

乾式接合部を有する ALC 模擬床の FEM モデルによる歩行振動解析

西井 康真 近藤 貴士 北倉 友佳 山下 仁崇

Yasuma Nishii, Takahito Kondo, Tomoka Kitakura, Yoshitaka Yamashita

概 要

近年、工業化住宅においても、ロングスパン梁を用いた大空間の実現が望まれている。この実現には、振動障害のリスクを解析的に評価する必要がある。しかし、梁と床版の接合が乾式接合である工業化住宅においては、床振動の解析方法が確立されていない。

本研究では、乾式接合部を有する ALC 床を対象とし、模擬床で得られた実験結果と FEM モデルによる解析結果の比較を通して、FEM モデルの精度を検証した。当 FEM モデルの特徴の一点目は、ALC パネルと梁の節点を分離し、その間に剛体連結を用いることで、個々の部材の接合状況を考慮できることである。二点目は、剛体連結長さによって、乾式接合部の固定度を再現する点である。

固有値解析により算出した固有振動数と歩行振動解析結果から算出した VLT 及び 1/3 オクターブバンド分析結果は、模擬床による実測結果と概ね一致した。一方、歩行振動解析結果から算出した振動レベルは、最大値は一致しているものの、歩行の一步ごとの振動の収束度に差が見られた。

Walking Vibration Analysis by FEM Model of ALC Mock Floor with Dry Joints

Abstract

In recent years there has been a growing demand for realizing large spaces in industrialized housing using long-span beams. To realize this, it is necessary to analytically evaluate the risk of vibration disorder. However, in industrialized housing where the beam and floor panel joints are dry joints, there is currently no established method for analyzing floor vibration.

In this study, the accuracy of an FEM model was verified by comparing the results obtained from experiments on a mock floor with the analysis results from the FEM model, focusing on ALC floors with dry joints. One of the key features of this FEM model was the separation of nodes between ALC panels and beams, and using rigid connections between them. This allows for the joint conditions between individual members to be taken into consideration. A second feature is the ability to reproduce the fixity of the dry joints by adjusting the length of the rigid connections.

The natural frequencies calculated through eigenvalue analysis, as well as VLT and the results from the 1/3 octave band analysis obtained from the walking vibration analysis, closely matched the measurement results from the mock floor. On the other hand, the vibration levels calculated from the walking vibration analysis showed a close match in terms of the maximum values, but there were differences observed in the convergence of vibration with each step of walking.

キーワード：歩行振動，ALC パネル，乾式接合，FEM 解析，模擬床

1. はじめに

近年、建物用途の多様化に伴って、工業化住宅においても、ロングスパン梁を用いた大空間の実現が望まれている。この実現に向けては、環境振動（特に歩行振動）による振動障害の発生リスクを適切に評価する必要がある。特に居住用途となる建物は、居住者がリラックスする空間であり、近年の社会情勢を背景とした在宅時間の延伸によって、一層の注意が必要となる。

振動障害の発生リスクの評価には、実棟での検証や解析による検証が行われる。実棟での検証には、時間及び費用を要するため、解析による検証が望まれる。しかし、工業化住宅では、施工性の向上を目的に、梁と床版の接合に乾式接合を用いることがある。この仕様は、湿式接合に比べて、梁と床版の固定度が低く、解析的に床振動を評価する方法が確立されていない。

そこで、本研究では、乾式接合の ALC 床の FEM モデルによる解析手法を検討した。具体的には、まず模擬床を用いた実験により、梁組及び ALC 床パネルの基本的な振動性状を把握する。次に、実験結果を基に、FEM モデルによる歩行振動解析の精度を検証する。

