

図書館書架の地震時挙動及び書籍の落下メカニズムに関する研究

村田 晶¹・田中 宏和²・原 優³・木原 正雄⁴・後藤 正美⁵・宮島 昌克⁶

¹正会員 金沢大学 助教 理工研究域環境デザイン系 地震工学研究室 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp

²金沢大学 修士課程学生 大学院自然科学研究科 地震工学研究室 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: den09tyu@gmail.com

³キハラ株式会社 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台3-5)
E-mail: hara@kihara-lib.co.jp

⁴キハラ株式会社 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台3-5)
E-mail: kihara_m@kihara-lib.co.jp

⁵金沢工業大学 教授 環境・建築学部建築系 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)
E-mail: m-gotou@neptune.kanazawa-it.ac.jp

⁶正会員 金沢大学 教授 理工研究域環境デザイン系 地震工学研究室 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

近年の日本国内で発生した地震では、「家具の転倒」や「落下物」による負傷が、負傷原因のほぼ半分を占めている。また年代別では、若者と高齢者における「家具の転倒」や「落下物」による被害が顕著となっている。様々な年代の人が利用する、代表的な公共施設の1つである図書館の書架や書籍の地震時の挙動を把握することは、地震時の迅速な避難を図ることや、書架の転倒や書籍の落下に伴う人的被害を軽減するためにも重要である。書架の転倒防止除籍の落下には様々な方法が考えられるが、対策の元となる、定量的な評価に関する研究や知見が少ない。そこで、振動台実験によって、書架の地震時挙動及び書籍の落下挙動を検証し、地震時の書架転倒メカニズムの定量化を行った。その結果、書籍の落下には各段の振動特性の影響が大きいということがわかった。

Key Words : bookshelves, fall of book, seismic response characteristics, quantification

1. はじめに

近年の日本国内で発生した地震では、「家具の転倒」や「落下物」による負傷が、負傷原因のほぼ半分を占めている。また年代別では、若者と高齢者における「家具の転倒」や「落下物」による被害が顕著となっている。様々な年代の人が利用する、代表的な公共施設の1つである図書館の書架や書籍の地震時の挙動を把握することは、地震時の迅速な避難を図ることや、書架の転倒や書籍の落下に伴う人的被害を軽減するためにも重要なことである。これまで、地震時における家具の転倒挙動や転倒被害に関する検証が行われてきた。例えば、目黒らが行った家具の挙動解析の研究^{1,2)}では、3次元個別要素法を用いたシミュレーションによる解析が行われている。また、書架の耐震対策に関する実験³⁾も行われている。しかしながら本の落下まで考慮した書架の地震時挙動解析はほとんど行われていない。

地震時の公共施設における書架の耐震対策の主なものとしては、書架の転倒防止と書籍の落下防止が考えられる。書架の転倒防止策としては、書架の固定、また近年では免震装置による方法がある。また図書館建物の免震化による被害の軽減もあるが、これは費用対効果の面からごく少数にとどまっている。以上のように書架の転倒防止方法や書籍の落下防止方法も様々あるが、対策の元となる、定量的な評価に関する研究や知見が少ない。そこで本研究では、振動台実験によって書架の地震時挙動及び書籍の落下挙動を検証し、地震時の書架転倒メカニズムを解明することを本研究の目的とする。



写真-1 東日本大震災における書架の転倒⁴⁾

2. 実験の概要

地震時の書架及び、書籍の落下挙動を検証するために、実物書架を用い、書籍を載せた状態での振動台実験を行う。書籍を配架した書架に地震波加振を行い、振動特製、落下挙動の把握を行う。以下に供試体、計測方法及び入力地震動の概要を示す。

