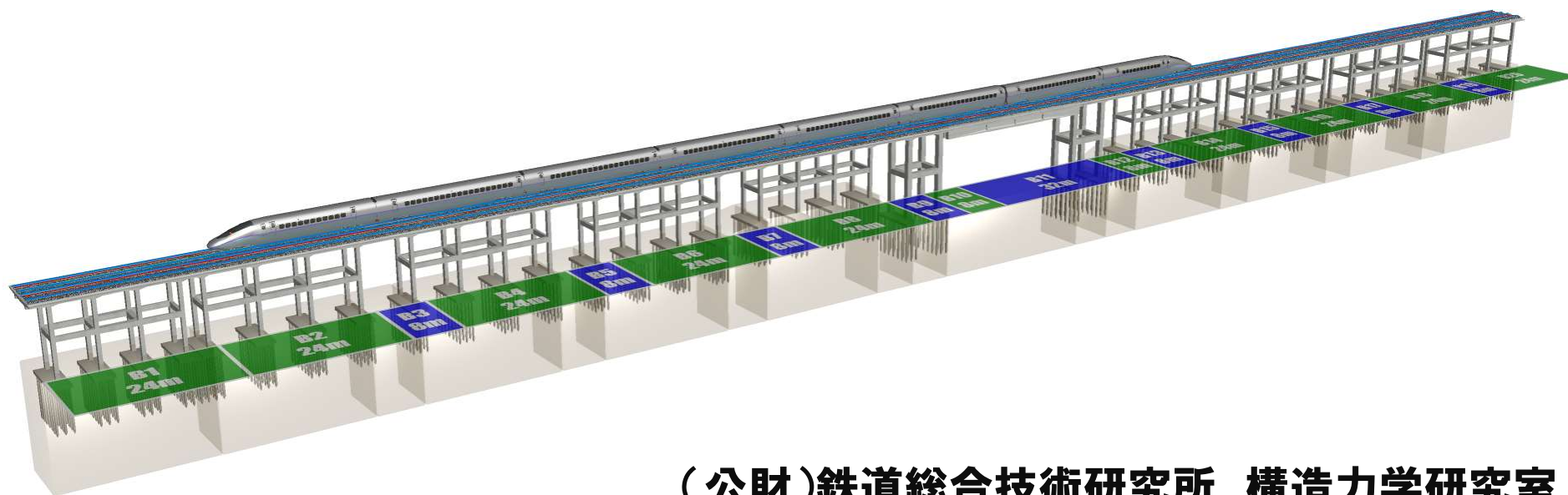


鉄道RC高架橋相互の地震時繰り返し衝突 を考慮した耐震設計法

地震工学委員会 2020年度 第5回研究会 ～土木学会論文奨励賞 受賞講演～



(公財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室
徳永 宗正

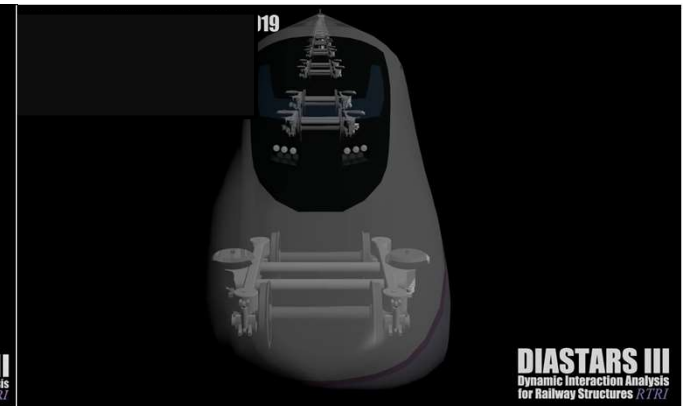
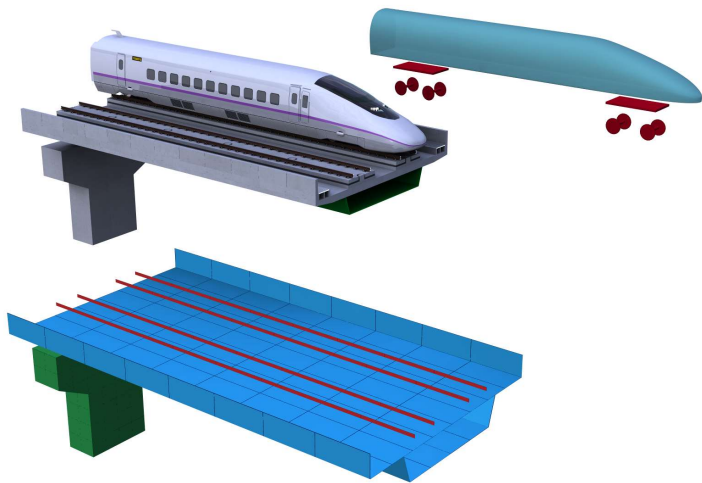
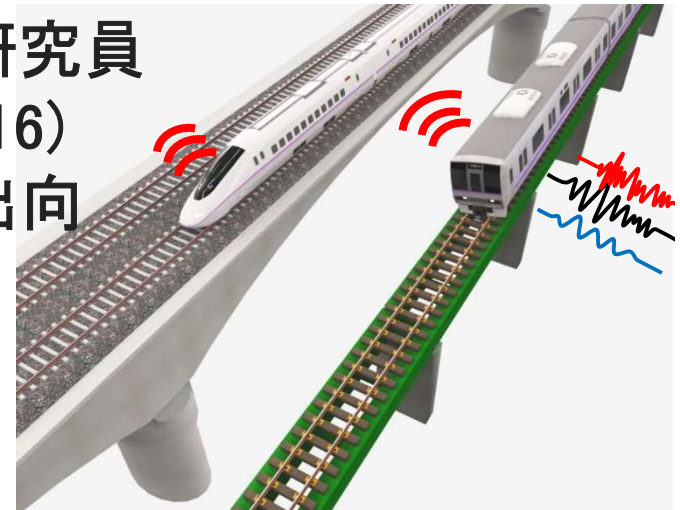


Railway Technical Research Institute

自己紹介

徳永宗正

- ・公益財団法人 鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部 構造力学研究室 主任研究員
- ・大阪大学大学院 修士課程(2009) 博士(2016)
- ・四国旅客鉄道株式会社, ミラノ工科大学 出向
専門
- ・構造工学, 振動工学
→耐震工学, 橋梁設計, 鉄道力学



対象論文

「鉄道RC高架橋相互の地震時繰り返し衝突を考慮した耐震設計法」
(土木学会論文集A1(構造・地震工学) Vol.74,No.1,pp.173-185,2018.)

■研究期間

2012/4～2013/03 2年間

■論文投稿

受付日: 2017/07/24

J-STAGE公開日: 2018/04/20

論文奨励賞受賞: 2020/05/06

■受賞講演

2021/3/21

J-STAGE 資料・記事を探す J-STAGEについて ニュース&PR サポート

土木学会論文集A1 (構造・地震工学)

資料トップ 巻号一覧 この資料について

J-STAGEトップ / 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) / 74巻(2018)1号 / 書誌

