

可動式ホーム柵に作用する旅客推力および列車風圧の検討

山本 昌和* 清水 克将* 榎並 祥太**

An Investigation about Pushing Forces of Passengers and Pressure Variation from Passing Vehicles Acting on Platform Barriers

Masakazu YAMAMOTO Katsuyuki SHIMIZU Shota ENAMI

Platform doors are effective in order to prevent passengers from falling off the platform. Now, these equipments are under installation on main railroad lines. Then a few problems remain: the development of a system adaptable to different arrangements of railway vehicle doors, the reduction of initial costs, and the examination of a construction method adaptable to various structures of platforms. For solutions of these problems, an establishment of proper loading conditions on platform doors is essential, but there are few documents about loads working on platform doors. Then, we investigated pushing forces by people on platforms and pressure variation from vehicles passing through platforms acting on the platform doors.

キーワード：可動式ホーム柵，ホームドア，荷重条件，旅客推力，圧力変動

1. はじめに

ホームドアや可動式ホーム柵，または固定式ホーム柵等を含めた旅客のホームからの転落を物理的に防止する設備は，旅客の安全性および輸送の安定性を向上させるうえで有効な手段である。現在，主要な路線へのホームドア等の導入が始まっているが，依然として①異なる車両扉位置に柔軟に対応できるホームドア等の開発，②低コスト化の推進，③ホーム構造による施工法の検討，などの課題が残されている。これらの課題解決には，支持構造も含めたホームドア等の設計要件のあり方に関する議論が欠かせないが，合理的な設計を行うために必要な外力の大きさ等を扱った資料は少ない。本報では，近年最も普及が進む可動式ホーム柵を対象として，可動式ホーム柵に作用する外力のうち，旅客推力および列車風圧が生じる状況と荷重の大きさについて検討した。

2. 可動式ホーム柵に作用する荷重の考え方

可動式ホーム柵の仕様，なかでも荷重条件に関する技術基準はないが，風圧や推力，地震荷重などの外力を考慮して設計されることが多い。また，具体的な荷重の値については，他の技術基準等が準用される場合が多い。

本報では，可動式ホーム柵への作用が想定される荷重を，(1) 自然現象による荷重（地震荷重，風荷重），(2) 非自然現象による荷重（列車風圧，旅客推力）に分類し（図1），

* 構造物技術研究部 建築研究室

** 人間科学研究部 人間工学研究室

発生状況も含め情報の少ない(2)について検討した。なお，各荷重の定義は以下の通りである。

地震荷重：地震動が構造物を通じて可動式ホーム柵に伝わる水平力

風荷重：自然風により可動式ホーム柵に生じる圧力

列車風圧：列車通過時の圧力変動により可動式ホーム柵に生じる圧力

旅客推力：旅客による可動式ホーム柵への推力

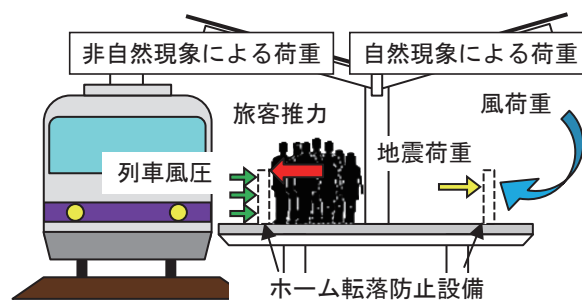


図1 ホームドア等に作用する主な外力

3. 列車通過に伴う列車風圧の検討

3.1 列車通過に伴う圧力変動

列車通過時の圧力変動については，新幹線での沿線・トンネル・駅部において検討がなされている。一般に列車走行による圧力変動は列車速度の2乗に比例して増大し，駅部で起こる圧力変動を予測する手法として，数値解析手法や予測式が提案され，駅舎の仕上げ材の損傷評価や対策としての開口部の検討に活用されている。

式(1)は，新幹線の明り区間における圧力変動の予測

特集：構造物技術

式を基本形として、半覆上家の部材に与える影響を対象とした圧力のピーク値 P_{max} (Pa) の予測式¹⁾である。

$$P_{max} = \alpha \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{\rho AV^2}{2\pi Y^2} \dots\dots\dots(1)$$

