

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	中国式グリッドシステム天井の衝突現象に対する数値解析研究
Title(English)	Numerical Study on pounding behavior in CHN-US style ceiling
著者(和文)	李ミンフェイ, 佐藤大樹, 元結正次郎
Authors(English)	Minfuei Ri, Daiki Sato, Shojiro Motoyui
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 , , pp. 669-670
Citation(English)	, 構造 , , pp. 669-670
発行日 / Pub. date	2024, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

中国式グリッドシステム天井の衝突現象に対する数値解析研究

正会員      ○李 ミンフェイ\*  
 //          佐藤 大樹\*\*  
 //          元結 正次郎\*\*\*

非構造部材      グリッドシステム天井      衝突解析

1. はじめに

近年、地震時における中国式グリッドシステム天井（以下、中国式天井）の落下や損傷が人的被害および建物機能損失を招く事象が多く報告されている<sup>1)</sup>。中国式天井の施工現状によって、天井面と壁間に隙間が有しているため<sup>2)</sup>、地震時に衝突現象が発生し、下地材に損傷が生じる。そこで本報では、衝突解析において工学分野で広く用いられている Hertz モデルに着目し<sup>3)</sup>、このモデルを適用するにあたって必要な物性値を実験的に取得し、衝突挙動を高精度で再現し得るモデル化を提案することを目的とする。

2. 衝突実験

Fig.1 に示すように、小規模の中国式天井を試験体として衝突させる自由振動実験を実施した<sup>4)</sup>。試験体の変位 $u_c$  および加速度 $a_c$  をレーザー変位計と加速度計で計測する。Fig.2 は試験体に初期変位  $u_{c0} = 50 \text{ mm}$  を与えて、その初期変位を開放することによって得られた実験結果である。Fig.2(a)は試験体の変位 $u_c$ 時刻歴を基に、衝突が発生する直前後 ( $u_c = 0$ ) の変位で接線（赤線）の傾きは、 $n$  回目の衝突が発生する直前後試験体の速度  $v_{cin}^{(n)}$  および  $v_{cout}^{(n)}$  である。この二つの速度を用いて(1)式より反発係数  $e_d^{(n)}$  を求める。Fig.2(b)は試験体の加速度 $a_c$ 時刻歴を数値積分することにより得られる試験体の速度 $v_c$ の時刻歴である。このグラフによって、 $n$  回目の衝突が発生する直前後の速度  $v_{cin}^{(n)'}$  および  $v_{cout}^{(n)'}$  を求めて、(2)式より反発係数  $e_d^{(n)'}$  を計算する。Fig.3 は試験体衝突直前の速度と反発係数の関係を示す。この二つの手法で計算する反発係数はほぼ同じであることがわかる。また、反発係数は衝突体の速度に影響され、速度が  $50 \text{ mm/s}$  以上ではおおむね  $0.3$  となることがわかる。

$$e_d^{(n)} = - v_{cin}^{(n)} / v_{cout}^{(n)} \tag{1}$$

$$e_d^{(n)'} = - v_{cin}^{(n)'} / v_{cout}^{(n)'} \tag{2}$$

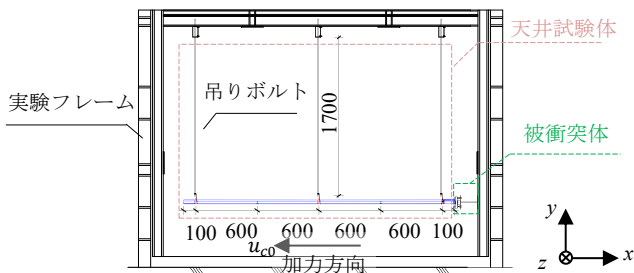
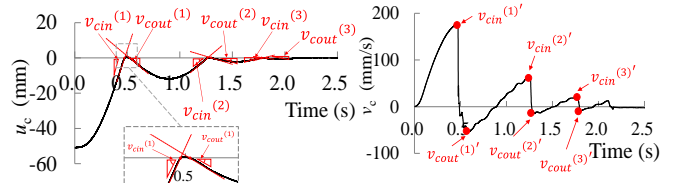


Fig.1 衝突実験 (単位: mm)



(a) 変位時刻歴 (b) 速度時刻歴  
Fig.2 衝突実験結果 ( $u_{c0} = 50 \text{ mm}$ )