2. 模擬床による振動性状の把握

2.1 模擬床について

模擬床は H 形鋼の梁、防振ゴム、ALC パネル及びパーティクルボードで構成され、長さ 5.46m×幅 3.64m である（図 1）。ALC パネルは短辺 0.606m×長辺 1.81m であり、短辺のみが防振ゴムを介して梁に接触し、接合金物で固定されている（図 2）。パーティクルボードは ALC パネルに対して、ビスを用いて 303mm ピッチ以内で締結されている。模擬床の支持点は 6 か所であり、梁間の接合部材（ジョイントボックス）又は支持点治具を介して、試験場の床に荷重を伝達するものとした。

2.2 試験方法及び評価方法

試験は、「固有振動数及び減衰定数の推定を目的とした衝撃力発生装置による衝撃力荷重試験」と「人が歩行した際に発生する床の挙動を確認するための歩行試験」の二種類を実施した。測定には表 1 に示す加速度センサーを用いた。

衝撃力荷重試験は、4kgf の錘を 25cm の高さから落下させ、一定の衝撃力を与える衝撃力発生装置¹⁾を用いた（写真 1）。発生する床への加振力は約 637N である。図 1 に荷重点（図中○）及び計測点（図中▲）を示す。受振者の有無による減衰定数の差を

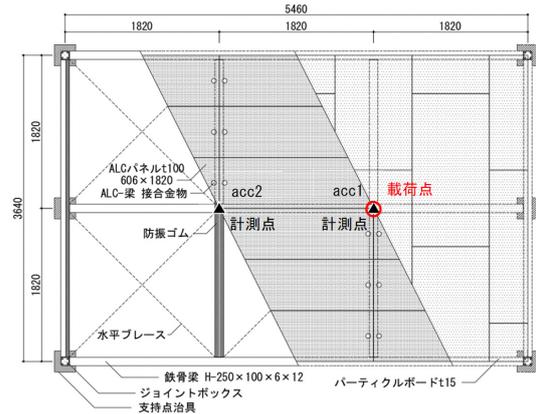


図 1 模擬床概要及び衝撃力荷重試験位置

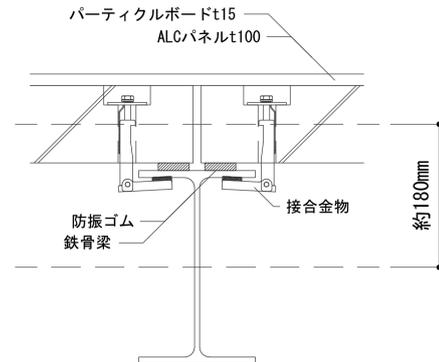


図 2 模擬床断面図

表 1 計測機器一覧

試験名	センサー種類	メーカー/型番	サンプリング周波数
衝撃力荷重試験	圧電式 加速度センサー	リオン(株) /PV-87,PV-85	200Hz
歩行試験	MEMS 加速度センサー	(株)ロジカルプロダクト /LP-WS92-EACS01	500Hz



写真 1 衝撃力発生装置

確認するため、荷重点において「受振者無し」「受振者有り（体重 73kgf、男性、立位）」の二種類のケースを行った。試験は各 3 回実施した。

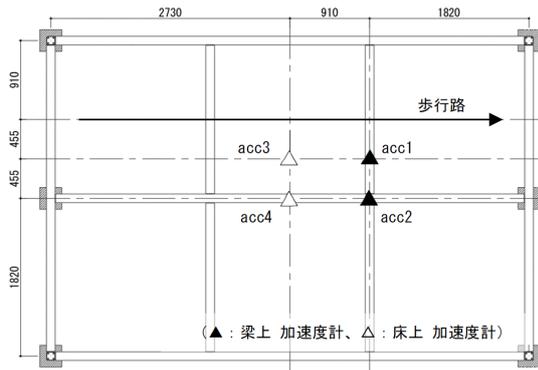


図3 歩行試験ケース

衝撃力発生装置による加振によって得られた加速度波形を用いて、固有振動数及び減衰定数を推定する。加速度波形のデータ全長に対してFFTを実施し、フーリエスペクトルがピークを示す振動数を固有振動数とした。また、減衰定数は固有振動数を中心とするバンドパスフィルタを施した波形から推定した。

歩行試験は、図3に示す歩行路(図中→)と計測点(図中▲△)に対して、3回の歩行を実施した。歩行者及び歩行条件は男性、体重73kgf、歩調2Hz、歩幅455mmであり、履物は靴下である。なお、受振者は無しとした。

歩行加振によって得られた加速度波形を用いて、 $VLT(25ms,60dB)$ を算出する。最大加速度や最大変位などの指標も考えられるが、最終的には解析結果を用いて居住性評価を行うことを目的としているため、人の振動感覚との一致が報告されているVLTを用いた。なお、VLTの算出時には、体重を60kgfに基準化するため、加速度波形を0.82倍($\approx 60/73$)した。

2.3 試験結果(衝撃力加振)

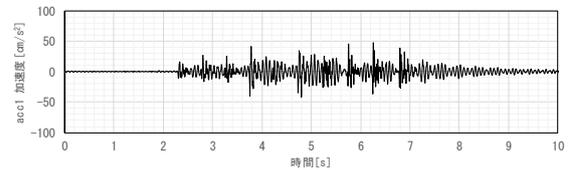
固有振動数及び減衰定数の推定結果を表2に示す。固有振動数は約13Hz、減衰定数は受振者がいない状態で、0.6%、受振者がいる状態で約2.5%である。受振者の影響で減衰定数が上昇する傾向は参考文献3)で報告されている内容と一致する。なお、実物件にて計測した結果によると、受振者がいない状態でも5%~10%を示すため、当模擬床の減衰定数は非常に低い。これは天井や外壁、間仕切壁などの二次部材が存在しない模擬床特有の減衰定数であると考えられる。

2.4 試験結果(歩行試験)

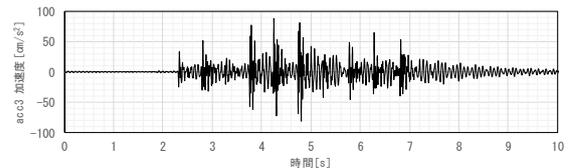
歩行試験結果の一例を図4に示す。対象としている床は、実物件における計測では間欠的な振動を示すことを確認している。しかし、本研究における模

表2 固有振動数及び減衰定数(3回平均値)

受振者の有無	固有振動数[Hz]		減衰定数[%]	
	acc1	acc2	acc1	acc2
受振者無し	13.07	13.08	0.6	0.6
受振者有り	13.15	13.12	2.6	2.5



(a) acc1



(b) acc3

図4 歩行試験による加速度波形の一例

表3 歩行試験結果(3回平均値)

計測点	VL_{max} [dB] (25ms) ^{*1}	T [s] (60dB) ^{*2}	VLT [dB]
acc1	79.77	6.49	83.80
acc2	78.93	6.40	82.94
acc3	82.66	6.92	86.84
acc4	81.81	6.88	85.97

*1: 実効値処理時の時定数 *2: 算出時の参照値

擬床では、減衰が非常に低いため、間欠的な振動と連続振動の中間的な性状を示す。

試験結果より算出した VL_{max} 、 T 、 VLT の一覧を表3に示す。梁上での計測点(acc1,acc2)でのVLTは約84dB、ALCパネル上での計測点(acc3,acc4)でのVLTは約87dBであり、ALCパネルでの振動増幅があることがわかる。これは、図4の加速度波形でも同様の傾向が認められる。なお、先にも述べたように、本研究での模擬床は、実物件での床とは異なる性状を示していることを追記しておく。

3. FEM解析モデルによる歩行振動解析

3.1 解析手法

解析にはMidas iGenを用いる。梁及び水平ブレースを線要素、ALCパネルを板要素としてモデル化する。なお、ALCパネルは1枚を1つの板要素としてモデル化を行う。パーティクルボードは重量のみを考慮する(106N/m²)。

図5に解析手法の概要について示す。ALCパネルは短辺の二辺のみが防振ゴムを介して梁に接触している。よって、線要素と板要素を同じ節点でモ

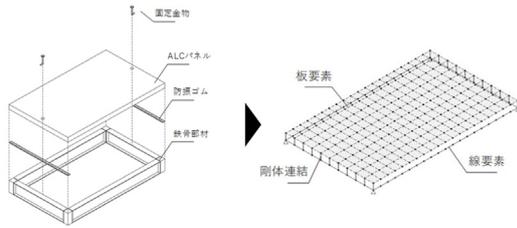


図5 解析手法の概要

デル化すると、梁と接触していない長辺の二辺が梁の挙動と一体化するため、適切にモデル化ができない。そこで本研究では、剛体連結を用いて、梁（線要素）の節点と床（板要素）の節点を分ける方法を採用した。これにより、長辺の二辺と梁の挙動は分離される。

3.2 解析モデルのパラメータ

パラメータを変化させ、固有振動数や歩行振動試験結果との比較を行い、最終的に以下に示す条件で概ね振動性状を再現できることを確認した。図6に解析モデルの概要図を示す。

各要素のパラメータを表4と表5に示す。ALCパネルの物性は参考文献4)及び5)を参考に設定した。減衰定数は、全モード一律に0.6%（受振者無し）として与えた。梁（線要素）と床（板要素）のメッシュピッチは151.7mm（ $\approx 910/6$ ）とした。

梁（線要素）の節点と床（板要素）の節点の距離（以下、剛体連結長さ）は、119.7mmとした。

支点条件及び梁端部接合条件、ALCパネルの境界条件を表6と表7に示す。なお、ALCパネルの境界条件は隣り合う板要素に対して、各自由度における応力を伝達するか否かを設定するものである。模擬床では短辺方向は必ず梁と固定されているため、全ての自由度に対して応力を伝達する条件とし、一方、長辺方向はパーティクルボードのみで応力を伝達するため、面外の回転方向（本研究ではRX）は、応力を伝達しない条件とした。

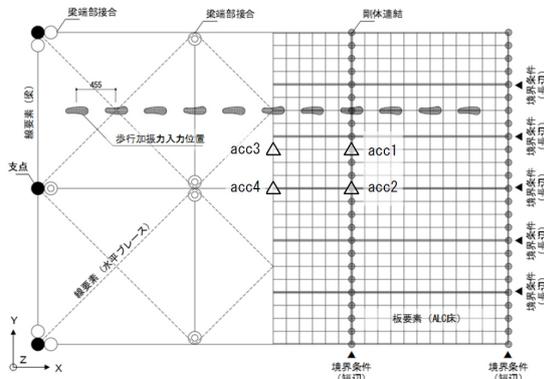


図6 解析モデル概要及び歩行加振力入力位置

表4 線要素の物性パラメータ

	梁	水平ブレース
ヤング係数	205,000 N/mm ²	205,000 N/mm ²
せん断変形の考慮	あり	あり
せん断弾性係数	79,000 N/mm ²	79,000 N/mm ²
ポアソン比	0.3	0.3
断面	H-250×100×6×12	12φ

表5 板要素の物性パラメータ

ALCパネル	
ヤング係数	1,910 N/mm ²
せん断変形の考慮	あり
せん断弾性係数	796 N/mm ²
厚み	100 mm
ポアソン比	0.2
単位重量	6.37×10 ⁻⁶ N/mm ³

表6 支点条件及び梁端部接合条件

	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
支点条件	拘束	拘束	拘束	自由	自由	拘束
梁端部接合条件	拘束	拘束	拘束	半剛*	半剛*	拘束

※梁-ジョイントボックス（図2中○部）51,204[kNm/rad]
梁-梁（図2中◎部）76,807[kNm/rad]

表7 ALCパネルの境界条件

	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
短辺方向	有	有	有	有	有	有
長辺方向	有	有	有	無	有	有

3.3 解析結果と精度検証

3.3.1 固有振動数

固有値解析により得られた解析モデルの固有振動数は13.54Hzであった。実験結果（13.07Hz）と0.47Hzの差であり、概ね実験結果と一致している。また、図7に剛体連結長さを変化させた場合の固有振動数の推移について示す。これによると、剛体連

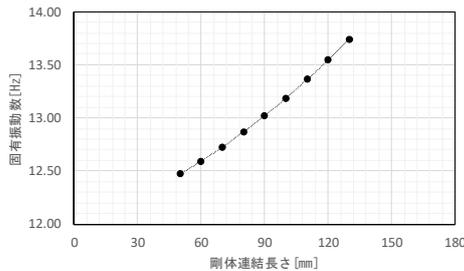


図7 剛体連結長さと固有振動数の関係

結長さを長くすると固有振動数が上昇している。これは、板要素端部の固定度が剛体連結長さに比例して上昇するためである。図2より、構成上は梁芯からALCパネル芯までの距離は約180mmであるが、剛体連結長さを180mmとすると、固有振動数が実験結果と乖離することがわかる。これは、ALCパネル端部の固定が完全な剛接合ではないためである。解析モデルでは剛体連結長さを調整することで、ALCパネル端部の固定度(接合金物及び防振ゴムの影響)を再現できていると言える。

3.3.2 歩行振動解析

歩行加振力は、実験における歩行者の歩行力を別途計測したものをを用いた(図8)。また、図6に示すように、模擬床実験における歩行位置に対して、歩幅455mm、歩調2Hzで入力した。なお、模擬床における歩行試験と同様に、VLT算出時に加速度波形を0.82倍(≒60/73)することで、体重を60kgfに基準化した。

表8に歩行振動解析より得られたVLTの結果、図9に振動レベルの比較の一例、図10に1/3オクターブバンド分析結果の比較の一例を示す。VLTの解析結果と実験結果(3回平均値)の差は最大でも0.6dBである。また、図10では1.6Hz~40Hzの範囲で高い一致度が確認できる。これより、解析モデルは実験結果を概ね再現できていることがわかる。一方、図9によると、最大値は再現できているが、一歩毎の振動の収束が実験結果に比べて悪い。本研究では、減衰定数が0.6%の床を対象としているため、解析と実験の両方で、歩行振動中の振動レベルが常に60dBを超えている。実物件などの5~10%の減衰定数を持つ床では、振動レベルが60dBを上下するため、Tに差異が出る可能性がある。

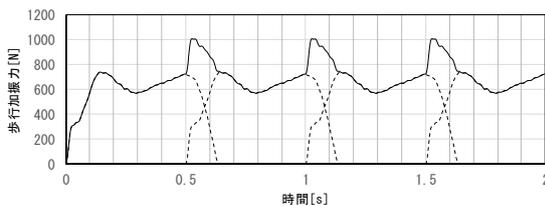
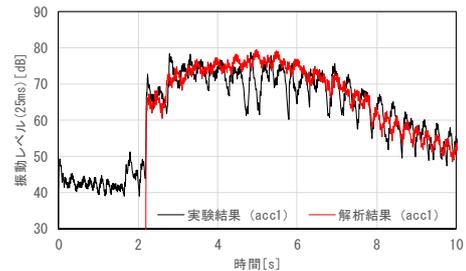