(1) 実験対象試験体の概要

以下に実験に用いた書架及び付属品の概要を説明する。

a) 書架概要

書架(LRS複式2連7段・天板付・ブックサポート付)寸法及び諸重量を図-3、表-4に示す。

b) 書架付属品概要

安全安心ライン・シート

地震時に書籍の飛び出しによる怪我や、避難経路の封鎖を回避するために、書架に安易にとりつけることができる。



写真-2 供試体書架

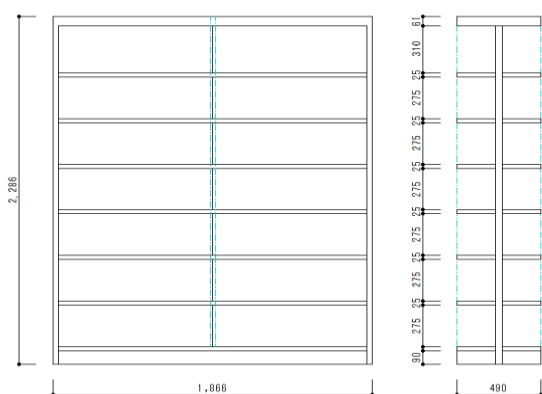


図-3 書架の寸法

表-4 諸重量

書架	182.7kg
背当たり	14.9kg
本	456.0kg(A5:19.5kg×8段=156kg 四六判:15kg×20段)
総重量	635.6kg

(2) 設置及び計測方法

a) 設置方法

今回は水平1方向、上下方向の加振が可能な2軸振動台を用いる。この人道台に対して書架を45度傾けて設置することにより、疑似的に3次元方向の振動を再現する。以後書架に対して短手方向をx、長手方向をy、上下方向をzとする。

振動台への固定方法は、振動台に台座となる厚板を固定し、書架の脚部と厚板を、L字金具とビスで固定する。

図-5に振動台への設置方法を示す。

b) 計測方法

今回は計測にデジタル加速度計(10G,1方向)を10個(加速度計1~10)、デジタル加速度計(10G,3方向)を2個(加速度計A,B)、アナログ加速度計(3方向)を4個用いて加速度を測定した。

図-6、図-7に使用した加速度計の設置位置を示す。

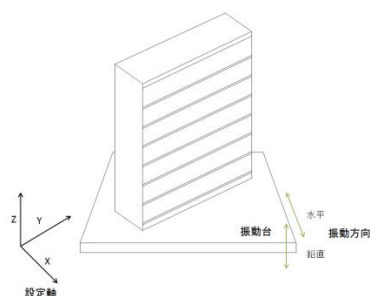


図-5 設置方法

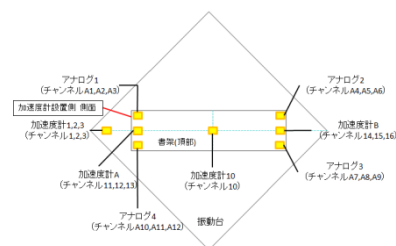


図-6 加速度計の設置場所(振動台、書架頂部)

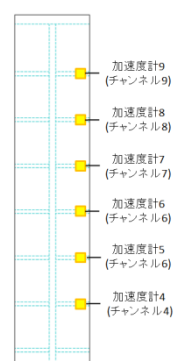
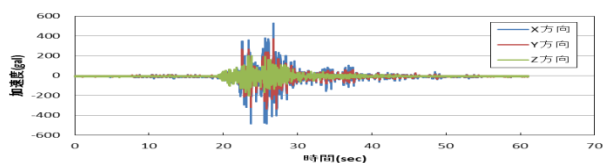


図-7 加速度計設置場所(書架側面)

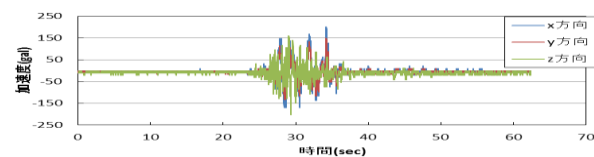
(3) 入力地震動

入力地震動には東北地方太平洋沖地震（K-NET築館），兵庫県南部地震（JMA神戸），新潟県中越沖地震（K-NET柏崎）の3波を用いる．K-NET築館は東北地方太平洋沖地震で観測された地域の中で最も大きな加速度を記録したこと，強震する時間帯が短い時間内で2回続くことが特徴である．また観測波の水平方向卓越周期は0.2～0.5秒である．ここで，JMA神戸波は卓越周波数が1～2Hzであり，構造物に大きな被害をもたらした．卓越周期は1～2秒である．K-NET柏崎波は卓越振動数が0.4～0.6Hz程度であり，比較的長い周期が卓越している．K-NET築館波は50%，75%，100%の3ケースを，その他の観測波は75%，100%の2ケースで加振を行う．図-8～図-10にそれぞれの地震動の波形および加速度フーリエスペクトルを示す．なお，図中では実際に実験で入力した波形100%のケースを示している．

