道標準/解説図2.2.4)
右付表: 損傷レベルと安定レベルの制限値(鉄道標準/解説表2.2.1)



構造物	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
部材の損傷レベル	1	3	3
基礎の安定レベル	1	2	3

☆ 道路橋示方書(道路協会) :

V : 耐震設計編

- 1: 設計地震動
- レベル1地震動: 発生する確率が高い地震動
 - レベル2地震動: 発生する確率は低い、大きな強度を持つ地震動
タイプⅠの地震動、タイプⅡの地震動
- 2: 耐震性能の区分と定義:
- 耐震性能1: 地震によって橋としての健全性を損なわない性能
 - 耐震性能2: 損傷が限定的で機能が短期間で回復でき、補強を必要としない。
 - 耐震性能3: 地震による損傷が橋として致命的とならない性能
- 3: 橋の重要度:
- A種の橋(重要度が標準的な橋)、B種の橋(重要度が高い橋):

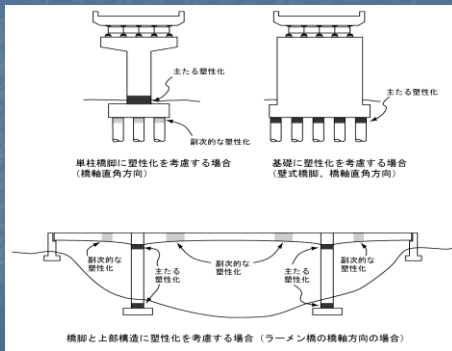
☆ 道路橋示方書における性能マトリックス: 道路橋示方書 表-解2.2.2を再整理

設計地震動	A種の橋 重要度が標準的な橋	B種の橋 重要度の高い橋
レベル1地震動	耐震性能1 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	
レベル2地震動	耐震性能3 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	耐震性能2 地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能
タイプⅠ地震動 タイプⅡ地震動		

RC橋脚の許容塑性率: 曲げ破壊型
 タイプⅠの地震動: 耐震性能2: $\alpha=3.0$ 、耐震性能3: $\alpha=2.4$
 タイプⅡの地震動: 耐震性能2: $\alpha=1.5$ 、耐震性能3: $\alpha=1.2$

建築構造物の性能設計 最近の性能設計型指針/基準類

☆ 塑性化を考慮する部材の組合せ: 道路橋示方書 図-解5.3.1から3例抜粋



☆ 建築構造物の性能設計: オフィスビル/集合住宅などの特徴

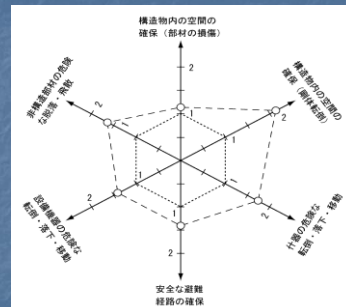
- ・ 建築物＝人間の居住空間/社会活動空間
: 性能項目はより多岐に亘る
- ・ 建築物＝私的所有物であり、「性能」は明確。多くの実施例がある。
: 要求性能 ⇒ 目標性能 ⇒ 保有性能 の流れが明確
- ・ 建築基準法(1981年施行)、建築基準施行令の大幅改定(1998年)
: 建築基準法/施行令: 国の法律としての拘束力を持つ
- ・ 住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)
: 住宅性能表示基準の新設
- ・ 損害保険の対象。直接に売買される私的所有物。証券化される不動産
- ・ 性能の良し悪しが、物件価格に反映される

性能規定型設計指針類: 土木構造物

- 1: 複合構造物の性能照査指針(案)(土木学会)
 ■ 鋼/コンクリート複合構造物の設計・施工に関する統一指針案。6編構成
 性能項目(階層化/細分化): 要求性能 ⇒ 目標性能 ⇒ 照査項目 ⇒ 照査指標
- 2: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針
 耐震重要度分類のうち、最上位のA₂クラスとAクラスの機器・配管を支持する鉄筋コンクリート構造物を対象。目標性能: 耐震性能と耐久性能に分類
- 3: (社)PC技術協会: 貯水用円筒形PCタンク設計施工基準
 常時の部材安全性 ⇒ 許容応力度法
 地震時の安全性 ⇒ 地震動レベルとPCタンクの重要度に応じて、性能照査
- 4: LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針: 土木学会
 耐震性能: 要求性能として、安全性と使用性を規定
 目標性能: 耐荷性能(変形性能)と止水性能

建築物の性能表示の例: レーダーグラフ表示:

出典: 建築研究振興協会編: 鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン



耐震安全性の性能表示: 応答値が限界値に達する時の地震動の大きさの標準地震動に対する倍率

☆ 建築構造物の性能設計:

住宅の品質確保の促進等に関する法律: 品確法

- ・ 住宅性能表示基準の新設
 - 評価性能: 構造の安定、火災時の安全、住居環境(温熱、空気、光etc,)など9項目
- ・ 住宅紛争処理体制の整備
- ・ 瑕疵担保責任の明確化

耐震補強の考え方と方法

1: 架橋形式の改善

免震化、慣性力の分散

2: 部材耐震補強

RC巻き立て、鋼鈑巻き立て、繊維シート巻き立て

☆ 建築構造物の性能設計:

日本住宅性能表示基準(耐震等級のみ抜粋)

項目	結果	適用範囲
1-1耐震等級 (構造躯体の倒壊等防止)	地震に対する構造躯体の倒壊、崩壊等のしにくさ	戸建て又は共同
	3 極めて稀に(数百年に一度程度)発生する地震による力の1.5倍の力に対して倒壊、崩壊等しない程度	
	2 極めて稀に(数百年に一度程度)発生する地震による力の1.25倍の力に対して倒壊、崩壊等しない程度	
	1 極めて稀に(数百年に一度程度)発生する地震による力に対して倒壊、崩壊等しない程度	
1-2耐震等級 (構造躯体の損傷防止)	地震に対する構造躯体の損傷(大規模な修復工事を要する程度の著しい損傷)の生じにくさ	戸建て又は共同
	3 稀に(数十年に一度程度)発生する地震による力の1.5倍の力に対して損傷を生じない程度	
	2 稀に(数十年に一度程度)発生する地震による力の1.25倍の力に対して損傷を生じない程度	
	1 稀に(数十年に一度程度)発生する地震による力に対して損傷を生じない程度	

耐震補強の考え方と方法

架橋形式の改善: 免震化

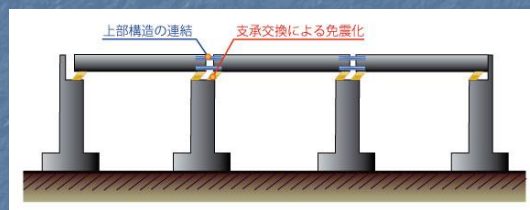


図2 免震化による方法

耐震設計法

4: 耐震補強

架橋方式の改善

部材耐震補強

耐震補強の考え方と方法

架橋形式の改善: 免震化による方法

橋を支える橋梁と橋脚の間にある支承について、免震支承、ダンパー等を併用した機構に取り換えることで、橋全体を長周期化するとともに、減衰性能を高めて、地震時に橋梁に作用する慣性力の低減あるいは遮断を図る方法(図2)。

免震支承は天然ゴムと鋼板の積層構造になっており、高軸力を支えるとともに、水平変位方向の剛性が低く、これにより上部構造の長周期化を実現することとなる。ダンパーは、粘性体や粘弾性体で構成され、水平変形時に高い減衰力が発揮されるため、地震時にエネルギー吸収の減衰機構として働き、応答の低減や早期の収束が期待できる。現在では、免震支承へ減衰機構を併用させた鉛プラグ入り積層ゴムや、減衰特性がある高減衰ゴムによる支承なども開発されている。