和文論文

鉄道RC高架橋相互の地震時繰り返し衝突を考慮した耐震設計法

徳永 宗正, 曾我部 正道

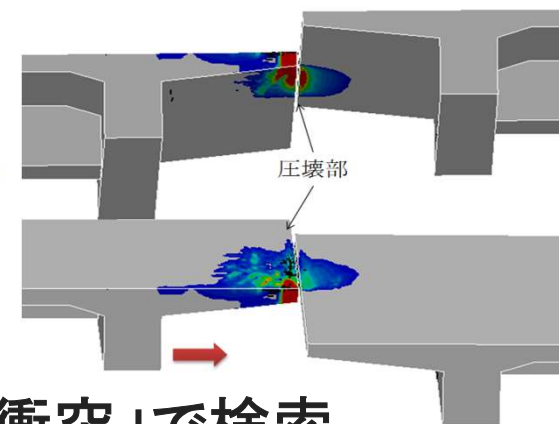
+ 著者情報

ジャーナル フリー

2018年74巻1号p.173-185

DOI <https://doi.org/10.2208/jscejsee.74.173>

+ 詳細



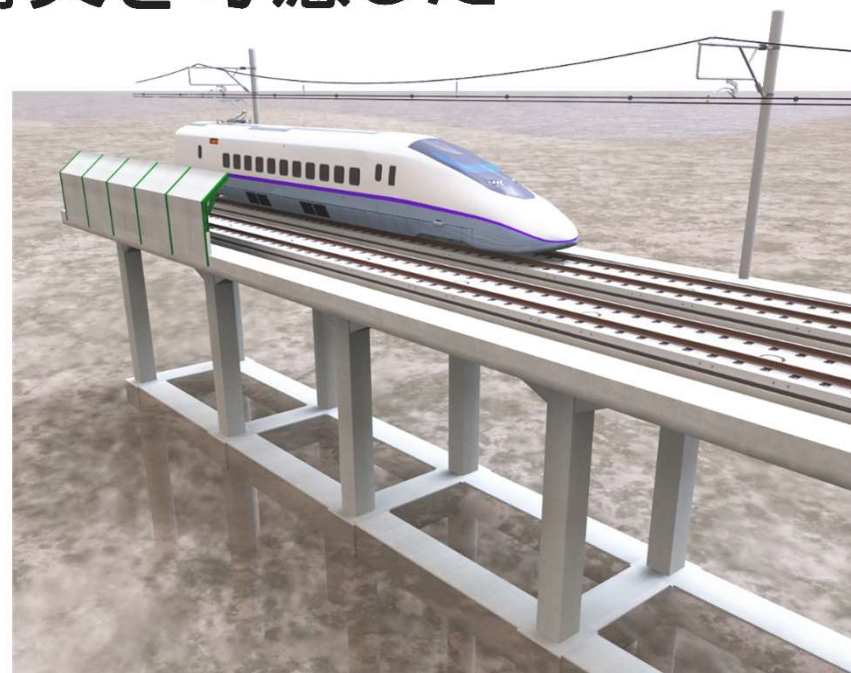
「地震時繰り返し衝突」で検索



Railway Technical Research Institute

発表内容

- 1章. はじめに(研究の背景)
- 2章. 検討手法
- 3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価
- 4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価
- 5章. まとめ



発表内容

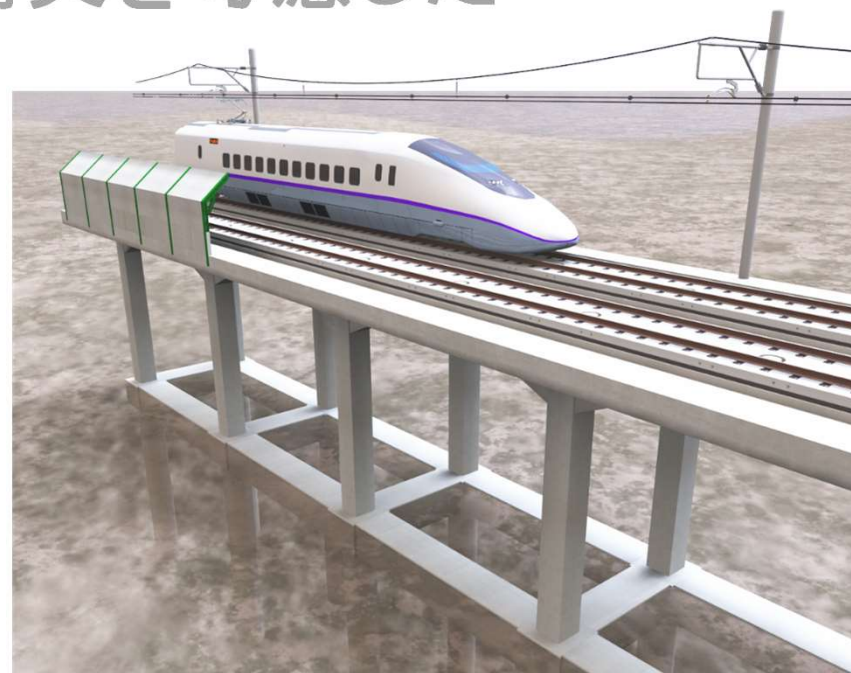
1章. はじめに(研究の背景)

2章. 検討手法

3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価

4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価

5章. まとめ

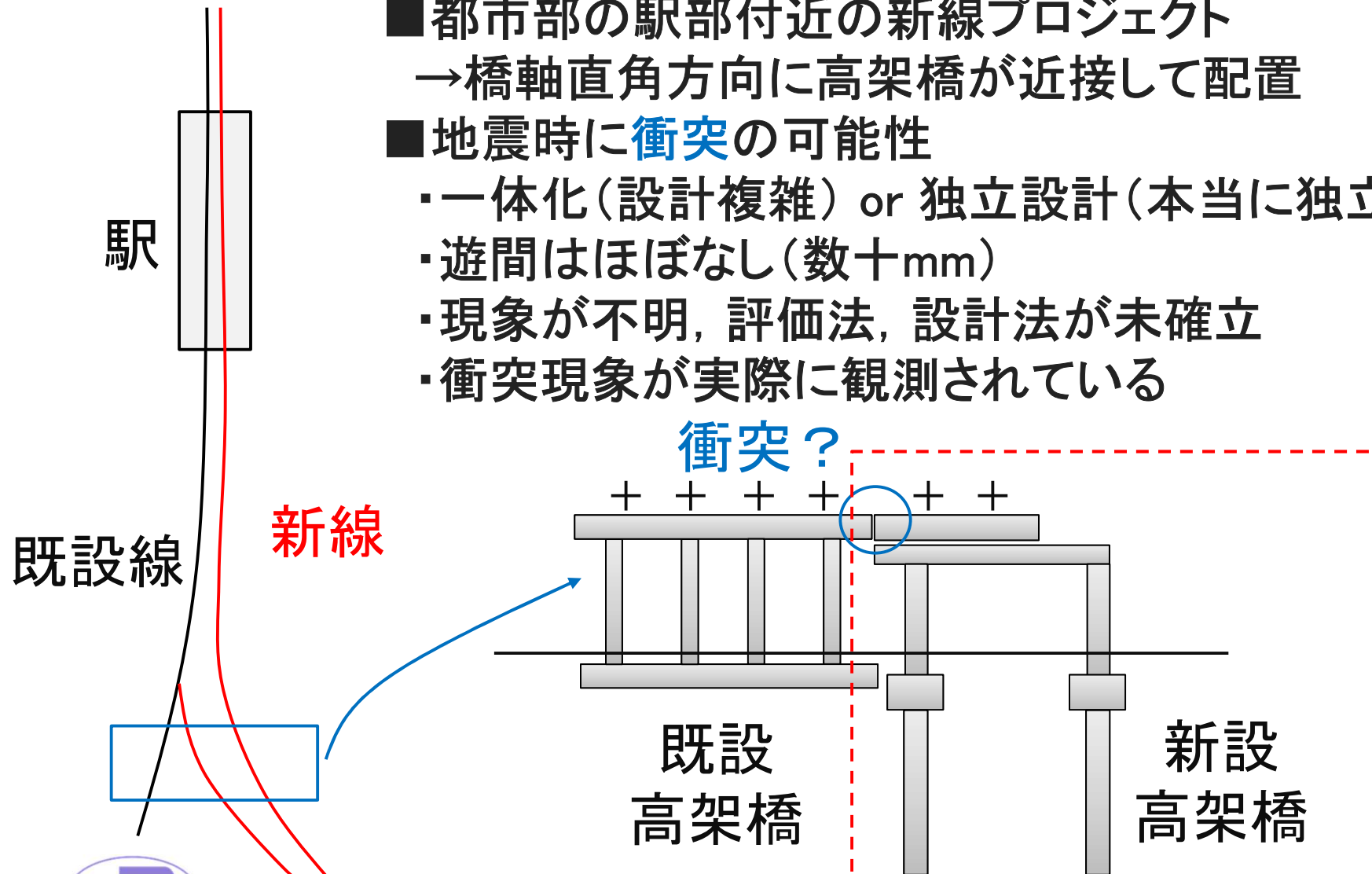


はじめに 社会的背景

- 都市部の駅部付近の新線プロジェクト
→橋軸直角方向に高架橋が近接して配置

- 地震時に**衝突**の可能性

- ・一体化(設計複雑) or 独立設計(本当に独立?)
- ・遊間はほぼなし(数十mm)
- ・現象が不明, 評価法, 設計法が未確立
- ・衝突現象が実際に観測されている



はじめに 社会的背景

■具体的な検討事例

土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度)

隣接するラーメン高架橋を連結した構造の動的応答特性について

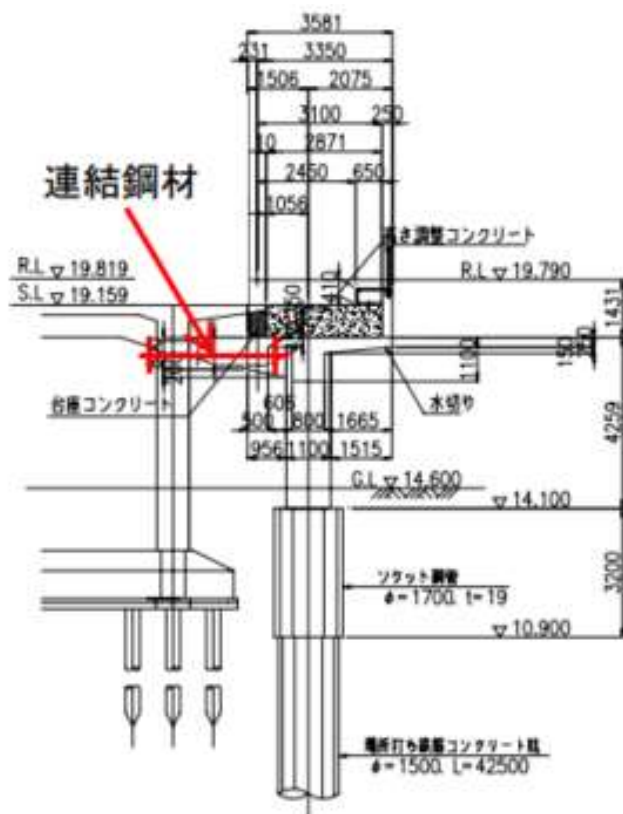
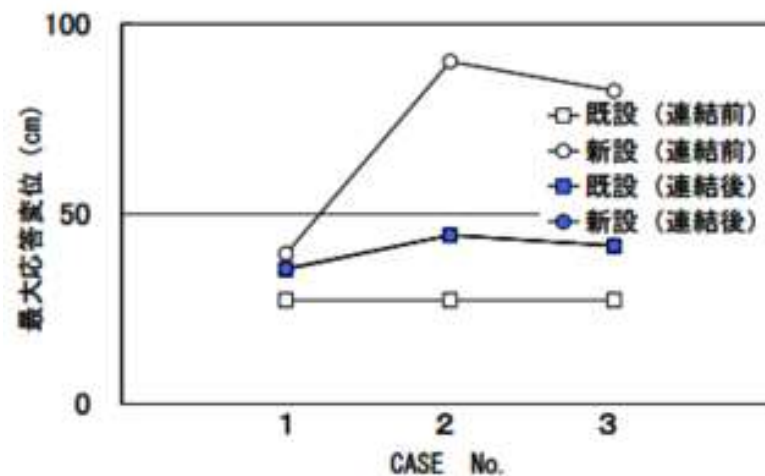


図-1 検討対象構造物例

東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○渡部 太一郎
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 堀田 智弘
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 有光 武
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 津吉 毅



はじめに 研究背景

■ 接触問題の解析

- ・ 鉄道力学研究部 構造力学研究室
- ・ 車両/構造物の動的相互作用解析
(自作プログラム) → 車輪/レールの接触問題
- ・ 脱線後の車両走行 (LSDYNA)
→ 車輪とまくらぎ等の接触問題

車輪と軌道部材の衝撃解析法



図1 実験状況

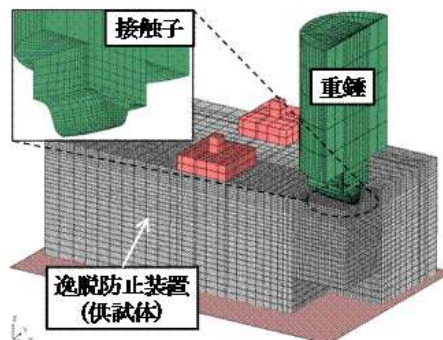
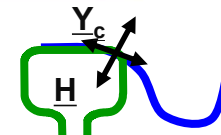
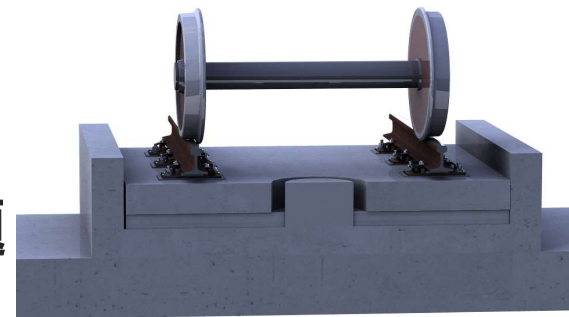
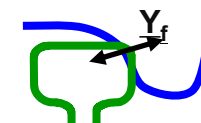


