

2018年大阪府北部の地震における 建物強震観測データを用いた地震応答再現解析

宮井 彩名¹⁾・金子 健作²⁾

1) 元 大阪市立大学工学部建築学科

2) 大阪公立大学大学院工学研究科

e-mail: kanekok@omu.ac.jp

大阪公立大学の二棟に設置された地震計では、2018年の大阪府北部地震における加速度記録が得られた。本研究では、観測された強震記録を用いて建物部の地震応答を再現した。はじめに、常時微動計測により建物の固有周期と減衰定数を同定し、立体骨組解析モデルに反映するコンクリートの強度や減衰定数などを検討した。その結果、時刻歴地震応答解析結果は、二棟において概ね記録を再現でき、建物部モデル化の妥当性を示した。

Key words : 大阪府北部地震, 強震記録, 地震応答解析, 構造モニタリング

1. はじめに

大阪公立大学杉本キャンパスでは、建物二棟において地震計による長期の構造モニタリングが行われている。2018年の大阪府北部地震では、強い地震動記録を得たものの、構造被害は確認されていない。今後さらに強い地震動を受けたとき、モニタリングを活用し建物の継続使用性などを迅速に評価するには、健全時建物の固有周期などを事前に確認しておく必要がある。なお、杉本キャンパスでは、1981年以前に建設された校舎が多数存在しており、地震後にこれらの建物も含めて評価することが望まれる。これを実現するには、建物基部での加速度記録を活用し、自由地盤の加速度を推定することが考えられるが、地盤と建物の動的相互作用の影響を除去しなければならない。それにはまず建物単体の動的特性の把握が重要であるため、本研究では、設計図書に基づいて観測建物二棟の振動解析モデルを構築し、その地震応答解析結果と加速度記録を比較し、モデルの妥当性を検証する。

2. 対象建物と構造モニタリングシステムの概要

(1) 中層鉄筋コンクリート造建物

大阪公立大学杉本キャンパスにある二つの建物の概要を述べる。一つめは、2004年竣工の地上5階建てRC造の全学共通教育棟D棟（以降、教育棟）である（図1）。NS方向は耐震壁付きラーメン構造、EW方向は純ラーメン構造（5階のみ両方向純ラーメン構造）、平面形はNS方向1スパン16m（西側3フレームは2スパン16+11m）、EW方向11スパン79.2mのL字型である。建物高さについて、軒高さは22.05m、最高部高さは22.60mである。

(2) 地下階を有する高層鉄筋コンクリート造建物

二つめは、1996年竣工の地下4階、塔屋2階を有する地上11階建ての学術情報総合センター（以降、学術セン

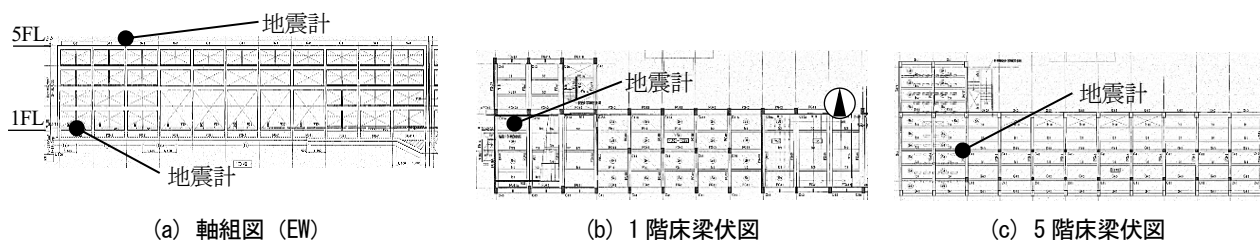


図1 全学共通教育棟 (D棟) の概要¹⁾

ター) である (図2)。地上部は梁 S 造, 柱 SRC 造の両方向ラーメン構造, 地下部は要所に地下外壁や耐震壁が配された RC 造 (一部 SRC 造), 平面形は NS 方向 5 スパン 41.9m, EW 方向 9 スパン 64.6m である。建物高さについて, 軒高さは 49.8m, 最高部高さは 59.8m, 基礎深さは GL-21.1m である。教育棟とは, 約 200m 離れている。

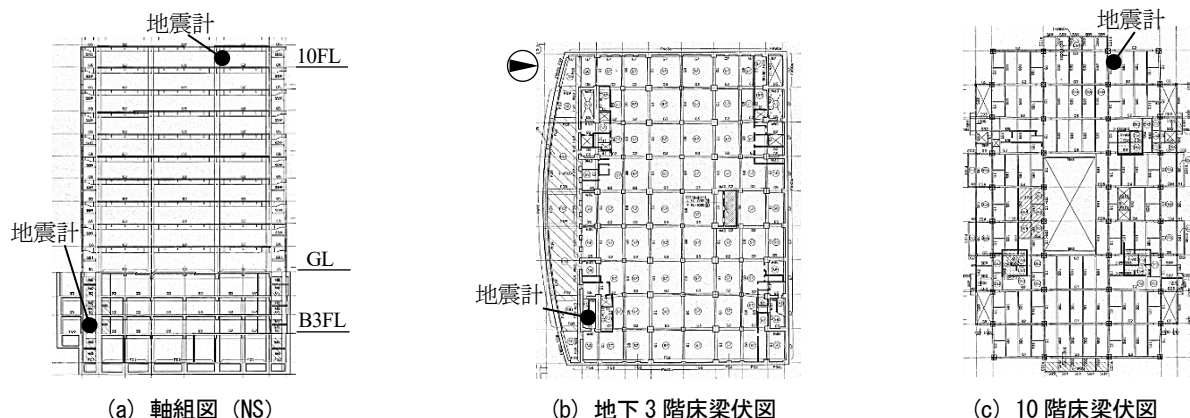


図2 学術情報総合センターの概要²⁾

(3) 構造モニタリングシステムと強震記録

地震計は, 教育棟の1階と5階, 学術センターの地下3階と地上10階に設置されている (図1, 図2)。すべて東京測振製のネットワーク対応強震計 CV-575 である。その仕様は, サーボ型加速度計, 水平2成分および上下1成分の計3成分測定, 測定範囲 0~2048 cm/s², サンプル周波数 100 Hz である。

本研究で対象とする大阪府北部地震は最大震度 6 弱, マグニチュード 6.1 であり, 杉本キャンパスがある大阪市住吉区では震度 4 を記録した。教育棟1階および学術センター地下3階で得られた加速度波形を図3に示す。

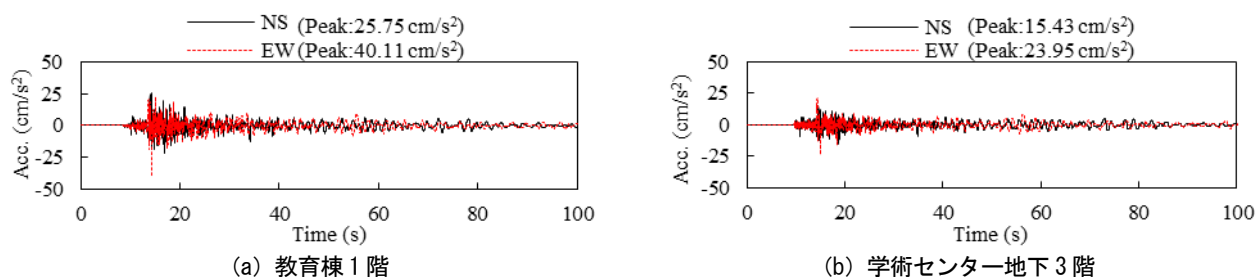


図3 2018年大阪府北部地震で記録された加速度波形

3. 常時微動計測によるシステム同定

対象建物において, 常時微動計測による固有周期の確認および RD 法による減衰定数の同定を行った。計測は白山工業製の微動観測装置 JU410 (サーボ加速度計) を用いた。サンプル周波数は 100 Hz とした。RD 法の閾値は, 常時微動計測で得られた加速度振幅の標準偏差の $\sqrt{2}$ 倍とした。閾値で定義されたサンプル曲線のアンサンブル平均 (RD 波形) から 10 サイクルの対数減衰率を求め, その平均値を減衰定数とする。それぞれの建物の固有周期帯を考え, 教育棟は 1.0 Hz から 5.0 Hz, 学術センターは 0.5 Hz から 2.0 Hz のバンドパスフィルタをかけた。

教育棟5階の記録により同定した結果, 1次固有周期は NS 方向で 0.29 秒, EW 方向で 0.40 秒, 減衰定数は NS 方向で 0.078, EW 方向で 0.030 であった。地下階を有する学術センターの P1 階の記録により同定した結果, 1次固有周期は NS 方向 1.33 秒, EW 方向 1.17 秒であった。