α : 補正係数, ρ : 空気密度 (kg/m³), A : 列車断面積 (m²), V : 列車速度 (m/sec), Y : 列車中心からの距離 (m), 適用範囲: 列車速度は 230 ~ 360km/h, Y は 6 ~ 8m, 半覆上家駅の上家部材近傍では $\alpha=2.3$

新幹線では、列車がホーム直近を通過する際に生じる風がホーム上の旅客に与える影響を考慮して、多くの場合、可動式ホーム柵はホーム端から十分離れた位置(概ね 2m)に設置される。そのため、列車風圧は可動式ホーム柵設計上のクリティカルな荷重となりにくい。

一方、在来線の可動式ホーム柵は、ホーム端の直近に設置されることが多いが、ホーム端近傍で作用する圧力変動について検討した資料は少ない。

そこで、在来線におけるホーム端近傍での圧力変動の把握と、式(1)による可動式ホーム柵に生じる列車風圧の推定を行った。このとき、式(1)の適用範囲として、在来線の高速度域(130km/h 付近)、可動式ホーム柵の設置位置(ホーム端から 0.4 ~ 0.6m 付近)、車両の先頭形状(妻面が切り立った形状の通勤型車両)における検証を行った。また、在来線の通過頻度を想定し、繰り返し荷重による影響についても検討した。

3.2 在来線ホームでの圧力変動測定

3.2.1 測定概要

在来線ホームでの圧力変動の把握にあたって、通勤型車両がホーム端近傍を通過する a 駅, b 駅, c 駅を選定し、図 2 に示すようなホーム端に設置された既存の安全柵の内側から圧力を測定した。測定点は、一般的な可動式ホーム柵の高さと設置位置に合わせ、ホーム床から異なる高さの 3 点 (P1 ~ P3), および列車からの距離による圧力の違いを確認するため、ホーム端から異なる距離の 2 点 (P4, P5) とした。a 駅, b 駅および c 駅では安全柵の位置が異なるため、ホーム端から最も近い測定点は、ホーム端から概ね 0.4 ~ 0.6m の範囲となった。

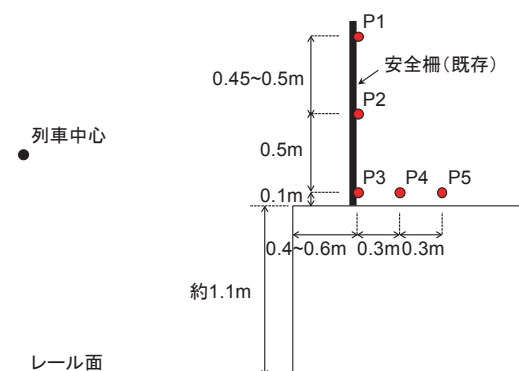


図 2 在来線ホームにおける測定点の配置

3.2.2 測定結果

測定の結果、圧力変動に伴う圧力が最大となったのは c 駅の測定点 P2 で、圧力のピーク値(正圧, 負圧の絶対値のピーク値, 0-P 値)は 258Pa であり、このときの列車の通過速度は約 127.5km/h であった。また、P3 ~ P5 の測定結果からは、圧力変動に伴う圧力がホーム端からの距離に応じて減衰する特性が確認できた。

a ~ c 駅で最も大きな圧力が観測された測定点 P2 での列車の通過速度と圧力の関係を図 3 に示す。厳密には車両形式や列車中心からの距離は異なるが、測定点 P2 における圧力のピーク値は列車速度の 2 乗に比例することがわかる。以上から、通勤型車両の通過時に可動式ホーム柵に生じる列車風圧は列車速度に伴い増加し、中央部では約 260Pa (約 130km/h) になることがわかった。

3.2.3 ホーム端部における列車風圧の推定

測定で得られた圧力のピーク値(実測値)と、式(1)において補正係数 $\alpha=1.34$ として得られる圧力のピーク値(計算値)を比較した結果を図 4 に示す。結果は概ね良好に対応している。なお、c 駅の測定点 P1 では周囲の安全柵の形状が他の a 駅, b 駅と異なり、他地点の測定値とかい離が見られたことから採用しなかった。以上から、式(1)にて補正係数 $\alpha=1.34$ とすれば、在来線の通勤型車両が通過するときに可動式ホーム柵に作用する列車風圧を推定できることがわかった。

3.3 可動式ホーム柵の扉支持部模型の疲労試験

3.3.1 試験の目的

在来線での実測では、可動式ホーム柵中央部に当たる

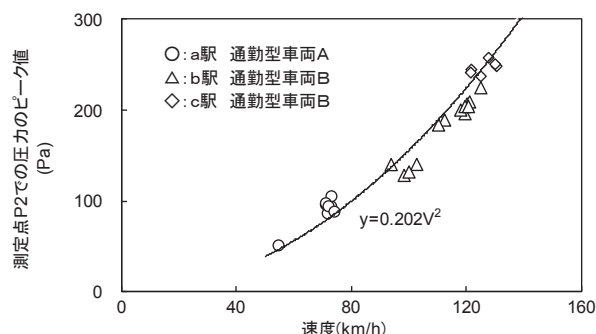


図 3 測定点 P2 における列車速度と圧力の関係

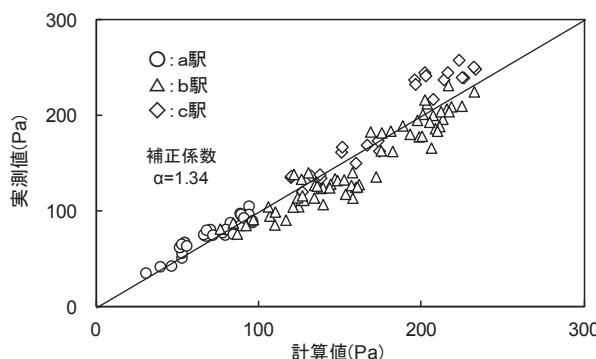


図 4 圧力の計算値と実測値の比較結果

測定点での圧力が最大となったが、この圧力が列車風圧として、標準的な可動式ホーム柵の扉（片側分 $1.1\text{m}^2 = \text{幅 } 1.0\text{m} \times \text{高さ } 1.1\text{m}$ ）に様に作用すると仮定した場合、約 130km/h の列車の通過により可動式ホーム柵の扉（片側分）に作用する荷重は約 0.3kN （＝列車風圧 $260\text{Pa} \times \text{面積 } 1.1\text{m}^2$ ）と推定される。荷重としてはそれ程大きくないが、列車の通過頻度が高い線区では、長年に亘る列車風圧の作用が扉の強度や動作に影響を及ぼす可能性もあることから、列車風圧の繰り返しが、可動式ホーム柵に与える影響を実験により確認した。

3.3.2 試験方法

対象とした可動式ホーム柵は戸袋から扉が片持ちで張り出す構造のものとし、多様な車両扉位置に対応した張り出し幅の長いロングストロークタイプ（扉幅 $1.7\text{m} \times \text{扉高さ } 1.1\text{m} = 1.87\text{m}^2$ ）とした（図5）。このとき扉にかかる荷重は戸袋との接合部（扉の吊元かつ開閉動作をする部分、以下摺動部）に集中すると考えられることから、摺動部を試験対象とした。摺動部以外の扉や戸袋部分は疲労破壊しないよう剛性を十分高く設定し、扉の自重により摺動部に作用するモーメントが実際と同程度になるように重量を設定した。

荷重は扉中心位置に1点集中荷重として作用させ、正負側双方の加圧ジャッキを介して交互に加えた。荷重の大きさは列車速度 $130 \sim 140\text{km/h}$ （ホーム端から 40cm 地点）に相当する圧力 561N （ 300Pa ）と、その1.5倍の 841N （ 450Pa ）の2条件とした。

繰返し回数は約30年間に相当する200万回（通過列車180本/日と想定）を最大とした（ 450Pa の条件は100万回までとした）。載荷周期は 561N （ 300Pa ）では約 0.5Hz 、 841N （ 450Pa ）では約 0.3Hz とした。また、試験実施前、20万回、50万回、100万回および200万回で直動ガイドの動作状況を確認した。

3.3.3 試験結果

疲労試験回数1万、10万、50万、100万、200万回経過後の90サイクル分の荷重－扉先端水平変位関係を図6、図7に示す。 561N 、 841N の場合ともに疲労試験回数が増大しても荷重－変形関係に大きな変化は見られない。

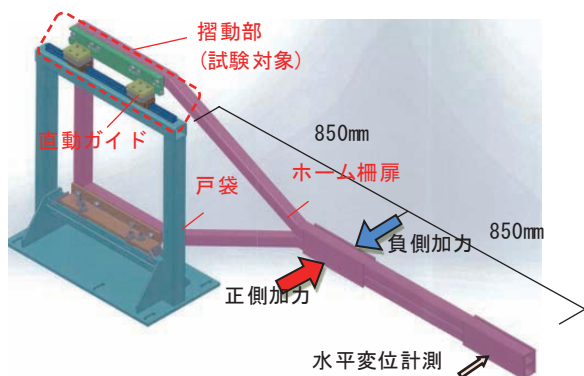


図5 疲労試験に用いたホーム柵の供試体

また、各疲労試験回数経過後の摺動部の動作には大きな変化は見られなかった。以上より、特定の1機種ではあるが、長期に亘る列車風圧が作用しても現行機が耐えうるということがわかった。

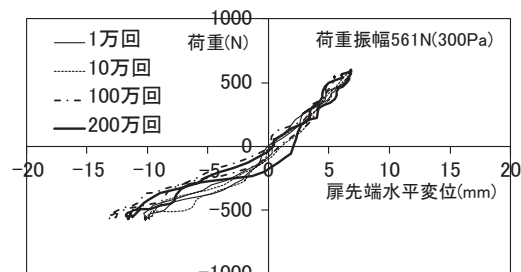


図6 荷重 - 扉先端水平変位の関係（最大荷重 300Pa ）

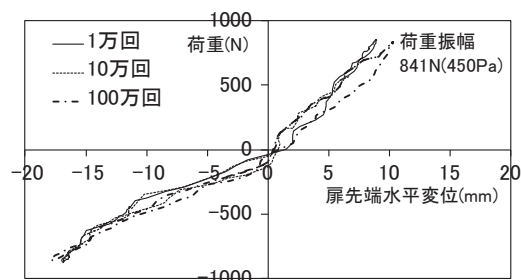


図7 荷重 - 扉先端水平変位の関係（最大荷重 450Pa ）

4. 旅客による推力の検討

4.1 旅客による推力

既存の可動式ホーム柵では、旅客による推力として 1.0kN/m または 2.5kN/m の水平荷重が考慮されることが多い。これは、乗換跨線橋設計指針²⁾の、階段および通路の側壁への推力 100kgf/m 、通路突き当たり面への推力 250kgf/m もしくは類似基準^{3) 4) 5)}を参考にしていると考えられる（表1）。

今後、ホームドア等の普及に向けて、ホーム上の混雑の恐れがない駅では、実態に合った合理的な荷重条件を検討することも考えられる。ただ、ホーム上で旅客が作用しうる様々な推力を取りまとめた参考資料は少ないことから、人が壁や手摺等を加力する行為と推力の大きさの関係を、文献調査や解析から整理した。

4.2 人に起因する推力の文献調査

4.2.1 他の技術基準における荷重条件の背景

検討に先立ち、既存の技術基準等における荷重の大きさが定まった背景について調べた。まず、乗換跨線橋設計指針の突き当たり面の荷重の根拠については「当時の新道路橋示方書の高欄側圧 250kg/m を採用した」⁶⁾、側壁の荷重については「旧道路橋示方書の高欄側圧 70kg/m の40%増しとした」⁶⁾との記載がある。更に道路橋示方書等の関連文献から根拠を辿ると、1948年に新潟の万代橋で発生した群集による崩落事件を機に実施された

表1 群集による推力が荷重条件とされている例

基準の例	乗換跨線橋指針 ²⁾	道路橋示方書 ³⁾	立体横断施設技術基準 ⁴⁾	モノレール構造物設計指針 ⁵⁾
対象	側壁への推力	高欄への推力	高欄への水平力	ホーム前面柵への推力 高欄への推力
水平荷重	250kgf/m (突当面) 100kgf/m (側面)	250kgf/m	250kgf/m	100kgf/m (ホーム前面柵) 250kgf/m (高欄)
作用高さ	路面から0.8m (手摺の取付高さ)	路面から0.9m以上 頂部に作用	作用高さ不明 頂部に作用	標準1m高さの頂部 (ホーム前面柵) 床から1m以上の頂部 (高欄)
想定する状況	非常の場合の群集側圧 および押し合い	群集が密集した場合	通勤、通学時に生じる 一時的な群集の密集	もたれかかり (ホーム前面柵) 群集 (高欄)