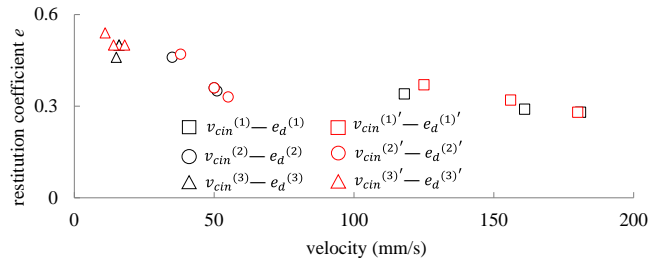


Fig.3 速度-反発係数関係

3. 衝突解析

3. 1 モデル概要

2節で述べた衝突実験を再現する解析モデルを説明する。再現解析モデルを Fig.4 に示す。図中の記号  $u_g$  は天井面と被衝突体間の初期隙間であり、 $K_c$ 、 $C_c$  は衝突試験体の水平剛性、減衰係数であり、 $M_c$  は衝突試験体の質量を表す。本解析モデルは(3)式で示している運動方程式で計算する。

$$M_c \ddot{u} + C_c \dot{u} + K_c u + F_c = 0 \tag{3}$$

ここで、 $F_c$  は衝突力を表す。また、衝突力は Hertz damp モデルで構築し、(4)(5)式で表す<sup>5)</sup>。

$$F_c = k_h u^{3/2} + c_h \dot{u} \tag{4}$$

$$c_h = \frac{8 k_h (1 - e_m)}{5 e_m \dot{u}_p} u^2 \tag{5}$$

ここに、 $k_h$  は衝突剛性、 $c_h$  は減衰係数、 $u$ 、 $\dot{u}$  は衝突体と被衝突体間の相対変位、相対速度、 $\dot{u}_p$  は衝突直前の相対速度、 $e_m$  は反発係数である。

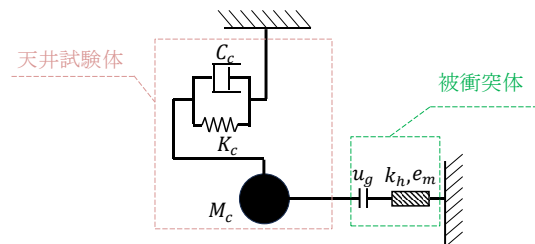


Fig.4 解析モデル

### 3. 2 解析諸元

解析諸元について、 $M_c$ は計測した試験体の質量を採用し、23.2 kg とする。 $C_c$ および $K_c$ は既往研究で実施した試験体を衝突させない自由振動試験で得た値を用いており、 $3.2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$  および  $0.3 \text{ N/mm}$  とする<sup>6)</sup>。初期隙間 $u_g$ は変位 $u_c$ 時刻歴の計測値を基に 0 とする。 $e_m$ は Fig.3 の実験結果を踏まえて、50 mm/s 以上で一定となるときの値 0.3 を採用する。衝突剛性 $k_h$ は試験体の衝突時の応答加速度に影響するので、Fig.5 は試験体の加速度 $a_c$ 時刻歴の解析と実験結果の比較である。衝突剛性 $k_h$ を試行錯誤的に与えて、 $200 \text{ N/mm}^{3/2}$  とする。諸パラメータが決めた後に、時間刻みを決める。衝突の時間は非常に短いので、解析の時間刻みもとても重要である。そこで、Fig.6 に示すように、時間刻みをパラメータとして、 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ ,  $0.001 \text{ s}$ ,  $0.0001 \text{ s}$ ,  $0.00001 \text{ s}$  の解析結果を比較した。このグラフによって、時間刻みは  $0.0001 \text{ s}$  以下になると十分精度を持つことを確認したから、今回の解析の時間刻みは  $0.0001 \text{ s}$  とする。

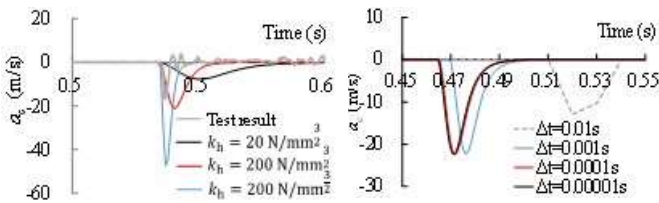


Fig.5 衝突剛性の影響

Fig.6 時間刻みの影響

### 3. 3 解析結果

Fig.7(a), (b)は試験体の変位 $u_c$ 時刻歴、Fig.8(a), (b)は試験体の加速度 $a_c$ 時刻歴、Fig.9(a), (b)は試験体の速度 $v_c$ 時刻歴、Fig.10(a), (b)は試験体が受ける衝突力 $F_c$ 時刻歴の解析と実験結果の比較である。(a)は初期変位  $u_{c0} = 50 \text{ mm}$ 、(b)は初期変位  $u_{c0} = 40 \text{ mm}$  の場合での結果である。いずれのグラフにおいても解析結果は実験結果をよく再現していることが確認できる。Fig.11(a), (b)は試験体の衝突力変位関係の解析と実験結果の比較である。(a)は初期変位  $u_{c0} = 50 \text{ mm}$ 、(b)は初期変位  $u_{c0} = 40 \text{ mm}$  の場合での結果である。これによって、実験で得られた衝突履歴も解析モデルで再現できる。