4. 立体骨組モデルを用いた動特性評価

(1) 振動解析モデルの概要

振動解析では, 各階を剛床仮定した立体骨組モデルを用いる (図4a と図5a)。梁は材端塑性ヒンジモデル, 柱はファイバーモデルとし, 履歴特性は Takeda モデルとした。部材断面は構造図, 積載荷重は構造計算書を基に設定

した。積載荷重の一部は、文部科学省の指針³⁾を参照した。

実際の建物に対応させるために検討した点を表1と表2に示す。両建物は竣工から約20年が経過しており、コンクリート強度が増進していると考えられる。これを考慮するために既往研究⁴⁾を参考にして、コンクリートの設計基準強度 F_c の1.4倍を用い、ヤング係数⁵⁾を評価した(現実的な中央値ケース)。減衰定数は、RD法による結果をもとに設定する。教育棟について、エキスパンションジョイント(Exp.J)により隣棟と分離されているため、地震計が設置されているD棟のみを対象とした。構造図に基づき、幾つかの耐震壁にある構造スリットをモデル化した。学術センターについては、減衰定数を5%とし、モデル化で無視した側方地盤の影響を間接的に評価した。

表1 全学共通教育棟

検討項目	モデル化
コンクリートの強度	設計値 (F_c)、現実的な中央値 ⁴⁾ ($1.4 \times F_c$) の2ケース
減衰定数	剛性比例型(図4bに示す1次モードに対して3%)
PC梁	プレストレス荷重をCMQ荷重で考慮
その他	全学共通教育棟A~C棟とのExp.Jによる分離、耐震スリット

表2 学術情報総合センター

検討項目	モデル化
コンクリートの強度	設計値 (F_c)、現実的な中央値 ⁴⁾ ($1.4 \times F_c$) の2ケース
減衰定数	レイリー減衰とし、図5(b),(c)に示す有効質量比の大きな1次と10次に対して3%または5%(側方地盤の効果を間接的に評価)
支持条件	地下4階基部で固定、側方地盤の効果を無視

(2) 固有値解析による固有周期と振動モード

教育棟について、コンクリートの強度を設計値 F_c とその1.4倍としたそれぞれのモデルにおける固有値解析から得た1次固有周期を表3に示す。NS方向とEW方向において、常時微動計測結果に概ね対応している。

学術センターについては、コンクリートの強度を設計値 F_c とその1.4倍とした二つのケースでの固有値解析結果のうち、有効質量比の大きなモード次数を両方向抽出した結果を表4に示す。1次固有周期は二つのケースにおいて、両方向で常時微動計測結果に概ね対応している。NS方向において、10次の有効質量比が大きい理由は、集密書庫(単位積載荷重 7.5 kN/m^2)により、建物質量の半分を占める地下部の変形が大きいためである(図5c)。

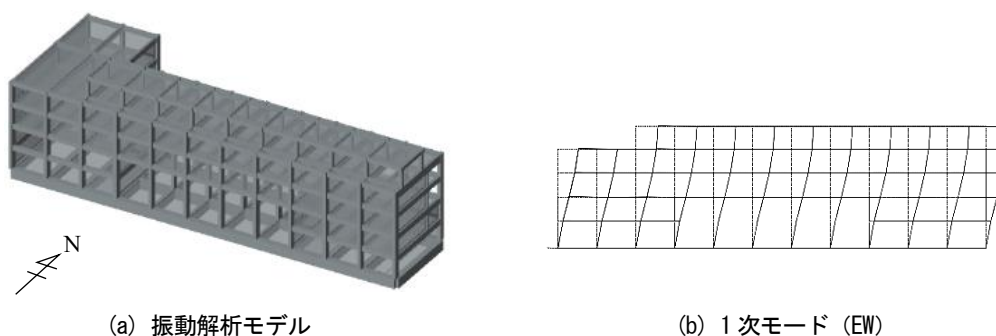


図4 全学共通教育棟の振動モードの概要

表3 全学共通教育棟の1次固有周期(単位 s)

	NS 方向	EW 方向
設計値のケース (F_c)	0.23	0.52
現実的な中央値のケース ($1.4 \times F_c$)	0.22	0.49

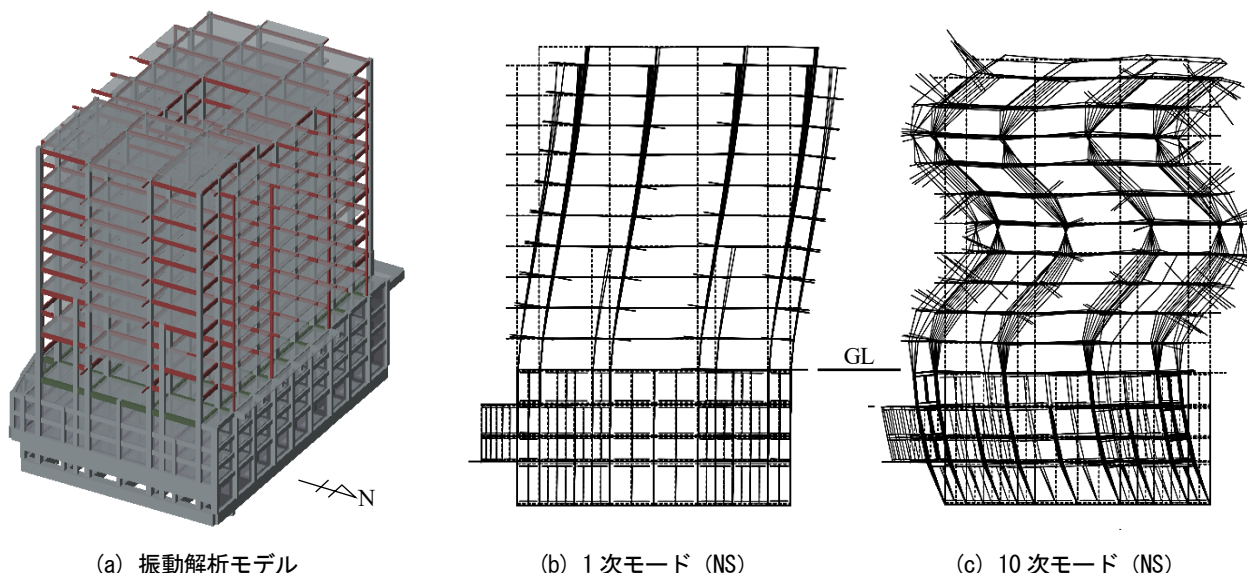


図5 学術情報総合センターの振動モードの概要

表4 学術情報総合センターの固有値解析結果

次数	設計値ケース (Fc)			現実的な中央値ケース (1.4×Fc)		
	固有周期 (s)	有効質量比 (%)		固有周期 (s)	有効質量比 (%)	
		NS 方向	EW 方向		NS 方向	EW 方向
1	1.34	40.04	0	1.30	39.58	0
2	1.21	0.01	39.34	1.17	0	39.04
4	0.48	7.56	0	0.47	7.33	0
5	0.43	0.07	6.27	0.42	0.08	6.18
7	0.29	11.04	0	0.28	10.14	0
8	0.26	0.03	4.85	0.25	0.03	4.68
10	0.21	25.97	0.01	0.20	26.17	0.01
11	0.18	2.22	2.68	0.17	3.02	2.09

5. 大阪府北部地震の記録を用いた地震応答の再現解析

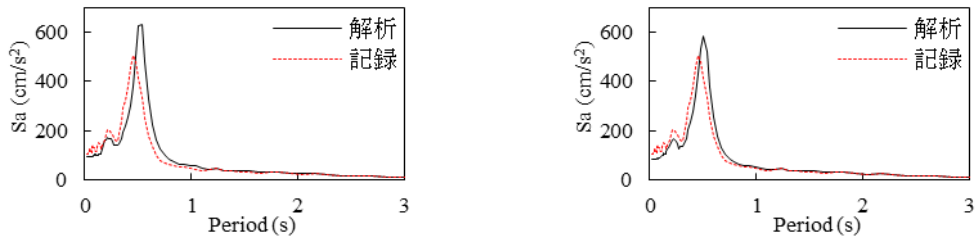
(1) 地震応答解析結果と地震観測記録の比較方法

図3に示した加速度波形を水平二方向同時に立体骨組モデルへ入力し、直接積分法により時刻歴応答計算する。得られた加速度応答から、3つの指標として、加速度床応答スペクトル、床加速度および床変位を記録と比較する。

(2) 加速度床応答スペクトルによる評価

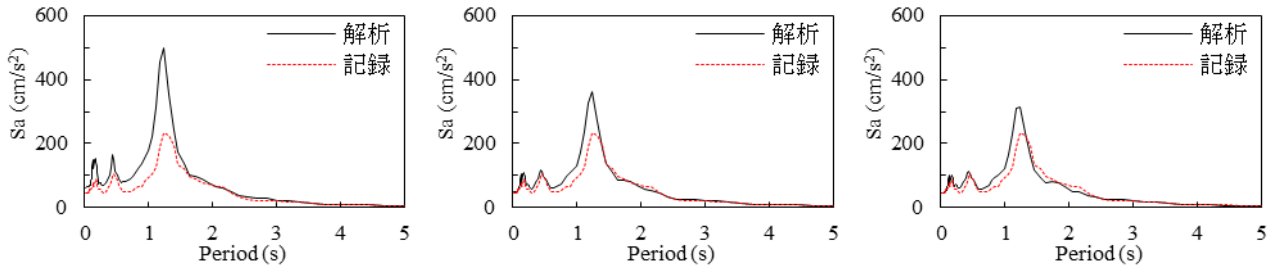
記録と時刻歴応答解析の加速度波形を用いて計算したEW方向の加速度床応答スペクトルSaについて、教育棟の結果を図6および表5に示す。コンクリート強度Fcについて、設計値を用いたケースと1.4倍したケース（現実的な中央値ケース）では、後者が記録により対応した。他にもFcの増加を様々に検討した結果、1.4倍のケースが妥当であった。学術センターについて、減衰定数を3%と5%、Fcを設計値とその1.4倍にして比較した結果を図7および表5に示す。減衰定数を5%かつFcを1.4倍とすることで、記録に最も対応したことがわかる。

以降では、両建物において卓越周期やピーク振幅を最も再現する解析モデル（教育棟はコンクリートの強度1.4倍、学術センターは減衰定数5%、コンクリートの強度1.4倍）を用いた検討結果を述べる。



(a) 設計ケース (b) 現実的な中央値ケース

図6 EW方向加速度床応答スペクトル (全学共通教育棟5階)



(a) 減衰定数3%, 設計ケース (b) 減衰定数5%, 設計ケース (c) 減衰定数5%, 中央値ケース

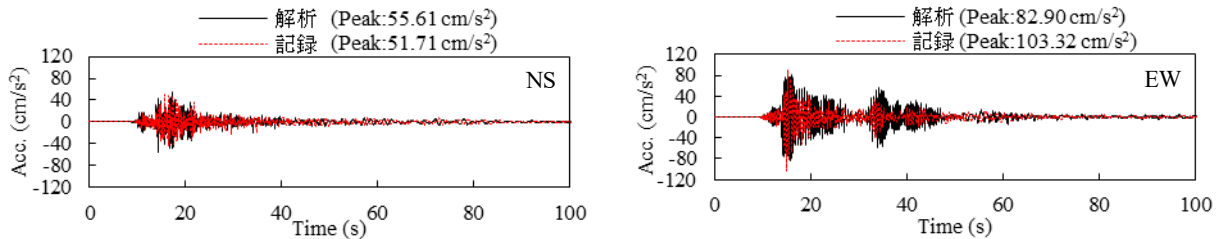
図7 EW方向の加速度床応答スペクトル (学術情報総合センター10階)

表5 EW方向の加速度床応答スペクトル

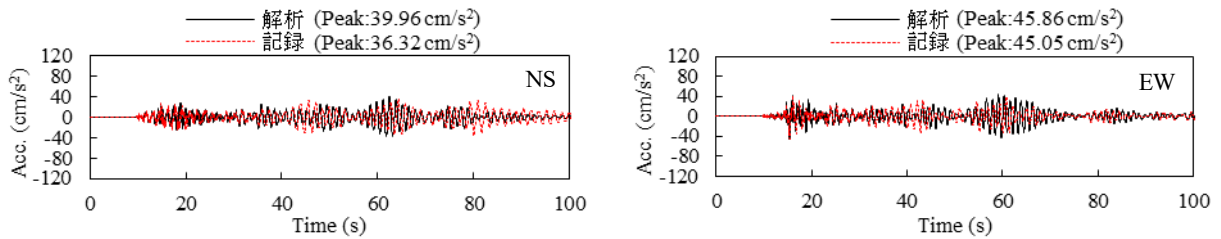
	全学共通教育棟5階			学術情報総合センター10階			
	観測記録	時刻歴解析		観測記録	時刻歴解析		
		設計値 Fc	現実値 1.4×Fc		減衰3% Fc	減衰5% Fc	減衰5% 1.4×Fc
卓越周期 (s)	0.45	0.54	0.51	1.24	1.24	1.24	1.24
ピーク振幅 (cm/s ²)	504	632	585	235	499	364	314

(3) 絶対加速度応答による評価

観測記録と時刻歴応答解析で得た加速度波形を図8に示す。教育棟EW方向を除き、最大加速度の差は10%以内である。



(a) 全学共通教育棟5階 (中央値ケース)

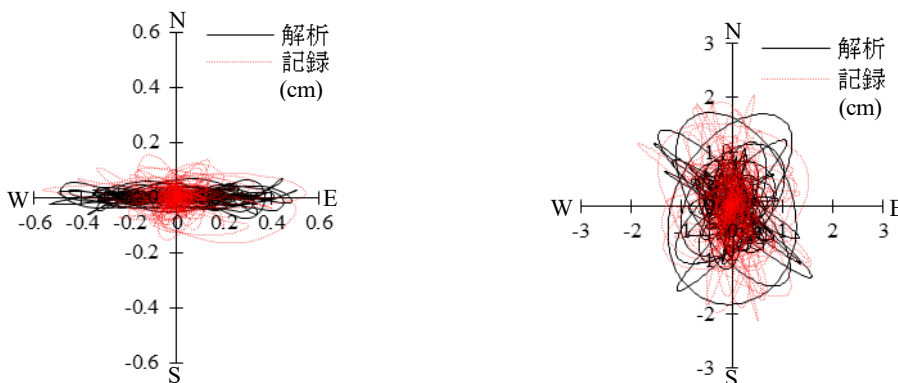


(b) 学術情報総合センター10階 (減衰定数5%, 中央値ケース)

図8 絶対加速度波形

(4) 変位応答による評価

加速度記録を Trifunac 法で積分し、ハイパスフィルタ（建物の固有周期帯を踏まえて、遮断振動数は教育棟で 1 Hz、学術センターで 0.1 Hz）で処理した変位と時刻歴解析による変位を比較した結果を図 9 と表 6 に示す。全体的に概ね記録に対応したといえる。教育棟 NS 方向での差異は、RD 法による EW 方向の同定結果をもとに、建物全体の減衰定数を設定したためと考えられる。学術センターでは、地下 3 階までのドライエリアがある NS 方向でよい一致を示す一方、EW 方向は約 15%の差がある。



(a) 全学共通教育棟 5 階（中央値ケース） (b) 学術情報総合センター10 階（減衰定数 5%、中央値ケース）

図 9 建物床変位のオービット

表 6 建物の最大変位

単位 (cm)

	全学教育棟 5 階		学術情報総合センター10 階	
	NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向
観測記録	0.17	0.56	2.10	1.86
時刻歴解析	0.07	0.54	1.82	1.58

6. まとめ

本研究では、強震記録を用いて建物部応答の再現を試みた。両建物についてコンクリートの強度を設計値の 1.4 倍とし、減衰定数を教育棟で 3%、学術センターで 5%とすることで、時刻歴解析値は建物部応答の記録を概ね再現できた。今後の課題は、近接する二棟の振動解析モデルを用いて建物への入力損失の度合いを分析し、大学キャンパス内にある建物群を対象とした建物健全性評価法の高度化を図ることである。

謝辞

本研究を進めるにあたり、公立大学法人大阪の事務局企画部施設課からは、建物の図面および構造計算書の提供を受けた。また、大阪公立大学大学院工学研究科の角掛久雄教授からは、構造モニタリングデータの提供を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大阪市立大学：全学共通教育棟構造図，2001 年。
- 2) 大阪市立大学：学術情報総合センター構造図，1994 年。
- 3) 文部科学省大臣官房文教施設企画部：建築構造設計指針，p. 22，2009 年。
- 4) 安田正雪，阿部道彦，千歩修，小山智幸：10 年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 1，pp. 777-782，2007 年。
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説，日本建築学会，pp. 46-52，2010 年。