実験⁷⁾が基になっている。この実験で複数の人が押したときの水平推力(板張り床, 男性6人, 載荷部幅約1m)が約245kg(=約2.5kN)であった。一方, 70kg/m(=約0.7kN/m)については, 鋼道路橋設計示方書案解説の引用として「歩車道の区別ある場合は全く群集の推力のみを考慮すればよいのであって, 従来の70kg/mにて十分なりと思考した」⁸⁾との記述のみで, 他の文献も含め実験的な根拠を見つけることはできなかった。

4.2.2 既往の実験事例からわかる荷重の大きさ

次に, 可動式ホーム柵に加わる荷重を考えるため, ①ホーム上の旅客が作用させる可能性がある荷重の大きさを把握し, ②現状で参考とされる2.5kN/mや1.0kN/mの位置づけを把握することとした。

人や群集が壁に寄り掛かったり, 押ししたりしたときの荷重については, 既往の報告が多数ある。これらは人の加力で生じる荷重を実測したもので, 手摺の自主基準や標準仕様書にも採用されている。

(1) 人数別に見た荷重の大きさ

既往実験では, 人が荷重を作用させる行為は「押す」「もたれる」「引く」「ぶつかる」等に分類でき, 実験例は少ないが「揺り動かす」「蹴る」「突く」行為もあった。全事例のうち, ホーム上で生じる可能性が極めて低いと思われる行為および実験の詳細が文献から読み取れなかったものを除く435サンプルを抽出した。

荷重を作用させる人数と荷重の関係を図8に示す。「もたれる」から「押す」まで様々な行為を含むため, 荷重の大きさは0~3.0kN/mで広く分布する。9人以下で発し得る荷重は, 最大でも約2.5kN/m(3人のとき)である。一方, 10人以上では, 23人が押しから餓頭状態で押したときの最大荷重が約2.7kN/mであった。

(2) 行為別に見た荷重の大きさ

次に, 抽出したサンプルのうち1人で作用する荷重の大きさを例示する(図9)。「押す」行為による荷重は0.2kN/mから1.8kN/mまで幅広く分布し, 1.8kN/mは「地下足袋を履いた男性一人が力一杯押したとき」⁹⁾の荷重である。類似条件で「男性一人が力一杯押したとき」¹⁰⁾の荷重の最大値が1.2kN/mであることから, 1.8kN/mは極

限に近い値と考えられる。他に「ぶつかる」「揺り動かす」「引く」「蹴る」で, 1.0kN/mを超える。その他, 「突く」「もたれる」では, 相対的に低い荷重となる。以上より, 1人が作用し得る推力は1.0kN/mを超える場合があることもわかった。

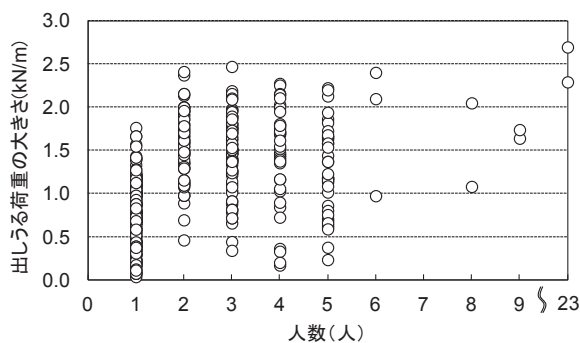


図8 人数別に見た荷重の大きさ

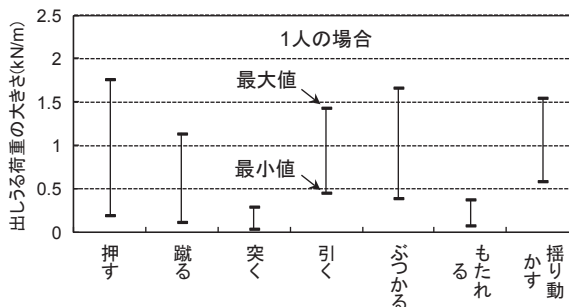


図9 行為別に見た荷重の大きさ

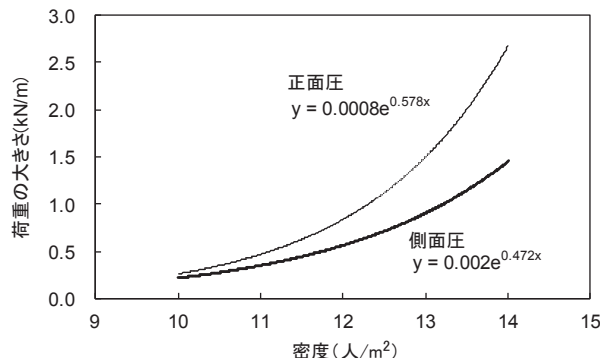


図10 密度と推力の関係

(文献¹¹⁾に示された近似式を基に単位を換算して作図)

(3) 極度な密集と荷重との関係

極度に密集した状況での荷重については、既往研究¹¹⁾で荷重と密度の関係が示されている(図10)。これは矩形の空間に被験者28人を詰め込み、一方向に押したときの正面圧と側面圧を測定したものである。正面圧は12.3人/m²で1.0kN/m、13.9人/m²で2.5kN/mを超え、側面圧は13.2人/m²で1.0kN/mを超える。このグラフからは10人/m²未満の推力は、数kN/m程度から、大きくても数名がもたれかかった程度(概ね0.5kN/m程度)と推測される。

4.3 ダミーモデルを用いた旅客推力の解析的検討

4.3.1 詰め込み試験の解析による再現

既往研究では確認されていない10人/m²未満で生じる推力を定量的に捉えるため、解析的検討を行った。本報では能動的な動作を伴わない密集状態への適用可能性が高いダミーモデル解析を用いた。

まず、衝突解析用に作られたダミーモデル(図11)が密集時の静的な荷重にも適用できるか確認するため、

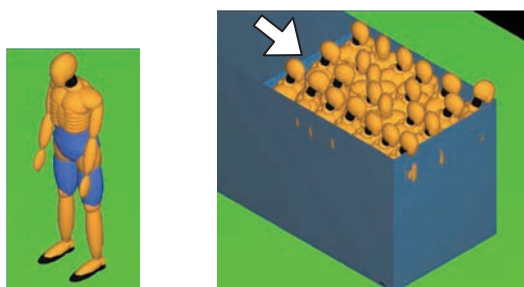


図11 ダミーモデル 図12 詰め込み試験の再現状況

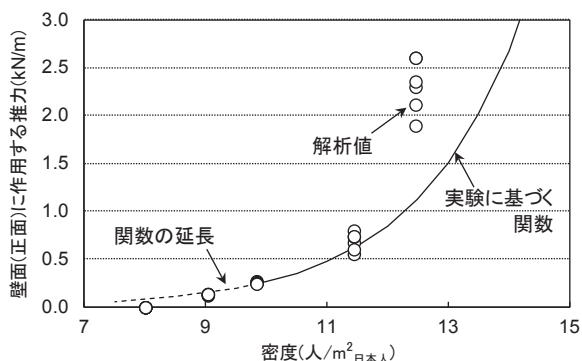


図13 実験値と解析値の比較(正面推力)

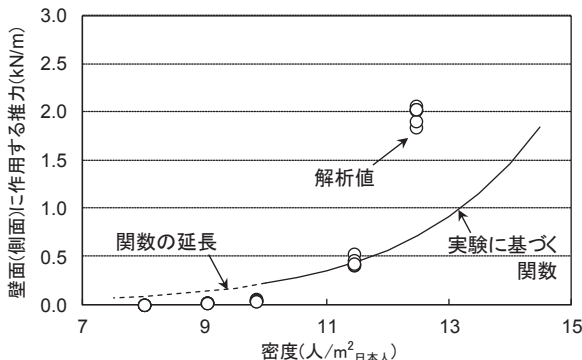


図14 実験値と解析値の比較(側面推力)

前述の詰め込み試験と同条件の再現解析を実施した。

解析には TASS International (米製の数値解析ソフト MADYMO) を使用した。また、解析にあたって、ダミーの重心位置となる腰部のパーツの動きを並進、及び地面に垂直方向を軸とした回転運動のみに制限し、自立可能となるように改良した。

既往実験の被験者は日本人学生28人であり、被験者の平均体重は64.2kgであった。一方ダミーモデルは欧米人の体格を参考に作成されており、体重は78kgである。この体格差を考慮するため、比重が水とほぼ同等な人体では体重比=体積比の等式が成り立つと仮定し、平均体重64.2kgの日本人学生28人の体積は78kgのダミー23体分に等しいとした(図12)。

解析は既往の再現密度を含む約8~12人/m²日本人(ダミーに換算して約6~10人/m²ダミー)の範囲で5条件を行った。また、推力にはダミーの姿勢が大きく影響することから、床の摩擦を変えることでダミーの姿勢にばらつきを持たせた。解析結果のうち正面推力を図13に、側面推力を図14に示す。既往実験と比較すると、解析値は9.0~11.4人/m²日本人では実験値に沿うことがわかる。12.5人/m²日本人では解析値が実験値を上回るが、これはダミーモデルが衝突実験に応じた接触特性を持ち、強く圧縮されると人体以上の反力を発生させるためである。

4.3.2 ホーム狭隘部における旅客推力の試算

再現解析から概ね妥当性が確認できた9.0~11.4人/m²日本人の範囲において、ホーム上の状況を想定した旅客の推力を試算した。本報では、ホーム狭隘部(図15)に旅客が密集した場合を想定した。ホーム狭隘部にダミーモデルを23体配置し、狭隘部の床面積を2.45~3.10m²で変化させたときに可動式ホーム柵にかかる推

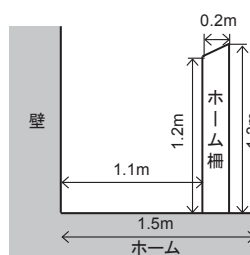


図15 ホーム狭隘部

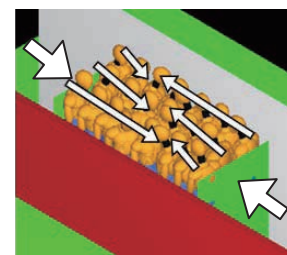


図16 ホーム上の解析状況

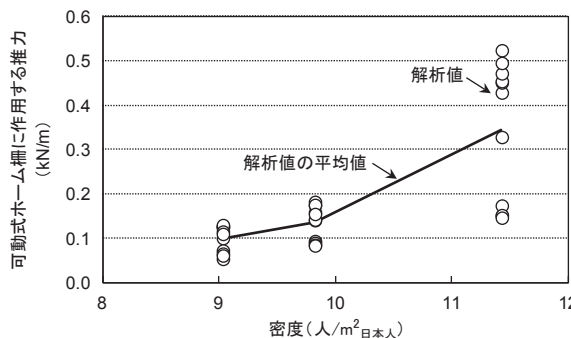


図17 可動式ホーム柵に作用する推力の試算結果

特集：構造物技術

力を解析した。また、再現解析と同様にダミーと壁面及び床面の摩擦係数を変化させてダミーの姿勢にばらつきを持たせた。

ダミーモデルが半数ずつ向かい合う場合（図16）の解析結果を図17に示す。旅客による推力は密度に伴い増加する様子が確認できる。また、同じ密度でも壁面に接触するダミーの数が多い時に大きな推力が生じる傾向が見られた。今回の試算では、可動式ホーム柵に作用する旅客の推力は旅客の接触状況に左右され、11.4人/m²日本人では大きくとも0.6kN/m程度との結果を得た。ただ、何らかのきっかけで旅客全員が可動式ホーム柵にもたれかかった場合など、想定する条件に合わせた検討の深度化が必要となる。

4.4 可動式ホーム柵に作用する旅客推力の考え方

以上より、ホーム上の旅客が可動式ホーム柵に作用させる荷重を考えた場合、もたれかかのような行為で生じる推力は最大で0.4kN/m程度で、1.0kN/mの強度があれば許容できる荷重である。しかし、1人が力一杯押す、または揺り動かすなどの行為で生じる推力は最大で約1.8kN/mと1.0kN/mより大きいことがわかった。ただし、9人以下で押す行為を含めても推力は2.5kN/m程度であった。更に、23名で一斉に押すなどの行為で生じる推力は最大で2.7kN/mと2.5kN/mより大きいことがわかった。

一方、旅客が過度に密集した場合に可動式ホーム柵に作用する推力は旅客の密度に依存し、正面圧では密度12.3人/m²で1.0kN/mを超え、密度13.9人/m²で2.5kN/mを超える。側面圧では密度13.2人/m²で1.0kN/mを超えることがわかった。また、ダミーモデルによる試算では、密度約11人/m²未満の群集側面で可動式ホーム柵に作用する荷重は最大でも約0.6kN/mであった。

以上のようなホーム上で起こり得る状況と旅客推力との関係をまとめたものを表2に示す。ただし、これらには故意の加力行為、一般的には入場規制等の手段が取られる密集状態も含まれており、可動式ホーム柵の強度を検討するうえで想定すべき条件であるかについては、議論の余地があると考えられる。

表2 旅客推力と発生状況の関係

旅客の推力	ホーム上で想定される状況
1.0kN/m以下	・もたれかかりなど悪意のない行為 ・身動きできない群集（密度約13人/m ² 未満）の側面圧 ・身動きできない群集（密度約12人/m ² 未満）の正面圧
1.8kN/m以下	・押す、揺り動かすなど悪意のある行為を含む1人が起こしうる行為
2.5kN/m以下	・押す、揺り動かすなど悪意のある行為を含む9人以下の集団が起こしうる行為 ・身動きできない群集（密度14人/m ² 未満）の正面圧
2.5kN/mより大	・約20人以上で力一杯押すなど組織的な行為

5. おわりに

可動式ホーム柵の構造検討に必要な外力のうち、列車風圧と旅客推力について荷重の大きさと考え方を整理した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 実測から、在来線ホームを通勤型車両が通過する際に可動式ホーム柵中央部に作用する列車風圧が約130km/hのとき約260Paに達することを明らかにした。
- (2) 疲労試験から、直動ガイドで支持された可動式ホーム柵扉に約300Paの圧力が200万回、約450Paの圧力が100万回作用しても扉の開閉に影響はないことを確認した。
- (3) 文献調査から、9人以下で作用しうる推力が2.5kN/mを超えることは稀であるが、23人で作用しうる推力は同条件を超える場合があることを明らかにした。
- (4) 解析による試算では、ホーム狭隘部で停滞・密集した旅客の側面が可動式ホーム柵に作用する推力は11.4人/m²のとき大きくとも0.6kN/mとなった。

ただし、旅客推力の設定にあたっては、故意の加力行為、並びに入場規制の対象となるホームでの旅客の密集などについて可動式ホーム柵の設計上どこまで想定すべきか議論の余地がある。

文献

- 1) 武居泰他：圧力変動の予測，鉄道建築ニュース，8巻693号，pp.14-15，2007
- 2) 鉄道総合技術研究所編：乗換跨線橋設計指針，P.12，1998
- 3) 日本道路協会編：道路橋示方書（I共通編・IV下部構造編）・同解説，P.79，1980
- 4) 日本道路協会編：立体横断施設技術基準・同解説，pp.41-42，1986
- 5) 日本道路協会モノレール構造基準調査特別委員会：モノレール構造物設計指針，P.122，1975
- 6) 日本国有鉄道 建設局：土木構造物標準設計の指針・解説，乗換こ線橋，P.8，1967
- 7) 荒川一夫：高欄の推力に就いて，土木技術，第4巻第8号，pp.22-24，1949
- 8) 福田武雄：橋梁高欄の設計について，土木学会誌，第35巻第4号，pp.12-18，1950
- 9) 松下清夫 他：建築物に加わる外力及び荷重に関する資料その6人間力の測定に就いてA，日本建築学会論文報告集，第56号，pp.22-29，1957
- 10) 真鍋恒博 他：各種の人間動作によって手摺に生ずる水平荷重の測定実験，日本建築学会技術報告集，第16巻第33号，pp.649-654，2010
- 11) 末原隆司 他：群集密度と群集圧の関係に関する測定実験，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.297-300，2003