

2013年度
国土交通省建築基準整備促進事業

調査番号P5：

高さが60mを超える遊戯施設の
主要な支持部分に係る構造方法に
関する検討

学校法人 日本大学

調査事項の提案に係る背景

1. 検証対象の特殊性

「60mを超える工作物」としての遊戯施設の安全性の検討

(1) 系の把握と評価

・ 3つの系

①客席を含む台車部分（以下「台車」）

②台車を支持する架構部分（以下「施設躯体」）

③施設躯体全体を支持する構造（以下「支持構造」）

各系の加速度の伝達や相互作用について、把握する必要がある

(2) 2つの振動の発生源

- ①建築物と同様の地震や強風
- ②台車の移動、すなわち質点の移動

- ・設計用指針や規準等が整備されていない
- ・台車の移動形態、速度変化が多様である
- 妥当性のある評価方法が確立されていない

(3) 振動の組合せ

それぞれの振動時の最大応答の単なる線形和によって評価することが通常行なわれている → (妥当性?)

2. 調査方法

(1) 台車から施設躯体に及ぼす加速度評価方法、及び設計用加速度の設定方法

- ① 模型実験による加速度応答の計測
- ② 時刻歴応答解析による評価
- ③ 実例を用いた加速度応答の計測

(2) 地震荷重と台車移動による2つの加速度応答の組み合わせ

- ① 模型を用いた振動台実験の実施
- ② 時刻歴応答解析による評価
- ③ 2つの振動の同時発生確率の評価

(3) 台車の移動による疲労の影響

- ① 実験と数値解析の結果に基づく検討方法の提案

3. U字型試験体の製作

(1) U字型試験体を使用することの基本的な考え方

- ・ 簡略モデルにより、2つの振動源に対する考え方の整理
- ・ 2次元系だが、ジェットコースターの特徴を踏まえたモデル
- ・ 台車が架構に与える影響について、解析面からの評価が容易
- ・ 理論解と実験結果の比較により、簡略モデルの知見が得られる

(2) 試験体の設計

- ・ 高さ60mの実規模U字型コースターを試設計



- ・ 振動装置の性能を考慮した相似則関係の設定



試験体写真

4. U字型試験体を用いた振動実験

(1) 目的

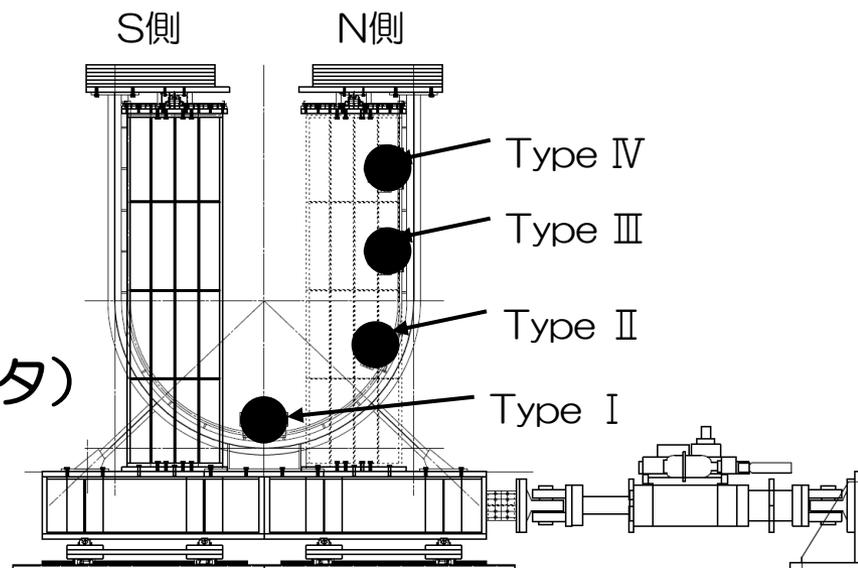
- ・台車の自由落下に伴う架構への影響の把握

(2) 実験方法

- ・台車の自由落下位置： Type II～IV

- ・計測点

- ①北側・南側錘部の3軸方向加速度
- ②同錘部の水平2方向相対変位
- ③水平反力 (X方向のアクチュエータ)



試験体設置概要

(3) 実験概要

【目的】

- ①台車から施設躯体（レール、レール支持躯体、支持構造等）に及ぼす加速度の評価方法、及び設計用加速度の設定方法に係る検討
- ②地震荷重と台車移動による2つの加速度応答の組み合わせに関する検討

【種類】

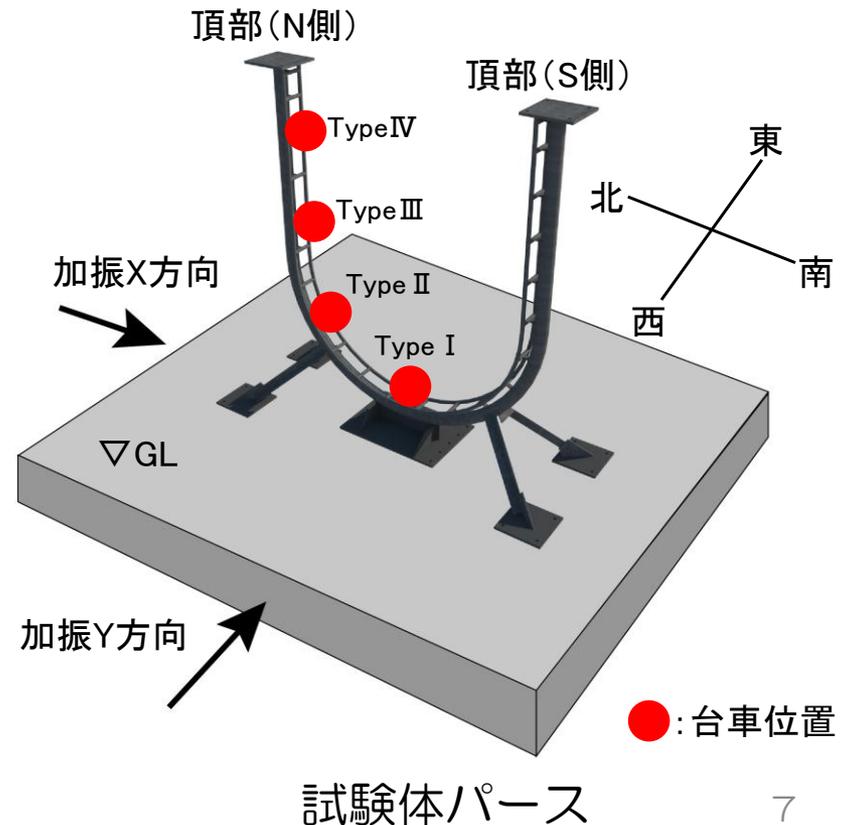
- ①台車の自由落下
- ②正弦波加振
- ③地震波加振

【パラメータ】 台車の位置（I～IV）

【正弦波加振】 入力周期：0.5～2.0[s]

【地震波加振】 入力波：4波

- ①El_Centro波
- ②TAFT波
- ③HACHINOHE波
- ④JMA-KOBE波



(4) 実験結果

1) 台車の固有周期の確認

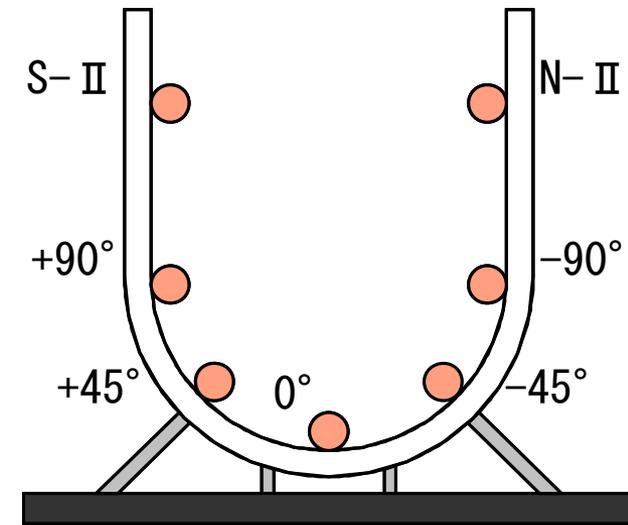
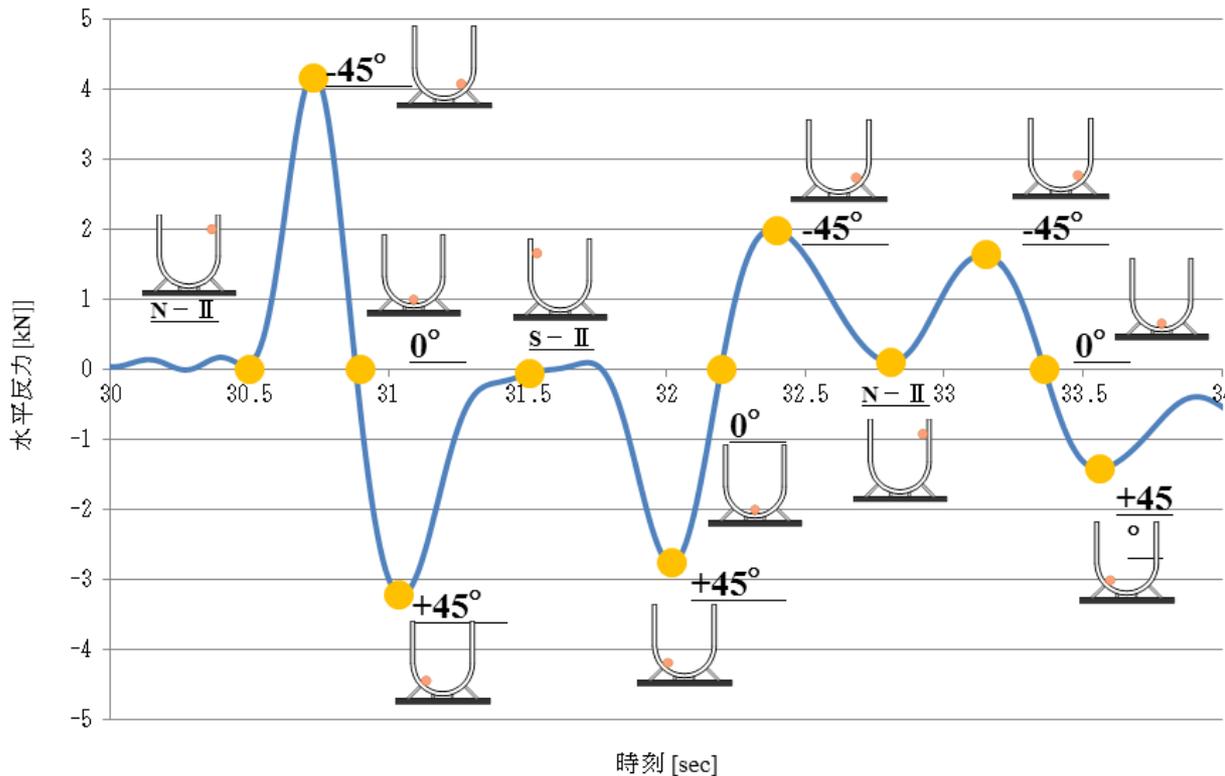
- ・落下位置に関わらず、概ね理論値と一致し、妥当性を確認
- ・自由落下時の台車の周期に関して、理論値で概ね模擬できることを確認

落下位置	Type II	Type III	Type IV
T_1 (sec)	2.14	2.20	2.19
T_2 (sec)	2.05	2.06	2.08
T_3 (sec)	2.03	1.95	2.04
T_{Avg}	2.07	2.07	2.10

理論値：2.03(sec)

2) 台車落下に伴う水平反力最大時の台車位置の特定

- ・ -45度の地点で最大。最下部では、反力が0となり、+45度の地点で再び最大。



台車位置の定義

水平反力と台車位置関係

(5) まとめ

- ・試験体頂部に付加した質量と台車の重量比が大きいいため、今回は加速度が上部に与える影響がほぼないことを確認
 - ※台車重量が大きい場合、影響が出る可能性あり
- ・台車落下による影響は、躯体の振動を誘発するような現象は認められなかった
 - ※台車の落下による周期と躯体の固有周期が一致する場合は、今後の検討が必要
- ・台車の落下により発生する慣性力の影響で、支柱材の基礎部にかかる力が発生
 - ※支柱材基礎の設計においては考慮が必要

5. 正弦波加振振動実験

(1) 目的

- ・ 共振曲線を作成し、卓越周期と応答倍率から試験体の固有周期と粘性減衰定数を同定する

→①台車固定モデルと②台車落下モデルをパラメータ

(2) 実験結果

- ・ 試験体の卓越周期は、
X方向： $T_x \doteq 0.975(\text{sec})$ ， Y方向： $T_y \doteq 0.950(\text{sec})$

- ・ 各Typeの粘性減衰定数 h は、Type1によらず一定

X方向： $h_x \doteq 0.025$ ， Y方向： $h_y \doteq 0.035$

→台車の位置や落下の有無は、試験体の振動特性及び応答特性に与える影響は小さい

(3) 解析結果（固有値解析結果）

- ・ 正弦波加振振動実験結果と近似

→台車の位置が、モデルの振動特性に与える影響は小さい

(4) 実験結果と解析結果の比較

- ・ 実験値と解析値：卓越周期及び最大応答倍率が近似
→構築した解析モデルの妥当性の検証
- ・ 台車固定時と自由落下時の実験値と解析値：卓越周期及び最大応答倍率にほとんど差異は無い
→台車の落下が試験体の振動特性に与える影響は、ほぼ無い
- ・ 台車の位置や落下の有無が振動特性及び応答特性に与える影響の把握
…「正弦波加振振動実験」と「立体複素固有値解析、時刻歴応答解析」
→台車がモデルの振動特性及び応答特性に与える影響は小さい

(5) まとめ

- ・ 台車の重量を頂部に付加させて設計する考え方は安全側の設計

6. 地震波加振振動実験

(1) 目的

- ・ レール支持躯体部に生じる動的応答の評価

(2) 方法

1) モデル

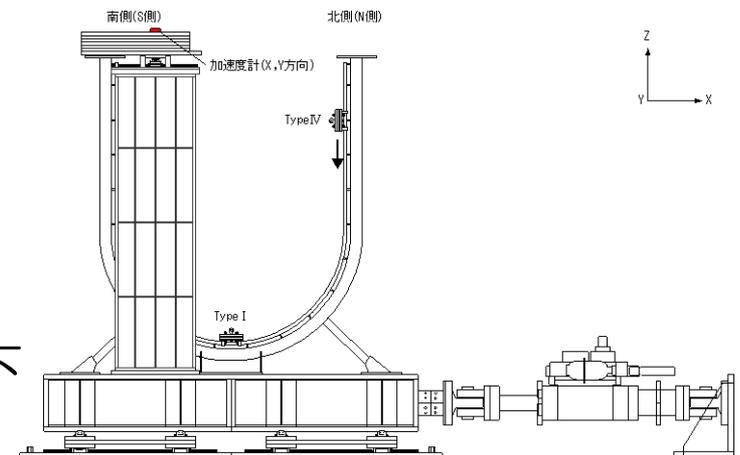
- ① 台車位置を固定したモデル (台車固定モデル)
- ② 台車が自由落下している状態におけるモデル (台車落下モデル)

2) 入力地震波

- ① El_Centro波
 - ② TAFT波
 - ③ HACHINOHE波
 - ④ JMA-KOBE波
- ・ 作成した地震波を1/20倍としたものを使用

3) 試験方法

- ・ 台車位置を固定したType I ~ IVに地震波を入力した状態
→ 北側から試験体の応答が最大となる時間付近で、台車を自由落下



試験体設置概要

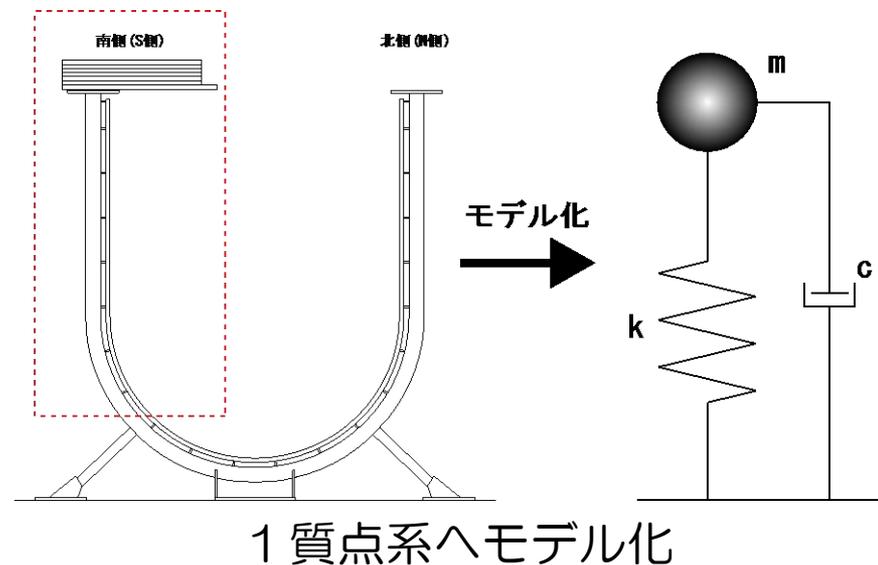
(3) 評価方法

1) 台車位置固定による地震波加振の評価

- ①各Typeの最大応答値による結果の検証
- ②フーリエ解析により応答倍率曲線をもとめ、正弦波加振実験との整合性を確認
- ③ARX (Auto-Regressive with eXogenous) モデル評価方法により、時系列上の粘性減衰評価および固有周期評価を行う

2) ARXモデル

- ・最小自乗法によって時刻歴の減衰定数を評価
→台車の落下が架構に及ぼす影響を把握



(4) 試験結果

- ・地震波加振実験の結果と時刻歴応答解析による結果がよい対応
→台車の位置の違いによる固有周期変化も評価できている
- ・台車位置が頂部にあるほど、固有周期が長くなる
- ・台車が落下した場合は周期変化が一瞬
→応答結果に大きな影響はないことが考えられる

(5) まとめ

- ・ Type I ~IVの「台車固定モデル」と「台車落下モデル」による応答の差は認められなかった
- ・台車の走行が躯体に及ぼす影響に関して、躯体の振動を誘発するような現象はみられなかった
→躯体の設計において、台車の重量を頂部に付加させて設計する考え方は安全側の設計である

7. U字型試験体の振動台実験結果の解析的評価

(1) 目的

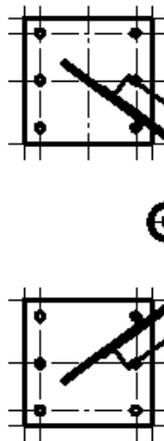
- ・ 台車の自由落下を評価した応答解析方法の提案

→ 「台車位置を固定した場合の時刻歴応答解析による応答結果」と「静的解析」を組み合わせた数値解析を行い、実験結果との整合性を検証

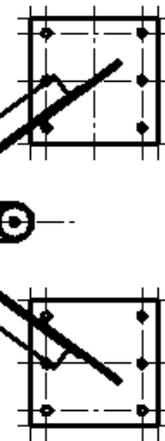
(2) 方法

- ・ U字型躯体を支持する支柱材の軸力値について比較検討

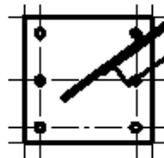
南西側支持材



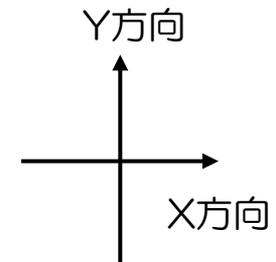
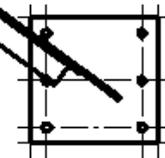
北西側支持材