図2 解析モデル

Interaction Before Derailment

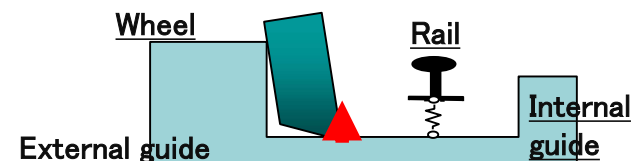
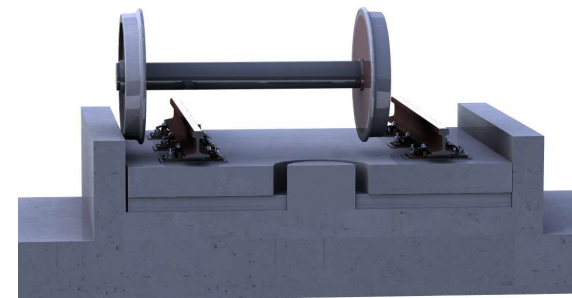


Hertz spring & Creep Force



+Flange force

Interaction After Derailment



Impact force



はじめに 先行研究

■ 建築分野: ビルの地震時衝突問題

EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 16, 443-456 (1988)

POUNDING OF BUILDINGS IN SERIES DURING EARTHQUAKES

STAVROS A. ANAGNOSTOPOULOS*

Department of Civil Engineering, University of Patras, (26110) Patras, Greece

SUMMARY

A simplified model of several adjacent buildings in a block is used to study the pounding of such buildings due to strong earthquakes. Considerable structural damage and even some collapses have sometimes been attributed to this effect. Each structure is modelled as a S.D.O.F. system and pounding is simulated using impact elements. A parametric investigation of this problem shows that the end structures experience almost always substantial increases in their response while for 'interior' structures the opposite often happens. This may explain why high percentages of corner buildings have collapsed in some earthquakes.



Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd
 Paper No. 2108. (quote when citing this article)
 Eleventh World Conference on Earthquake Engineering
 ISBN: 0 08 042822 3

BUILDING POUNDING RE-EXAMINED: HOW SERIOUS A PROBLEM IS IT?

S. A. ANAGNOSTOPOULOS

Department of Civil Engineering, University of Patras
 26500 Patras, Greece

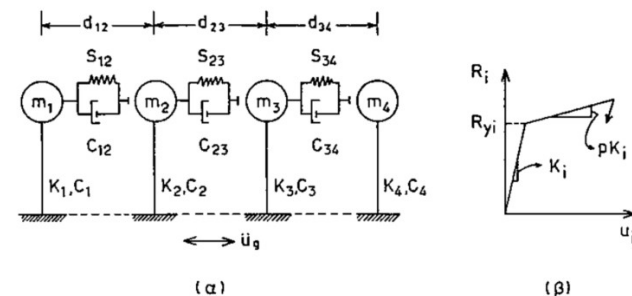


Figure 2. Idealization of several adjacent structures

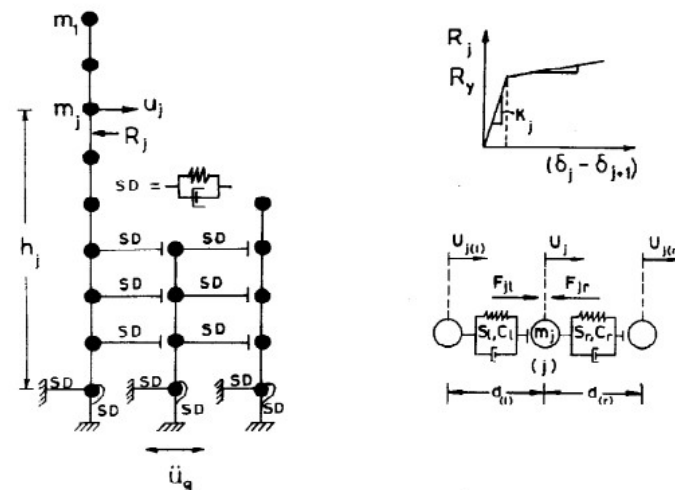


Fig. 1: Idealization of adjacent buildings.