耐震補強の考え方と方法 架橋形式の改善:慣性力の分散

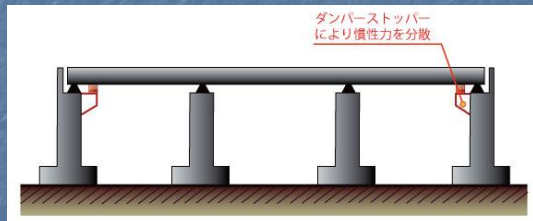


図3 慣性力を分散する方法

耐震補強の考え方と方法 RC橋脚の耐震補強:鉄筋コンクリート巻き立て

既存橋脚の柱の周囲に、新たに軸方向筋及び帯筋を配筋しコンクリートで巻き立てる工法である。さらに、既存柱の中間を貫通させた帯筋を設けることもある。構造的には、軸方向鉄筋による曲げ耐力、コンクリート断面の増大によるせん断耐力の向上が図られる。また、中間貫通帯筋を設けることにより、柱全体の拘束力が上がり、じん性を発揮し、地震時の変形能力が向上する。他の工法と比較して、安価な費用で補強することが可能であり、経済的に優れた工法である。

耐震補強の考え方と方法 架橋形式の改善:慣性力の分散

・慣性力を分散する方法

上部構造及び下部構造の支持条件を調整して、地震時に負担する慣性力をバランスよく他の下部構造に分散することにより、危険度の高い支持部の早期破壊から全体崩壊へとつながらないように橋全体として地震力に対して抵抗する方法(図3)。

各下部構造への地震時慣性力の分散方法としては、ゴム系支承による方法、多点固定による方法、地震時のみ固定として機能するダンパーストッパーによる方法がある。

耐震補強の考え方と方法 RC橋脚の耐震補強:鋼板巻き立て

既存橋脚の柱の周囲に、新たに鋼板を巻き立てる工法であり、さらに柱と鋼板の間に充填材を注入して密着させ、アンカー筋を通じて鋼板を既存の基礎フーチングへ定着させる構造である。鋼板からフーチングへ定着された軸配筋により曲げ耐力が向上し、鋼板による柱への拘束力からじん性の向上が図られる。コンクリート巻き立てに比べて、柱脚の断面増加が少ないため、省スペースに適している。

耐震補強の考え方と方法 部材耐震補強:RC橋脚の場合

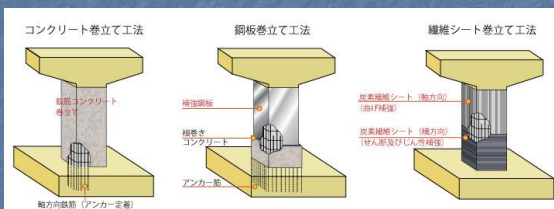


図5 橋脚の補強方法(鉄筋コンクリートの場合)

耐震補強の考え方と方法 RC橋脚の耐震補強:繊維シート巻き立て

既存橋脚の柱の周囲に、新たに炭素繊維やアラミド繊維など多本数の連続繊維を樹脂などでの結合材で集束したもので巻き立てる工法である。炭素繊維シートの橋脚躯体の水平方向に貼り付けることにより、せん断耐力の向上を図り、基部曲げ破壊へと移行させることができる。また、拘束効果によりじん性の向上が図られる。

耐震設計法

4: 授業: 専門科目

都市設計製図

(3年後期科目: 月曜日1-2時限)

設計地震動:

- レベル1地震動:
供用期間中に発生する確率が高い地震動
- レベル2地震動:
供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度を持つ地震動
タイプⅠ: プレート境界型の大規模地震動
タイプⅡ: 内陸直下型を想定した地震動

- 予備のppt資料

コンクリート標準示方書

[構造性能照査編], [耐震性能照査編]

- ① 使用性の照査: 常時荷重+環境条件下の使用限界状態
- ② 安全性の照査: 静的最大荷重下の終局限界状態
- ③ 安全性の照査: 繰り返し荷重下の疲労限界状態
- ④ 耐震性の照査: 動的荷重下の安全、機能、復旧性に関する限界状態
- ⑤ 耐久性の照査: 常時荷重+環境条件下の材料劣化に関する限界状態