南東側支持材



北東側支持材



試験体見下げ図

(3) まとめ

1) 長期荷重時Gと台車落下荷重Pの組み合わせ

- ・下式のように、安全率として、台車の自重を2倍程度みることで安全側の設計となる結果を得られた

$$\text{長期荷重} = G + W + 2.0 \text{ (割増係数)} \times P$$

※G：固定荷重 W：風荷重 P：台車重量

2) 短期荷重時（地震時）Gと台車荷重Pの組み合わせ

- ・次式の内、大きい方を設計荷重とする
- ・台車落下時には、台車の自重×3倍で安全側の設計となる

$$\text{(頂部固定時)} \quad \text{短期荷重} = G + K + P$$

$$\text{(台車落下時)} \quad \text{短期荷重} = G + K + 3.0 \text{ (割増係数)} \times P$$

※G：固定荷重 P：台車重量 K：地震荷重

※台車落下時のP：水平方向加速度が最大となる時の応力

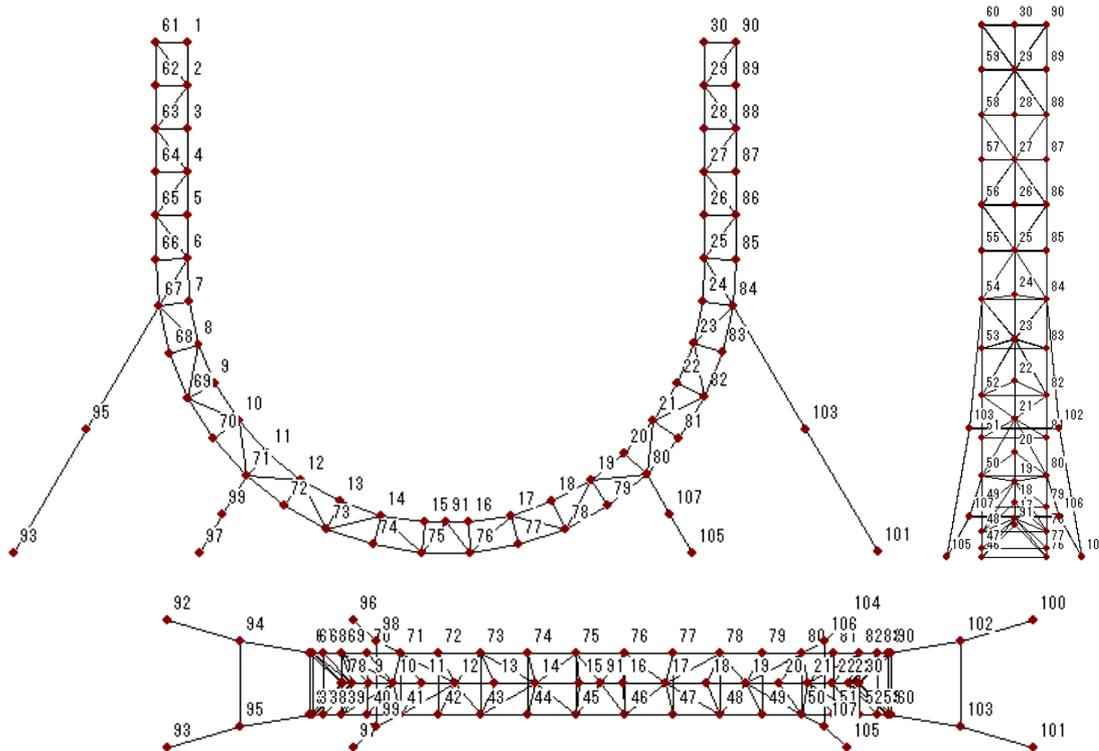
8. 実規模コースター（試設計モデル）の解析評価

(1) 目的

- ・ 試設計モデルによる設計荷重の組合せについての評価を行う
(検討方法は、U字型試験体と同様)

(2) 実験方法

- ・ 「実規模コースターの試設計概要」により、地震荷重と台車移動による2つの荷重の組合せ方について、前節の実験結果より検討



試設計モデル

- ・ 3次元フレームモデル
- ・ 部材は弾性
- ・ 内部粘性減衰定数： $h=0.01$ の剛性比例型
- ・ Type I ~ IVに相当する位置に台車質量2.81tonを付加し、時刻歴応答解析を実施

試設計モデル 3次元フレームモデル図

(3) まとめ

- ・試験体モデルでは，相似則を成立させるために，頂部に大きな集中質量を付加している
→台車の位置の違いによる応答の差は小さかった
- ・試設計モデルのように，躯体質量が分散されているような場合では，台車が頂部にあるほど，固有周期変化が大きくなることにより，応答値に影響を及ぼす
- ・頂部に台車がある場合は，応答変動が大きくなる
- ・台車の走行による躯体側の影響は，台車の移動を評価できる時刻歴応答解析手法を開発したうえで，評価する必要がある

9. 台車の移動による疲労が構造物の耐力低下に及ぼす影響の検討方法

(1) 目的

- ・ 常時の台車移動や地震及び風等の振動に伴う応力振幅や繰り返し回数等の評価のための、基本的な評価方法の提案

(2) 地震及び風等の外乱振動による耐力低下の評価方法

- ・ 地震や風等の外乱入力に対し、繰り返し荷重をうける部材に生じる応力範囲は、時刻歴応答解析と静的解析の組合せにより評価できる

→ 鋼構造設計指針等に示されている疲労評価を適用できる

(3) 常時における台車の移動に伴う耐力低下の評価方法

- ・ 常時におけるU字型モデルの場合では、台車の走行による応力と繰り返し回数が把握できる
→疲労特性は簡単に評価できる
- ・ ジェットコースターのように、短い時間内で台車が通過するような場合は、台車の移動に伴う慣性力 F が求められれば、自由振動とみなせる
- ・ 対象となる部材は固有周期で振動することが考えられ、部材の粘性減衰定数を1%程度と考えれば、繰り返し回数や応力は評価できる

(4) まとめ

- ・ 台車の移動に伴う応答に着目した疲労の評価に関して、ガイドラインを提案した
- ・ 通常のジェットコースターのように高低差が数多くあり、周期の長い部分と短い部分の組合せからなる形態に対して、本節で提案するような方法の数値解析手法の確立と、その検証実験により、台車の移動に伴う疲労評価を検証する必要がある

10. 2つの振動の同時発生確率の評価

(1) 評価方法

- ①地震荷重の発生確率の算定（J-SHIS((独)防災科学技術研究所)による)
- ②台車の運用情報の整理（運行頻度のリサーチ等による）
- ③2つの振動の同時発生確率の評価

(2) 評価結果

- ・台車が稼働している時間の割合：38%～56%
- ・30年地震発生確率は下表のとおり

30年地震発生確率

地域	30年地震発生確率			
	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上	震度6強以上
山梨県 富士吉田市	92.7%	75.1%	55.8%	26.2%
千葉県 浦安市	100.0%	99.3%	71.7%	13.1%
神奈川県 横浜市	99.8%	89.8%	45.8%	8.3%

(3) まとめ

- ・今後30年での震度5弱の地震が発生する確率は、対象の3地域とも90%以上
- ・2つの振動が同時に発生する確率は台車の稼働頻度に大きく依存する
- ・震度6強以上の地震発生確率は、地域間で大きなバラつきが見られる
→より広範囲を対象とした多地点での評価が必要

1.1. 実例を用いた加速度応答計測実験

(1) 測定概要

- ・コースターの動的応答を把握するため、ピエゾ変位センサと3軸加速度センサにより、振動を測定
- ・サーフコースターの構造フレーム部にボルト型センサ、加速度計を設置



○：取り付け位置

八景島シーパラダイス・サーフコースター



レール側

ピエゾ変位センサと3軸加速度センサの取付け状況



支柱側

(2) 取付け方法

- ・取付け位置は、最終旋回後の降下部のコースターレール支えパイプ部と、その脇のコースター支柱部の2箇所に取り付け、同時刻のデータを取得

(3) 測定方法

①比較測定：「加速度センサ」と「ピエゾ変位センサ」を同位置に設置

②連続測定：気温（測定時刻）の違いや特異なデータを調査

（土・日（営業時間：10時から21時）に測定し、月曜日に撤去）

(4) まとめ

- 1) ピエゾ変位センサにより大型構造物の特性変動を高精度で検出可能
→変位センサの信号から検出された特性変動からその場所と自由度が特定できれば、軌道や躯体構造の損傷や締結部の摩耗や弛緩の早い段階での検知が可能
- 2) 軌道支持構造の動的応答から乗物の走行性能の変動も監視可能
→平常時の始業・終業点検に併せて、構造躯体の動的応答モニタリングによる乗物自体の健全性評価にもつなげられる
- 3) コースター構造躯体は複雑な周波数応答特性を示すが、乗物への乗客数影響などの定性的な変動は検出可能
→それぞれの遊戯施設の荷重履歴をデータとして蓄え、構造躯体の劣化診断に関連づけられる可能性あり

今年度の検討成果[1]

1. U字型試験体を用いた、正弦波加振及び地震波加振振動実験

- (1) U字型モデル設定時の縮尺率の妥当性
- (2) 数値解析結果と実験結果との比較による、数値解析手法の妥当性の検証

2. 台車位置を固定状態でパラメータとした実験結果

- (1) 最上部に台車が位置している場合、架構に最大応答が生じることが把握され、設計時の検討事象として重要な位置づけにあることの基本的知見を得た
- (2) 上記の性状は数値解析でも確認されている

3. 台車の自由落下実験

- (1) 振動台を固定した状態で台車を自由落下したときの水平反力の測定値より、理論値とほぼ同等の性状が得られた
- (2) この実験に伴い、水平反力は円弧部45度位置で最大になる性状が得られた。本結果は、理論値でも同様の結果が得られている

今年度の検討成果[2]

4.台車の自由落下と正弦波加振実験

- (1) 台車の自由落下に伴う加速度応答は、地震波による加速度応答に比べると約10%程度
 - (2) 静的な荷重評価に伴う台車の荷重（積載荷重 P ）の値
 - ・長期：積載荷重 P の2倍
 - ・短期：①頂部： P 、②落下中（慣性力大）： $P \times 3$ 倍
- ①,②の応答の大きな条件で評価すると、静的な荷重評価に基づく設計でもほぼ同等の結果が得られることを把握

5.地震時の応答に着目した疲労の評価に関するガイドラインを提案

6.地震波による加振と台車の稼働状態の組合せに関する同時発生確率について、評価方法のガイドラインを提示

7.ピエゾ変位センサを用いた加速度応答計測実験により、客席の加速度に応じた主要な支持部分への劣化等の影響を検知できる可能性を提示

当初想定していなかった事項

- (1) 実験における台車の振り子状の運動の時間が、摩擦または曲げモーメントの影響により想定より短くなった
→これにより、地震波加振と台車の自由落下の組合せに関して、実験が困難となった
- (2) 台車の自由落下に伴う数値解析が、当初想定したものより困難であることが把握され、数値解析を利用した評価が得られなかった
- (3) 以上の(1), (2)に関する想定外の事項に関しては、他の実験ならびに数値解析により十分な性状の評価が可能であり、予定していた設計上の知見は得られた

本調査における課題

- (1) 地震荷重と台車の移動による2つの加速度応答に関して、ある程度の評価は得られたものの、他の形状のジェットコースター並びに台車の質量の増大をパラメータにする検討が必要である
- (2) 通常のジェットコースターのように高低差が数多くあり、周期の長い部分と短い部分の組合せからなる形態に対して、レールによる頂部の変位拘束によっては長周期の部分だけでなく、短周期の部分で応答が大きくなる場合も考えられる
- (3) 地震波と台車の動きの同時発生確率について、それぞれの確率分布をさらに適正に設定する必要がある