図8 歩行加振力

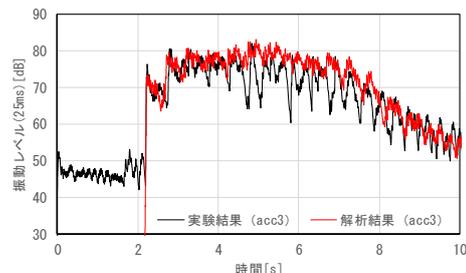
表8 歩行加振力

計測点	$V_{L,max}$ [dB] (25ms) ^{※1}	T [s] (60dB) ^{※2}	VLT [dB]
acc1	79.42 (-0.34)	5.94 (-0.54)	83.29 (-0.51)
acc2	78.50 (-0.43)	5.85 (-0.55)	82.34 (-0.60)
acc3	83.10 (0.44)	6.63 (-0.29)	87.21 (0.37)
acc4	81.49 (-0.32)	6.38 (-0.50)	85.51 (-0.46)

※1: 実効値処理時の時定数 ※2: 算出時の参照値

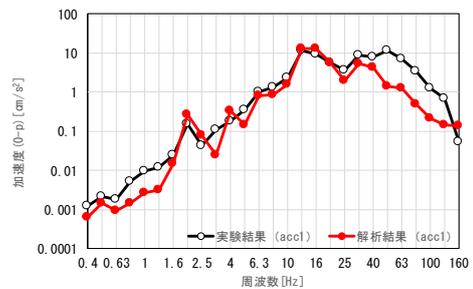


(a) acc1

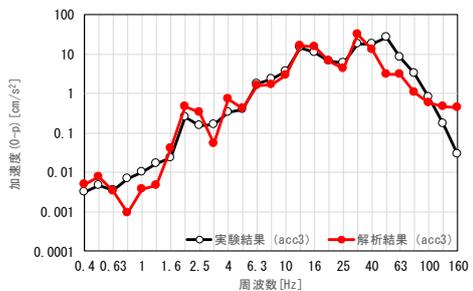


(b) acc3

図9 振動レベル



(a) acc1



(b) acc3

図10 1/3オクターブバンド分析結果

4. まとめ

本研究では、梁と床版の接合が乾式接合の ALC 床における振動特性を把握するため、模擬床を用いた実験を行った。さらに、FEM モデルを用いて、固有値解析及び歩行振動解析を実施し、模擬床の実測結果との比較を通して、FEM モデルの精度を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 模擬床の減衰定数は、実物件の床に比べて低く、また、受振者が存在する場合でも、減衰定数は向上するものの大きな乖離が見られる。これは、天井や外壁、間仕切壁などの二次部材が存在しないことが影響していると考えられる。
- (2) 剛体連結によって ALC パネルと梁の節点を分離し、剛体連結長さによる固定度の考慮を行った FEM モデルは、固有振動数と歩行振動時の VLT 及び 1/3 オクターブバンド分析結果において、実測結果と概ね一致することがわかった。これにより、梁と床版の接合状態を概ね再現できていることが示された。
- (3) 歩行振動時の振動レベルについては、最大値は一致するものの、歩行の一步ごとの振動の収束度に差が見られた。これには、改善の余地がある。

今後、実物件における歩行振動調査を行い、本報と同様に FEM モデルの精度を確認する。

参考文献

- 1) 上田周明：床衝撃試験方法および評価方法（JIS 案），日本建築学会 第 3 回環境振動シンポジウム 環境振動に関する基準および評価法，pp.9-14，1985.2
- 2) 松下仁士，長沼俊介，井上竜太，他：種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値，日本建築学会環境系論文集，第 81 巻，第 720 号，pp.153-162，2016.2
- 3) 鈴木秀三，藤野栄一，野口弘行：木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重の影響に関する実験的研究（第 2 報），日本建築学会構造系論文集，第 589 号，pp.137-142，2005.3
- 4) 岡日出夫，五十嵐信哉，山田聖志，他：ALC パネルに鋼板を接着した軽量サンドイッチ構造床版，第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.32-1~8，2009.11
- 5) ALC 協会：ALC パネル構造設計指針・同解説，2004

執筆者紹介



西井 康真
修士（工学）

ひとこと

床の不振動性は、住まう人の快適性を確保するための最低限の性能です。今後も解析技術を発展させることで、振動障害の事前予防に貢献していきます。