兵庫県南部地震(JMA神戸)



新潟県中越沖地震(K-NET柏崎)



東北地方太平洋沖地震(K-NET築館)

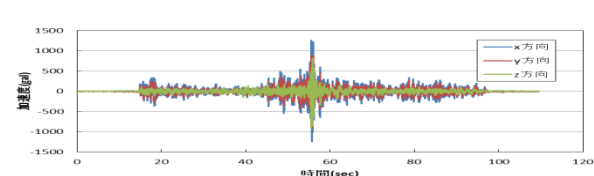


図-8 入力地震波の加速度

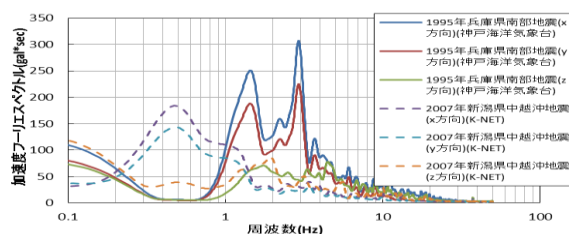


図-9 加速度フーリエスペクトル(JMA神戸，K-NET柏崎)

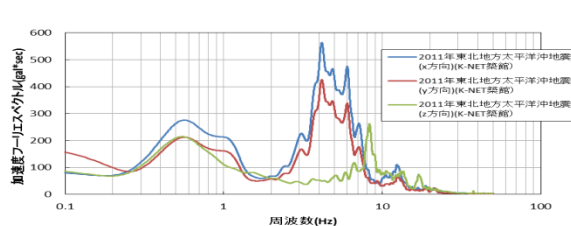


図-10 加速度フーリエスペクトル(K-NET築館)

3. 書架の地震時挙動の検証

(1) 自由振動実験による振動特製の把握

書架に短辺方向（以降 x 方向），長辺方向（以降 y 方向）それぞれに対して変位を与えることにより，自由振動を計測する．自由振動を計測することにより，書架の固有振動数および減衰定数を求めることが目的である．

固有振動数は書架の天板上部に設置された加速度計A，Bで測定された加速度データを，フーリエ変換することで算出する．その結果x方向の固有振動数は2.0Hzと3.5Hz付近で卓越しており，y方向では2.3Hz付近で卓越していることがわかる．x方向で卓越点が二つ見られた要因としてねじれによる影響があると考えられる．

減衰定数は自由振動実験の加速度計測結果より，対数減衰法を用いて算出した．減衰定数の算出式は(1a)のとおりである．

$$h = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{y_m}{y_{m+1}} \right| \quad (1a)$$

h は減衰定数， y_m は減衰振動の m 番目の極値を表す．

減衰定数を算出した結果，x方向は0.11，y方向は0.06であった．ここで図-11，図-12にx方向，y方向のフーリエスペクトルを，表-13に算出した減衰定数を示す．

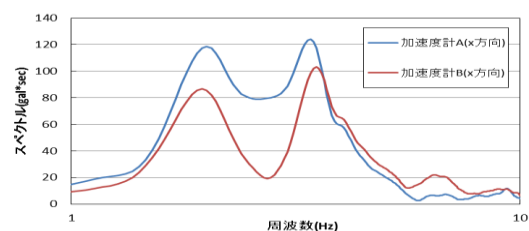


図-11 固有周波数(x方向)

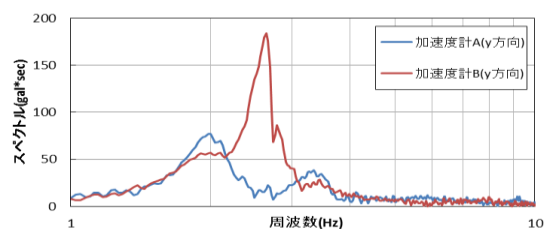


図-12 固有周波数(y方向)

表-13 減衰定数

	減衰定数(m ⁻¹)			
	Ax	Bx	Ay	By
h_{ab}	0.199	0.112	0.052	0.093
h_{bc}	0.070	0.059	0.034	0.028
h_{cd}	0.065	0.143	0.071	0.000
h_{de}			0.132	0.076
平均値			0.072	0.040
AB平均値	0.108		0.056	