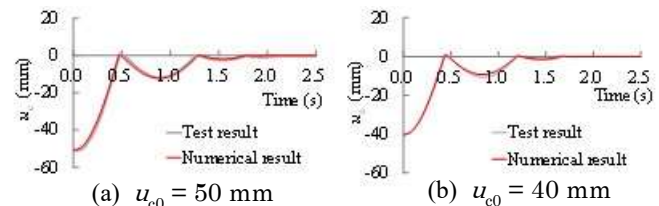


Fig.7 変位 $u_c$ 時刻歴

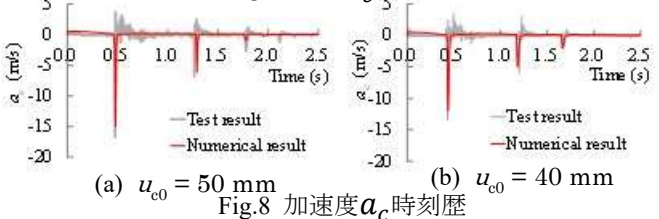


Fig.8 加速度 $a_c$ 時刻歴

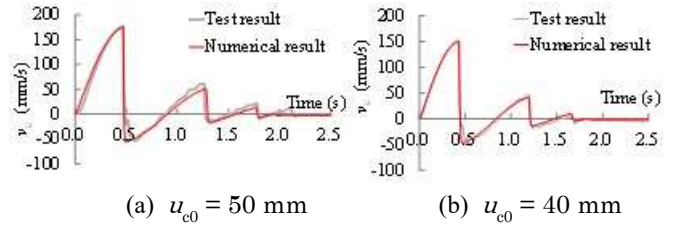


Fig.9 速度 $v_c$ 時刻歴

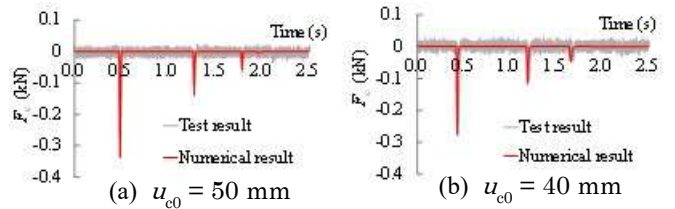


Fig.10 衝突力 $F_c$ 時刻歴

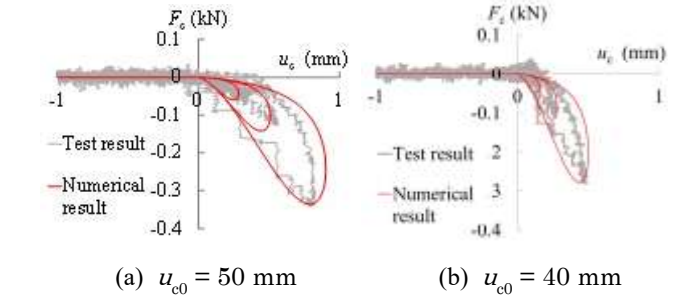


Fig.11 衝突力変位関係

## 4. まとめ

本研究では、中国のグリッドシステム天井が壁に衝突する際の復元力および減衰力と伸縮の関係等の基本特性を実験で把握した上で、再現解析を行い、Hertz モデルを中国式天井の衝突問題に適用することの有効性を示した。

### 参考文献

- 1) LI Qiqi, QU Zhe, XIE Quancai. Seismic damage characteristics and fragility of suspended ceilings in Chinese public buildings. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, 2019
- 2) Yong Wang, Huanjun Jiang, Shojiro Motoyui and Kazuhiko Kasai, Zhiyuan Qin, Youlu Huang. Study on seismic performance of suspended ceiling system with semi-free boundary condition. Engineering Structures Volume 275, Part A, 15 January 2023, 115208
- 3) Da Hai Zhao, Yong Liu, Hong Nan Li. Modified Hertz-damp model for base-isolated structural pounding simulation under near-fault earthquakes. Journal of Vibroengineering 15 May 2017
- 4) 李 ミンフエイ, 元結 正次郎, 佐藤 大樹. 「中国式グリッドシステム天井の物性値に関する実験的研究」, 日本建築学会学術講演会, pp899~900,2023
- 5) Kun Ye, Li Li and Hongping Zhu "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation" Earthquake Engng Struct. Dyn. 38, pp1135~1142, 2009
- 6) Minhui LI, Shojiro Motoyui, Yong Wang, Huanjun Jiang, Kazuhiko Kasai. Numerical analysis of suspended ceiling considering pounding behavior between ceiling surface and walls. Fifth International Workshop on the Seismic Performance of Non-Structural Elements(SPONSE) 2022

\*東京工業大学 博士学生

\*\*東京工業大学 准教授・博士(工学)

\*\*\*東京工業大学 名誉教授・工学博士

\* Doctoral Student, Tokyo Institute of Technology

\*\* Associate Prof, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng

\*\*\* Emeritus Prof, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng