高層建築物での順次避難における階段室内の流動状況と滞留発生に関する研究

－全館避難訓練時の行動実態観測に基づく分析と考察－

STUDY ON FLOW AND CONGESTION IN STAIRCASES DURING PHASED EVACUATION
IN A HIGH-RISE BUILDING

－ Analysis based on the observational data of a real total evacuation drill －

門倉博之*, 関澤 愛**, 佐野友紀***, 藤井皓介****

*Hiroyuki KADOKURA, Ai SEKIZAWA, Tomonori SANO
and Kosuke FUJII*

If a fire or other serious emergency occurs in a high-rise building, all occupants would be forced to evacuate the building under such an extreme event. Also, it is quite probable that many occupants in the building start to evacuate at the same time on this occasion. Further, the staircase would become very congested, if all occupants try to evacuate via a limited number of staircases concurrently. In such a case, it may cause considerable delay of the evacuation time or influence on walking speed of evacuees. To cope with this kind of simultaneous total evacuation, there is a method known as “phased evacuation”, where occupants on a fire origin floor and the floor above will evacuate first and followed by other occupants in different floors to avoid congestion in the staircase. However, it is unclear how the phased evacuation is more efficient than simultaneous total evacuation, because there have been limited studies and data concerning this method of evacuation. To explore the potential availability of phased evacuation, this study analyzes the data obtained by video recording and measuring movement of evacuees during a total evacuation drill conducted in a high-rise office building in Tokyo.

Keywords: *phased evacuation, total evacuation drill, observational data, stairs, congestion*

順次避難, 全館避難訓練, 実測データ, 階段室, 滞留

1. はじめに

2001年に米国ニューヨーク市で発生した世界貿易センタービルの倒壊テロ事件でもみられたように、高層建築物において大規模な火災や非常事態が発生したときに、在館者が全館避難を強いられる場合のあることが現実となっている。全館避難の場合、一斉避難では階段内の混雑が予想されるために、一般的には火災発生階及びその直上階が優先的に避難し、他の階はそのあと避難する順次避難が考えられている。順次避難計画については、①階段室内では上階からと階避難者との合流などによる混雑を避ける、②避難時間全体をできるだけ最小化することが重要となる。しかしながら、火災発生階との関係で、どのような順次避難計画が、火災安全上、また避難完了時間上、最も効率的であるのかの検証については、実際の順次避難の実測データが少ないため、十分に実施されてこなかったのが現状である。

筆者らは、東京都内のある25階建て高層事務所ビルにおいて実施された順次避難による全館避難訓練について、過去6回（2007年、2008年、2010年、2011年、2012年、2013年実施）の実測調査¹⁾²⁾³⁾を

行い、各避難訓練について階段室にビデオカメラを設置して階段室内の避難訓練参加者の流動状況の観測を行なった。また、各階に実験班のメンバーを配置し、群集と一緒に行動することによって、階段室内における避難集団の移動歩行についての実測調査を行い、流動分析を行ってきた。

既往関連研究では、順次避難に関するものとして、J. L. Paulsによる一斉避難と順次避難の概念についての報告⁴⁾⁵⁾があるが、順次避難に関する実測結果は見られない。また、階段室内の滞留に関するものとして、北後ら⁶⁾、あるいは佐野ら⁷⁾の先行研究例がある。これらの研究では、1層の階段室において、2群集の合流を実験的にを行い、踊り場における合流比、群集密度と歩行速度の関係式を算出しているが、複層数の階における合流の影響や階段1層全体について分析したものではない。

筆者らの調査は、25階建て事務所ビルにおける25層全層にわたって毎回1,000名以上の参加によって行われる全館の順次避難訓練を実測したものであり、この観測結果は複数層にわたる実際に近い階段室内の流動状況を知る上で非常に貴重なデータである。

* (株)東急総合研究所 修士(国際情報通信学)

** 東京理科大学大学院国際防災科学研究科 教授・工博

*** 早稲田大学人間科学学術院 教授・博士(工学)

**** 早稲田大学大学院人間科学研究科
博士後期課程・修士(人間科学)

Tokyu Research Institute, Inc., M. of Sciences in GITS.

Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Prof., Waseda University, Dr. Eng.

Waseda University, M.A. in Human Sciences

本研究は、多人数が参加する全館避難訓練において、最も参加者の多かった2012年の実測調査について、訓練参加者の階段室内の流動状況および降下軌跡を把握するとともに、階段室内で生じる滞留発生要因について考察を行ったものである。

2. 高層建築物の避難訓練調査の概要

2.1 避難訓練の概要

対象建物は、地上25階建ての高層建築物であり、主に事務所を用途とする。避難訓練は、4階の厨房を出火階とした全館避難である。避難方法は、順次避難とし、

- ・Ⅰフェーズ：出火階とその上階「4・5・6階」
- ・Ⅱフェーズ：火災階に近い上階と最上層階「7～12、21～25階」
- ・Ⅲフェーズ：火災階から遠い上層階「3、13～20階」

のフェーズ毎に、防災センターの館内放送による避難開始の指示に従い行われた(図1)。避難放送は、実施年毎に避難開始時刻と放送文を改善しながら実施している。避難経路は、各階より南北の階段2系統を使用し、1階屋外の建物前広場までとしている。本調査では、南側の階段のみを観測対象とした。

図1 順次避難計画における避難開始フェーズ

注) 図中の破線は避難開始階と避難放送時間の範囲を表す。

2.2 訓練の観測方法

対象建物(25階建て)の階高は、1階から6階までが4.1m(うち2～3階4.4m)、7階以上が3.8mである。階段は、階段幅1.2mの折り返し階段である。また、扉幅は、各階1mである(表1、図2)。なお、図2に示す階段室の各エリアについて、階踊り場(階の床部にある扉のある踊り場のこと)、階段部(段床部のこと)、中間踊り場(階の間にある扉のない踊り場のこと)と呼ぶものとする。

階段室内の訓練参加者の流動状況を記録するために、階踊り場へ1階から24階までビデオカメラを各1台(合計24台)設置して撮影を行った。各ビデオカメラは、時刻を標準時間に秒単位で合わせており、全映像の同期が取れるようにした。分析にあたっては、ビデオ映像の時刻をもとに時系列の流動状況を把握した。

また、避難集団の歩行移動を把握するため、被験者に集団の移動に対するトレーサーの役割を与え、避難集団とともに一緒に行動させた。筆者ら実験班から参加した被験者は、大学生20名(男性12名、女性8名)である。これらの被験者を6階から24階に各1名(うち22階のみ2名)配置し、各自ストップウォッチにより各階の階踊り場位置間の歩行時間を測定した。避難開始に際しては、被験者は階段室の附室にて待機し、各階の避難放送に従い階段室の附室に到

着した避難集団の中または最後尾にて避難を開始するものとした。歩行時間の測定については、まず附室から階踊り場の床に片足が着地したときを避難開始時刻とし、一つ下の階踊り場に着地するまでの時間を避難開始階の歩行時刻とした。以降、一層下の階踊り場に着地するまでを階踊り場位置間の歩行時刻とし、1階のみ階段室出口通過後に着地するまでとした。

3. 訓練観測の結果

3.1 各階の訓練参加者数

当日の建物在館者は5,516人である(通常約6,000名)。このうち、避難訓練参加者は、高層ビル内の従業員2,088名であり、観測対象とする南側階段を使用した避難者(年齢20～50代、男女比7:3)は、1,137人(被験者20名を含む)であった。各階からの避難訓練参加者のうち、11階(148名)、13階(122名)、14階(106名)が他の階に比べ避難者が特に多かった(表2)。

表1 階段寸法

階	1～2階	2～3階	3～7階	7～25階
階高	4.1 m	4.4 m	4.1 m	3.8 m
踏面	280 mm			
蹴上	171 mm	170 mm	171 mm	173 mm
階段幅	1.2 m

図2 階段室の寸法 (mm)

表2 各階の訓練参加者数

フェーズ	階数	訓練参加者数 (人)
Ⅱ	25	4
	24	73
	23	46
	22	63
	21	32
Ⅲ	20	38
	19	4
	18	29
	17	47
	16	26
	15	25
	14	106
	13	122
Ⅰ	12	70
	11	148
	10	97
	9	26
	8	1
	7	5
Ⅲ	6	75
	5	29
	4	45
Ⅲ	3	22
	2	4
総数		1,137

3.2 被験者の階段室内の歩行速度

階段降下にかかる歩行時間の実測結果にもとづいて、被験者の各階の階踊り場間の歩行速度を算出した。図3は、避難訓練時において各階から避難を開始する被験者の歩行速度を表す。なお、歩行距離は、階踊り場および中間踊り場では中央をコの字に結んだ距離とし、段部では段鼻を斜めに結んだ斜め距離とした。

避難訓練時の群集内における被験者の歩行速度は、平均 0.56m/秒（標準偏差（SD）=0.16）であった。これは、訓練に先立って行った単独自由歩行による平均歩行速度 0.96m/秒（SD=0.10）に比べ約 4 割遅く、群衆内での歩行による影響が大きく見られる。また、フェーズ毎の歩行速度については、I フェーズ被験者の歩行速度が平均 0.78m/秒（SD=0.00）、II フェーズ被験者の歩行速度が平均 0.66m/秒（SD=0.13）、III フェーズ被験者の歩行速度が平均 0.40m/秒（SD=0.02）となっている。そのうち、II フェーズ上層階（21～24 階）被験者の歩行速度が平均 0.57m/秒（SD=0.04）、II フェーズ下層階（7～12 階）被験者の歩行速度が平均 0.73m/秒（SD=0.13）となっており、特に II フェーズ上層階の被験者は 12～13 階で平均 0.22m/秒（SD=0.03）と低いが、これは後述するように下の階で発生した合流の影響により III フェーズの被験者の歩行速度が 14～18 階で平均 0.12m/秒（SD=0.05）まで低下していることが影響したものである。

3.3 1 階階段室出口の流動係数

1 階の階段室出口における時刻毎の流動係数を図4に示す。図4は、1 階階段室出口のビデオ映像から、扉通過人数を 1 秒ごとに目視でカウントし、15 秒ごとに集計した流動係数を時系列に表した。なお、1 階階段室から屋外へ出る部分や建物前広場においては、混雑などにより避難者の移動が停止する様な状況は見られず円滑であり、階段室内の流動に影響のない状態であった。1 階階段室出口での流動係数は、最大 1.27 人/m/秒となっている。また、15 時 22 分 15 秒以降大きな流動低下はなく、15 時 22 分 15 秒から 15 時 37 分 45 秒までの流動量を定常（一定）と見なすと、平均 0.88 人/m/秒（SD=0.17）となっている。これは、実際の避難訓練時の一般的な流動係数を示すものと考えられる。

3.4 階段室内の流動係数

階段室内の流動状況を把握するため、避難者の多い階の代表として 11 階、13 階の流動係数を算出した。流動係数の測定位置は、図5に示す階踊り場における 3 つの断面（上階からの流入断面 A、附室からの流入断面 B、下階への流出断面 C）とし、以下 A、B、C 断面と呼ぶものとする。なお、流動係数の算出にあたっては、各階の階踊り場のビデオ映像から、各断面の通過人数を 1 秒ごとに目視でカウントした。

3.4.1 合流時の流動係数

合流時の状況を把握するため、図5の上階からの流入断面 A と附室からの流入断面 B の流動係数を算出した。11 階の階踊り場について、15 秒ごとに集計した流動係数を時系列で表したものを図6に示す。11 階の階踊り場では、A および B 断面からの避難者が II フェーズ避難開始直後から 278 秒間合流（図6中の 15 時 16 分 30 秒から 15 時 21 分 8 秒）し、A 断面からは流動係数が平均 0.31 人/m/秒（SD=0.14）、B 断面からは流動係数が平均 0.45 人/m/秒（SD=0.23）の流入であった。合流解消後の 15 時 21 分以降、A 断面の流動係数は平均 0.71 人/m/秒（SD=0.24）と約 2 倍まで増加しており、流動係

図3 避難訓練時における各階からの被験者の歩行速度

図4 1 階階段室出口の流動係数

図5 階段室内の流動係数測定位置（階踊り場）

図6 合流時の流動係数（11 階）

数が0.9～1.0人/㎡程度まで増加すると再び減少するように、その後増減を繰り返している。合流時間帯においては、上層階からの歩行者は内側に2列から1列、附室から階段室内への歩行者は外側に1列になり合流している。

3.4.2 複数階にわたる流動係数

複数階にわたる流動状況を把握するため、ここでは13階から15階における図5に示す下階への流出断面Cの流動係数を算出した。13階から15階までの階踊り場について、15秒ごとに集計した流動係数を時系列で表したものを図7に示す。13階の合流時間帯（図7中の15時21分25秒から15時25分3秒）では、複数階にわたる流動係数の変化が見られた。12階の合流は生じておらず、13階の階踊り場から12階への流動係数は平均0.76人/㎡（SD=0.17）となっている。その時、14階の階踊り場から13階への流動係数は平均0.38人/㎡（SD=0.17）と半減している。また、14階においても合流が生じており、15階の階踊り場から14階への流動係数は平均0.19人/㎡（SD=0.14）と更に半減している。このように合流が生じた階の上階では流動係数が半減しており、合流が流動を阻害する要因となっているとともに、その影響（約1/2）は上階になるほど累乗的に及んでいる。

3.5 階段室内の密度と流動状況

3.5.1 階踊り場の密度

階段室内の混雑状況を把握するため、図8に11階、図9に13階の階踊り場の時刻毎の密度を示す。ここでは、1秒ごとのA断面とB断面における通過人数の累積量からC断面における通過人数の累積量の差をとることにより、階踊り場内の人数を算出し、図2(b)に示す階踊り場の面積を用いて密度を算出した。11階の密度は、合流が生じている間に平均2.49人/㎡（SD=0.53）、最大3.57人/㎡（階踊り場内に19人）となっている（図8）。合流解消後には平均1.44人/㎡（SD=0.47）まで減少しているが、C断面の流動係数が低下した場合に密度が高くなるのがわかる。同様に13階の密度は、合流が生じている間に平均2.36人/㎡（SD=0.42）、最大3.38人/㎡（階踊り場内に18人）となっている（図9）。合流解消後には平均1.51人/㎡（SD=0.61）まで減少している。なお、図8、図9に一時的なピーク値が見られるが、この影響については4.2節で述べる。

3.5.2 階段室1層内の人数

階段室1層分の混雑状況を把握するため、図10に11階、図11に13階の時刻毎の階段室1層内と階踊り場の人数をそれぞれ示す。なお、階段室1層内の人数の算出については、1秒ごとの上階C断面の通過人数の累積量から、当該C断面の通過人数の累積量の差をとることにより、階段室1層内の人数を算出した。階踊り場内の人数については、3.5.1項の算出によるものとした。また、階段部と中間踊り場の人数は、階段室1層内の人数と階踊り場の人数の差によるものとした。11階階段室の階踊り場人数は最大19人、11～12階の階段部と中間踊り場人数は最大31人、階段室1層内の人数は最大44人となっている（図10）。階踊り場の最大人数（19人）と階段部と中間踊り場の最大人数（31人）を合わせると50人であるが、実際の階段室1層内の最大人数は44人となっている。これは、階段室内容量の制約のもと、階踊り場や階段部がそれぞれ同時に個々の最大値とはならないことによるものである。同様に13階階段室の階踊り場人数は最大18人、13～14階の階段部と中間踊り場人

数は最大35人、階段室1層内の人数は最大48人となっている（図11）。

図7 複数階にわたる流動係数（13～15階）

図8 階踊り場の密度（11階）

図9 階踊り場の密度（13階）

図10 階段室1層内の人数（11階）

3.5.3 階段室1層内の密度と流動係数

階段室内の滞留状況を把握するため、下階の合流の影響が比較的小なく、流動時間の長い11階階段室1層内の密度と流動係数の関係を調べた。図12は、1秒ごとの階段室1層内の密度とC断面の流動係数の同時刻値（階段室1層内への流入が見られる15時16分1秒から15時34分46秒）をプロットしたものである。ここでの密度は、図2(b)に示す階段室1層の水平投影面積により算出した。また、流動係数の測定位置は、図5における階踊り場から下階への流出断面Cとし、15秒間の移動平均値とした。

一般に、密度が増加するにつれて流動量は増加するが、一定の密度になると流動量が限界に達し、流動量が低下することが知られている⁸⁾。そこで、既往研究であるJ. L. Pauls⁵⁾による階段室内における一斉避難時の式($N = 1.26\rho - 0.33\rho^2$)を参考にし、原点を通過する二次曲線で近似を試みた。 N : 流動係数(人/㎡秒)、 ρ : 階段室1層内の密度(人/㎡)とした場合における11階階段室1層内の密度と流動係数の関係を式(1)に表し、図12に実線で示す。決定係数は $R^2=0.61$ である。

$$N = 1.26\rho - 0.48\rho^2 \quad (1)$$

(1)式によると、階段室1層内の密度が1.31人/㎡(22.33人)の時、流動係数は0.83人/㎡秒と最大値を示している。また、図12からも、この密度を境にして流動係数が減少しており、概ね密度が2.24人/㎡(38人)となると流動量が無くなり、滞留していることがわかる。その後、密度は2.60人/㎡(44人)まで増加している。これは、実際の避難訓練時の一般的な密度の上限を示すと考えられる。なお、この値は図8の階踊り場のみの密度に比べ低い値を示しているが、これは階段室全体では階段部の密度を含むためである。

4. 順次避難における階段室内の滞留発生状況

本避難訓練では、予め計画した順次避難計画に従い、避難放送を実施している。そのため、IIフェーズ上層階からの避難者と、IIIフェーズの避難開始者との合流は概ね避けることができたが、IIフェーズ上層階の最後尾の避難者で部分的には生じる結果となった。

図13は、各階から避難を開始した訓練参加者(被験者20名と従業員3名(24階、22階、12階の最後尾))が各階を降下した軌跡を時系列で表したものである。図中の破線は、避難開始階と避難放送時間の範囲を表す。被験者の各階階踊り場(A断面)通過時刻は、ビデオ映像から被験者が階踊り場に着地した時刻を確認し、これにストップウォッチにより測定した各階の所要時間を加え求めた。また、合流の状況を確認するため、階避難者の最後尾が判らない一部の階(24階、22階、12階)については、ビデオ映像から最後尾の従業員の通過時刻を求め、図中に加えた。

訓練参加者のうち、22階から先頭集団の後について避難開始した者(図13中の22階避難者①)については、13・14階避難者の避難開始前に13～14階を通過しているため、合流の影響がなかったが、同階からの避難者の最後尾に付いて避難開始した者(図13中の22階避難者②)は、13・14階避難開始後の避難となったことから、13階から15階付近の合流の影響を受けていることがわかる。また、図14は、IIIフェーズ避難開始後(15時23分00秒)の各階の階踊り場の様子を示す映像であるが、13階から上層階で滞留が生じていることが確認できる。

図11 階段室1層内の人数(13階)

図12 11階階段室1層内の密度と流動係数の関係

図13 訓練参加者による各階の通過時刻

図14 各階の階踊り場の混雑状況(15時23分00秒)

以上の訓練観測結果より、合流時と合流解消後の流動量の減少と密度上昇（図6、図8、図9）、合流時の複数階にわたる流動量の減少の伝播（図7）、流動量と密度の関係（図12）を確認していることから、今回の避難訓練では次の2種類の滞留が生じていると考えられる。4.1節から4.3節においてその滞留要因の考察を行なう。

①合流を原因とする滞留

避難者の多い階（11、13、14階）について、階段室内への流入者と上階避難者の合流から滞留が生じ、この滞留を上層階に向かって伝播していく傾向が見られた。

②階段室内の高密状態を原因とする滞留

合流を原因とするものだけでなく、階段室内の高密状態から生じた一時停止が上層階に向かって滞留状態として伝播していく現象が生じている。

4.1 合流を原因とする滞留

図15は、図13の訓練参加者の各階の通過時刻図をもとに、避難者の合流による滞留状況を時系列に表したものである。滞留については、各階の階踊り場のビデオ映像より、断続的な停止状態が発生・解消した時刻をもとに算出した。なお、図中の右上がりの斜め太線は、降下歩行速度が低下し、滞留が生じた状況が上階に伝播する様子を表している。

階段室内の階踊り場内への流入者と上階避難者との合流が生じた階は、先に述べたように上階からの避難者の流動量が累乗的に減少（約1/2）し、これに起因する滞留状況が上層階に向かって伝播していることがわかる。階段室内の合流は、Ⅱフェーズ内11階と上階（12階から15階まで伝播）、Ⅲフェーズ内の3階と上階（4階から8階まで伝播）および13階、14階の上階（15階から18階まで伝播）で生じている。階踊り場内で連続停止した最大滞留時間は、14階約27秒、15階約45秒、16階約65秒、17階約125秒間、18階約127秒間と上階にいくにしたがって順に大きくなっている。

4.2 階段室内の高密状態を原因とする滞留

階段室内では、上記の合流を原因とするものだけでなく、下階の高密状態が伝播することにより滞留する状況が見られた。合流解消後、流動量の増加に伴い一定の密度となったが、下階の高密状態が伝播し、歩行速度が低下し停止状態となることで階段室内の密度が一時的に増加した。これは、図8、図9に示すように流動量が低下した際に、階段室内の密度の断続的な変化がノコギリ歯状のピーク値としてあらわれ、滞留が生じていたことが確認できる。その滞留は、上層階に向かって伝播し、階段室内での滞留を生じている。図16は、図15同様に図13をもとに、高密状態を原因とする滞留状況を時系列に表したものである。滞留は10回程起こっており、平均8階層（最大2階から16階までの15階層）、上階に伝播している。これらの滞留は、平均15.2秒間隔で上階に伝播している。また、各階では、短時間であるが滞留から平均12.2秒後、停止状態が解消している。

4.3 滞留発生要因に関する考察

合流を原因とする滞留については、訓練参加者が多い複数階（11、13、14階に100人以上の訓練参加者が集中）で生じている。階踊り場では、上階からの避難者は内側に2列から1列、階段室内への避難者は外側に1列になり合流している。そのため、合流が生じた階の上階では流動係数が半減しており、上階に従って流動量が累乗的

に減少（約1/2）し、滞留が生じている。上階は下階の移動後に移動するため、上階に従って滞留が長く生じており、最大滞留時間は18階で約2分間生じている。

一方、高密状態を原因とする滞留については、合流終了後にこの滞留が伝播する現象が見られ、流動量と階段室内の人数が上昇した。これは、安全性を保つため、避難者間の距離をあけながら避難するために起こっていると考えられる。その結果、1層あたりの階段室内の密度が2.24人/㎡（38人）以上になると、短時間ではあるが、階踊り場で平均12.2秒の滞留が生じている。

図15 合流を原因とする滞留

図16 高密状態を原因とする滞留

5. まとめ

本研究では、都内の25階建て高層建築物で実施された多人数が参加する全館避難訓練における訓練参加者の行動を観測した結果をもとに、階段室内の流動状況や階段室内で生じる滞留発生状況の分析とその要因に関する考察を行なった。以下に、その結果を要約する。

（1）密度と流動係数の関係

11階の階段室1層内の密度 ρ （人/㎡）と流動係数 N （人/㎡/秒）の関係として、 $N=1.26\rho-0.48\rho^2$ となる近似式（1）が得られた。流動係数が最大値となる密度1.31人/㎡を境にして流動量が減少しており、密度が2.24人/㎡（38人）となると滞留が発生していることがわかった。

（2）階段室内の滞留発生とその要因

今回の避難訓練観測結果から、次の2種類の滞留の発生が確認された。1つは、合流を原因とする滞留であり、複数階から100人以

上の避難者が合流した場合、合流が生じた階の上階での流動量の減少（約 1/2）が累乗的に上階に伝播することを要因として発生するものである。もう 1 つは、階段室内の高密状態を原因とする滞留であり、多層にわたり階段室 1 層内の密度が概ね 2.24 人/m²（38 人）以上になると発生し、やはりこの滞留も上層階に向かって伝播している。なお、合流を原因とする滞留の場合には停止時間が長く（約 2 分間）、一方、高密度状態を原因とする滞留では停止状態は短時間（平均 12.2 秒間）で解消していた。

最後に、本研究は、都内の高層建築物において 2012 年に実施された避難訓練の観測結果に基づきまとめたものである。順次避難を含む全館避難計画の確立に向けては、避難者対象者数、出火階の位置、順次避難の枠組みなど、種々の条件の変化に応じた詳細な検討が必要である。したがって、今後も引き続き、順次避難計画を用いた避難実訓練の調査を行い、安全かつ効率の良い順次避難計画の構築を目指したいと考えている。

謝辞

本研究に対し、避難訓練の実測調査に協力して頂いた皆様方と避難訓練に参加された学生諸氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 関澤愛, 佐野友紀, 門倉博之: 高層建築物の全館避難時における階段歩行に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp. 29-30, 2009. 7
- 2) 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀, 大岩大祐, 矢嶋雅倫: 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 3—順次避難訓練における各階被験者の移動プロファイル分析—, 平成 23 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 242-243, 2011. 5
- 3) 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀, 矢嶋雅倫, 増田誠良: 高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析その 5—順次避難訓練における被験者移動プロファイルと流動性状の分析—, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 136-137, 2012. 5
- 4) J. L. Pauls : Evacuation and Other Fire Safety Measures In High-Rise Buildings, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA, ASHRAE TRANSACTIONS, Vol.81, Part1, pp.528-534, 1975
- 5) J. L. Pauls : Calculating Evacuation Times for Tall Buildings, Fire Safety Journal, Vol.12, Issue 3, pp.213-236, 1987.12
- 6) 北後明彦, 久保幸資, 室崎益輝: 階段室における 2 群集の合流に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 358, pp. 34-43, 1985. 12
- 7) 佐野友紀, 竹市尚広, 木村謙, 大宮喜文, 吉田克之, 渡辺仁史: 高層建築物避難を想定した階段室における在館者群集の合流特性, 日本建築学会計画系論文集, No. 598, pp. 51-56, 2005. 12
- 8) J.J.Fruin : 歩行者の空間—理論とデザイナー—, pp. 50-51, 鹿島出版会, 1974

STUDY ON FLOW AND CONGESTION IN STAIRCASES DURING PHASED EVACUATION IN A HIGH-RISE BUILDING

– Analysis based on the observational data of a real total evacuation drill –

Hiroyuki KADOKURA *, *Ai SEKIZAWA* **, *Tomonori SANO* ***
and Kosuke FUJII ****

* Tokyu Research Institute, Inc., M. of Sciences in GITS.

** Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

*** Prof., Waseda University, Dr. Eng.

**** Waseda University, M.A. in Human Sciences

When a large-scale fire or other serious emergency situation were to occur in a high-rise building, it becomes reality that all occupants are forced to evacuate simultaneously and totally from the building at the same time. In order to avoid congestion by simultaneous total evacuation in the stairs, an idea of so-called “Phased Evacuation” has emerged as a feasible evacuation strategy, where occupants on the fire origin floor and the floor above evacuate first followed by the other occupants. However, in planning of the phased evacuation, what happens is that there have been limited studies and data so far concerning this method.

This study is to explore potential availability of phased evacuation along with its issues by conducting the measurement survey during a total evacuation drill based on the phased evacuation and analyzing the congestions in the stair cases.

We conducted the measurement survey on the total evacuation drills by the phased evacuation in a high-rise office building (25 stories above the ground) in Tokyo metropolitan area, which was carried out in 2012. The movement of descending occupant flow was monitored and recorded with video cameras set in the staircase on every floor and the descending time profile of representative occupants on each floor was watched and recorded by our staffs assigned to each floor. The number of participants in this total evacuation drill, who used one of the two emergency stairs for their evacuation drill and observed by our staff was 1,137. This enabled us to make a comparative analysis about the flow condition of occupants who participated in the evacuation drill over plural floors and to consider possible occurrence factors of congestion in the stairs.

By the analysis of walking speed, flow rates, and the density of occupants in the stairs of each floor, we identified that there are the following two types of congestions.

1) Congestion caused by merging of flows from the floor and from the upstairs

On the floors with large number of occupants, the occupants who entered the stair-case from vestibule merged with the descending occupants from the floor above, where quantity of flow decreased by half resulting in a congestion in the stairs which was sequentially propagated to upper floors. This congestion happened on the 13th (122 people) and 14th (106 people) floor with a lot of evacuees over 2 stories in particular, and it lasted for at most about 2 minutes from the 15th to the 18th floor.

2) Congestion caused by high density of occupants inside the staircase

After occupants on all floors started to evacuate, the congestion arose inside the staircase due to high-density condition inside the staircase where the flow rate increased. This congestion was found to spread toward the floors above. When the density in one story of stair case became 2.24 person/m² (38 people) or more, the congestion was formed. Approximately 10 times congestion occurred, and it was propagated from the 2nd floor to the 16th floor at intervals of average 15.2 seconds and was dissolved in an average of 12.2 seconds.

In the last, in order to prevent a long congestion in the staircase caused by high density, an appropriate evacuation strategy for the total evacuation in a high-rise building must be examined by further study including an observation of a real evacuation drill, questionnaire survey to participants to the drill, and case studies by using an evacuation simulation model of phased evacuation while changing the conditions of the number of floors and evacuees, location of fire origin floor, and a framework of phased evacuation, etc.

(2015年2月10日原稿受理, 2015年6月26日採用決定)