(2) 各地震動における書架の挙動の分析

a) 各地震動における書架の落下挙動と応答倍率

各地震波による加振の結果、K-NET築館波とJMA神戸波において書架の落下が見られた。ここで書架の1~3段目を下段部分、4~7段目を上段部分と便宜上定義する。また、写真-2に示すように手前側を表、奥手側を裏とし、また各面を中心で分けて、表側の左をA、右をB、裏面の左をC、右をDとする。

加振の結果両波ともに強震中に書架が落下したが、K-NET築館では書架の落下は最上段と下段で見られたが、最上段下段のほうで落下率は大きかった。一方、JMA神戸では上段での落下率が高く、4段目より下での書架の落下はほとんど見られなかった。

各地震波において各段の最大加速度、および書籍の落下率を表-14、表-15に、書架の各段の応答倍率を図-17、図-18にそれぞれ示す。ここでは、各段で測定したx方向水平成分の加速度を振動台上で測定したx方向水平成分の加速度で除したものを応答倍率として定義する。図に示すようにJMA神戸、K-NET柏崎では、4段目で2倍程度、最上段の7段目では3.5倍の応答倍率を示した。書架の上段に行くにつれて応答倍率が大きくなったため、1次モードが卓越する挙動を示したと考えられる。K-NET築館については、2~3段目では応答倍率がほぼ1倍であり、4~5段目にかけて約0.5倍と1倍を切り、6~7段目では約0.7倍を示したように、全体として1倍より低い応答倍率を示した。また中段で最も応答倍率が小さくなっていることから、書架全体の固有振動数より高めの振動が入力されたことによる2次モードが卓越するような振動となったか、下段部分が剛性低下したことによる非線形の挙動をしたために応答倍率が減少したと考えられる。

書籍配架時の書架の固有周波数が2Hzと3.5Hz（x方向）であるのに対し、今回入力した神戸波の卓越周波数2.7Hz、栗原が4Hzであったため、加速度が大きくなるとこのような挙動をするのではないかと考えられる。

しかしながら、これは書架全体での挙動から見たため、各段の応答の違いには、各段の書籍に働く力の影響もあると考えられる。

表-14 最大加速度及び書籍の落下率(%) JMA神戸

計測場所	最大加速度(gal)	落下率(%)			
		A	B	C	D
7段目	1798.351	97.2	62.0	100.0	100.0
6段目	1492.477	82.6	33.5	75.9	83.9
5段目	1181.910	20.1	18.4	0.0	80.8
4段目	943.019	0.0	0.0	0.0	48.4
3段目	685.464	0.0	0.0	0.0	0.0
2段目	647.652	0.0	0.0	0.0	0.0
振動台,1段目	487.351	0.0	0.0	0.0	0.0

表-15 最大加速度及び書籍の落下率(%) K-NET築館

計測場所	最大加速度(gal)	落下率(%)			
		A	B	C	D
7段目	1182.062	44.4	80.1	47.4	63.8
6段目	899.083	0.0	18.0	0.0	0.0
5段目	620.503	0.0	0.0	0.0	0.0
4段目	730.377	0.0	0.0	0.0	0.0
3段目	921.093	29.1	0.0	51.6	0.0
2段目	1056.696	0.0	1.4	71.9	100.0
振動台,1段目	1250.162	0.0	55.6	100.0	100.0

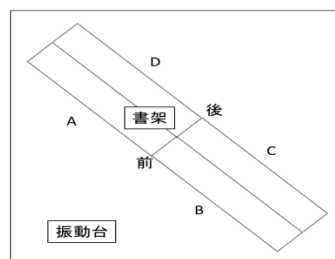


図-16 書籍の配架場所

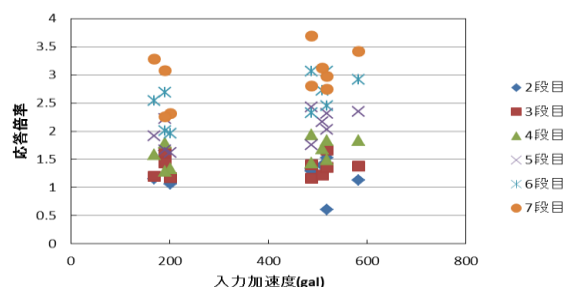


図-17 応答倍率(JMA神戸, K-NET柏崎)

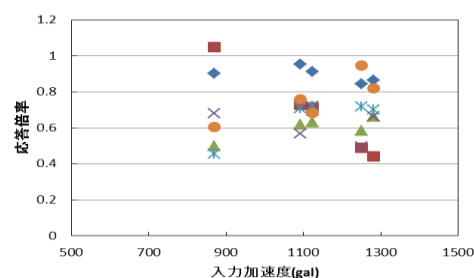


図-18 応答倍率(K-NET築館)

b) 各段の振動特性と書籍落下への影響

書籍の落下率で示したように、神戸、柏崎、栗原で書架の落下挙動が違った。その要因として、入力した地震動の加速度、卓越振動数の違いが挙げられるが、書架の各段での振動特性も無視はできない。

ここでは、加速度応答から振動台の入力に対する伝達関数を求め、各部材の振動数領域における結果の比較を行う。なお本論文では100%振幅レベルの結果に関して考察を行う。今回は上下方向の増幅率が1前後であったため、書籍の落下にもっとも影響があると考えられる短辺、つまりx方向についておもに検討を行う。

神戸は1.8Hzあたりと3Hzあたりで増幅が卓越した。柏崎でも神戸と近く1.8Hzあたりと3Hzあたりで増幅が卓越した。栗原では1.8Hzあたりで増幅が大きかったが、書架の固有振動数である3.0Hzでの増幅は見られなかった。また、神戸と柏崎では上段に行くにつれて増幅率が大きくなっているのに対し、栗原では3.5Hzを境に上段と下段の増幅率の大小が逆転し、またすべてが1倍を下回った。図-19、図-20、図-21に各段の増幅率を示す。

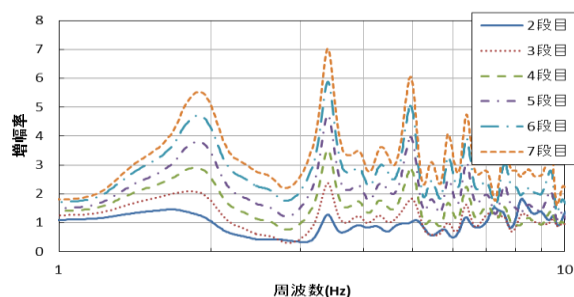


図-19 周波数による各段の増幅率の変化(JMA神戸)

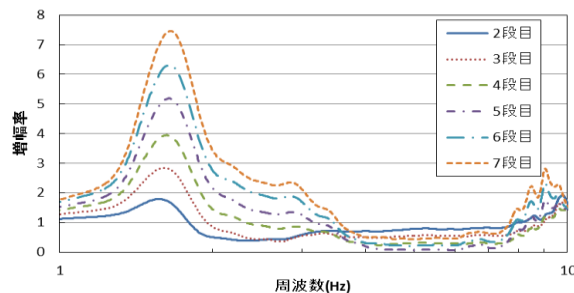


図-20 周波数による各段の増幅率の変化(K-NET築館)

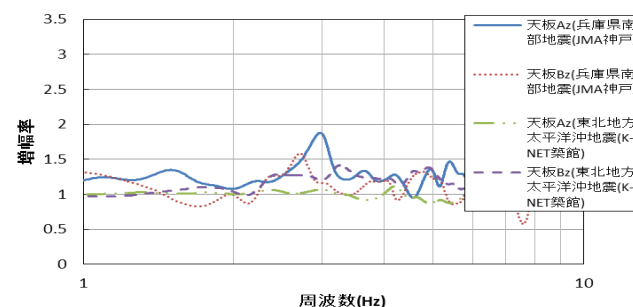


図-21 周波数による増幅率の変化(z方向(上下))

次に、書籍の落下前、落下中、落下後に振動特性がどう変わったのか、またどういった振動特性が書籍の落下に影響を与えたのかを検討するために、図のように強震前、強震中、強震後と3分割し、それぞれの伝達関数を求め地震波の種類と書籍の落下による影響を調べる。これは書籍の落下が強震中に今回は書籍の落下が見られた神戸と栗原を対象に、神戸の各段のそれぞれの伝達関数を図-22に、栗原の各段のそれぞれの伝達関数を図-23に示す。

神戸では、2段目においては、4段目と7段目においては、強震前は2Hzあたりが卓越点であったが、強震による本の落下によって強震中、強震後は卓越点が3-5Hzあたりに推移している。神戸では、強震前までは書籍はほとんど動いておらず、強震とともに書籍が大きく動き落下したためと考えられる。

栗原では、2段目は強震中、強震後において固有振動数の変化が少ない。4段目は2回目の強震で書架の固有振動数である3.5Hzの増幅率が大きく減少している。そして7段目では3.5Hzの増幅率が1倍近くに帰っている。実

際加振中において、一度目の強震直前では、4, 5, 6段目の書籍はほとんど動いていないのに対し、1, 2段目の書籍が小刻みに揺れていたことから、栗原では、大きな

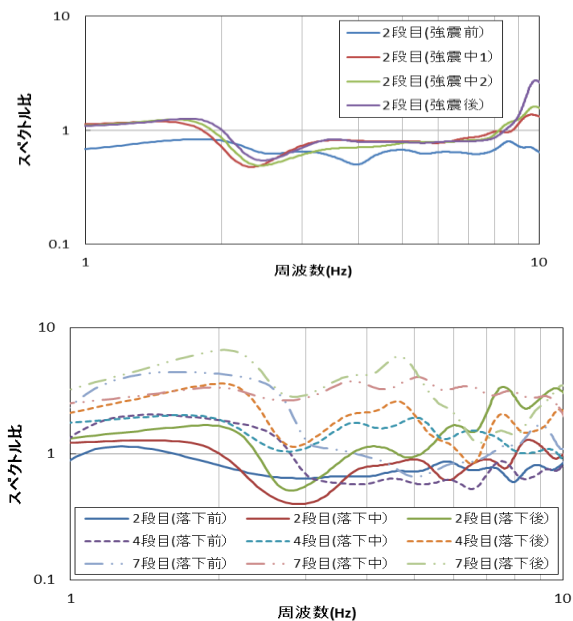


図-22 強震前、中、後に分けた各段のスペクトルの増幅率(JMA神戸)

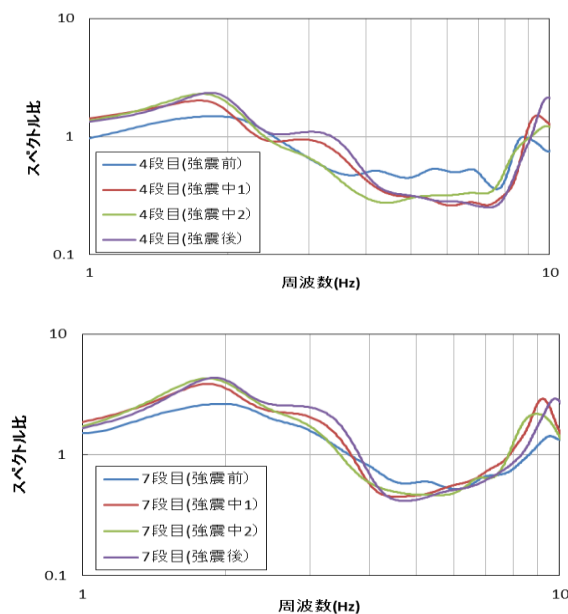


図-23 強震前、中、後に分けた各段のスペクトルの増幅率(K-NET築館)

加速度的影響を受けて1, 2段目の書籍が落下したが、その落下が免振装置のような働きをし、上段への加速度の伝達を減衰させたために、4, 5, 6段目の書架の落下を防ぎ、そして入力地震動と同等の応答を取り戻した7段目において再び書籍の落下が見られたのではないかと考えられる。

4. おわりに

近年の日本国内で発生した地震では、「家具の転倒」や「落下物」による負傷が、負傷原因のほぼ半分を占めている。また年代別では、若者と高齢者における「家具の転倒」や「落下物」による被害が顕著となっている。

様々な年代の人が利用する、代表的な公共施設の1つである図書館の書架や書籍の地震時の挙動を把握することは、地震時の迅速な避難を図ることや、書架の転倒や書籍の落下に伴う人的被害を軽減するためにも重要なことである。本研究では書架の転倒防止や、書籍の落下防止のため、書架の地震時挙動、及び書籍の落下の影響を定量的に分析することを目的として行った。その結果、以下のような結果が得られた。

実物書架を用いた振動台実験では、兵庫県南部地震(JMA 神戸)、新潟県中越沖地震(K-NET 柏崎)、東北地方太平洋沖地震(栗原 K-NET 築館)の3波を入力地震動として用いた結果、JMA 神戸では線形の挙動を示し、上段での書籍の落下が多かった。これは、JMA 神戸の卓越振動数が書架の固有周期に近かったこと、強震直前まで書籍が動かなかず書籍の挙動による減衰がなかったことが考えられる。また柏崎は、周波数の増幅率のパターンが JMA 神戸と似ていたにも関わらず書籍の落下が見られなかったのは、卓越周波数が、書架の固有周波数と大きくずれていたこと、そして今回入力した地震動の加速度が小さくなってしまったことが要因と考えられる。栗原(K-NET 築館)では、非線形の挙動を示した。

以上のことから、ある程度の振動数までは、書架の固有周波数に近い卓越周期をもつ地震動に対して線形挙動を示し、上段の応答が大きくなり上段での書籍の落下が多くなり、高い振動数を持つ地震波では、1 段目から影響を受けるが、1 段目の書籍の振動がが減衰装置の働き

をしてある程度上段の振動の増幅を抑えることによって非線形挙動を示すと考えられることが分かった。

しかしながら、本研究では上記の3つの地震動を対象にしているため、これらの地震動以外の特徴を持った地震動、そして建物による減衰等を考えるとまた違った挙動を示すことも考えられる。また今回は、書架は下部を固定しただけのものであり、別の固定方法、また書籍の配架率や配架方法の違い等、まだまだ考慮すべき点があり、たくさんあり今回はほんの一部の検証にとどまったため、今後、様々なパターンでの検証をする必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、実験の供試体を提供して頂いたキハラ株式会社から感謝いたします。また、実験を行うにあたり、ご協力いただいたキハラ株式会社の方々及び金沢工業大学の後藤氏及び学生諸氏、そして本研究室の学生諸氏にも感謝いたします。なお、実験にて利用した強震記録はK-NET、及びJMAの強震記録を利用させて頂きました。ここに記して感謝の念を申し上げます。

参考文献

- 1) 目黒公郎・西川大介：3次元個別要素法による地震時の家具の動的挙動解析、土木学会第53回年次学術講演会公演概要集、第I-B部、pp.496-497.
- 2) 榎本美咲・目黒公郎：三次元拡張個別要素法を用いた地震時の家具の動的挙動シミュレーション、土木学会第57回年次学術講演会講演概要集、土木学会、第I部門、I-747、pp.1493-1494、2002.9、E
- 3) 原優・後藤正美：書架の耐震性能に関する研究、平成24年度金沢工業大学学士学位論文、2012
- 4) 柳瀬寛夫：地震による書架の転倒及び資料落下防止策について、国会図書館第23回保存フォーラム「地震に対する図書館の備え-良かったこと、分かったこと」、2012、12、20

SEISMIC ESTIMATION OF BOOKSHELF AND THE FALL MECHANISM OF BOOKS

Akira MURATA, Hirokazu TANAKA, Yu HARA, Masao KIHARA, Masami GOTO
and Masakatu MIYAJIMA

An injury according to "a fall of furniture", and a "falling object" at the earthquake which occurred in Japan in recent years -- the cause of an injury -- the half is occupied mostly.

It is important to grasp the action in case of the bookshelf of the library which is one of the typical public facilities which the person of various ages uses, or the earthquake of books, also in order to reduce the personal suffering accompanying aiming at quick refuge in case of an earthquake, the fall of a bookshelf, or fall of books.

However, there are little the research and the knowledge about quantitative evaluation which become the origin of the prevention from a fall of a bookshelf and the measure against fall of books.

Then, by the shaking table test, the earthquake performance of a bookshelf and the fall action of books were verified, and the bookshelf fall mechanism in case of an earthquake was quantified. As a result, it turned out that the influence of the oscillation characteristic of each stage is great at fall of books.