はじめに 先行研究

■ 建築分野: ビルの地震時衝突問題

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第582号, 47-55, 2004年 8月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 582, 47-55, Aug., 2004

A SIMPLIFIED METHOD TO PREDICT PEAK VALUE AND TREND OF SEISMIC RELATIVE MOTION BETWEEN ADJACENT BUILDINGS

地震時における隣接建物間の相対変位の最大値やその傾向の簡易予測法

Kazuhiko KASAI* and Binh T. TRAN**
笠井和彦, チャン タン ビン

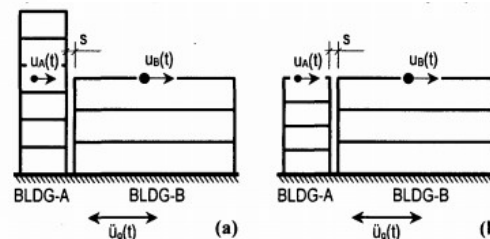


Figure 1. Relative Displacement of Adjacent Buildings.

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第610号, 65-74, 2006年12月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 610, 65-74, Dec., 2006

SPECTRUM-BASED PREDICTION RULE FOR PEAK STRUCTURAL RESPONSES DUE TO SEISMIC POUNDING

(Part 1 SDOF systems pounding against rigid structures)

スペクトルに基づく地震時構造衝突の最大応答予測法
(その1 剛構造に衝突する一質点系の場合)

Kazuhiko KASAI* and Binh T. TRAN**
笠井和彦*, チャン タン ビン

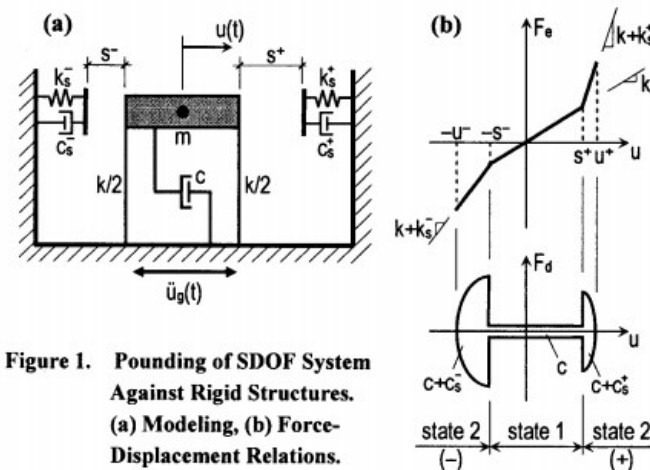


Figure 1. Pounding of SDOF System Against Rigid Structures. (a) Modeling, (b) Force-Displacement Relations.



Railway Te

はじめに 先行研究

■土木分野：橋りょうの橋軸方向地震時衝突問題

土木学会論文集 No. 661/I-53, 251-264, 2000. 10

桁間衝突現象のモデル化に関する一考察

梶田幸秀¹・西本安志²・石川信隆³・香月智⁴・渡邊英一⁵

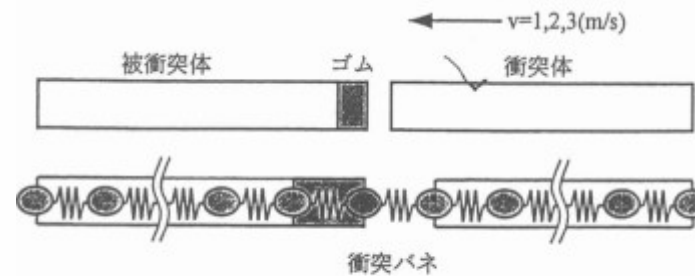


図-14 パネー質点系モデル

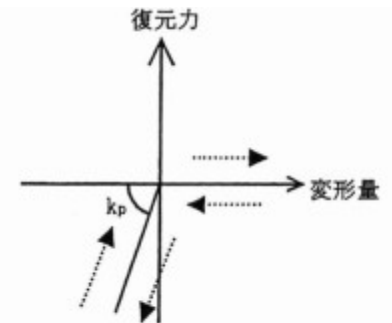


図-13 衝突パネの復元力モデル

構造工学論文集 Vol.53A(2007年3月)

土木学会

桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究

A fundamental study on the damage evaluation of bridge abutment and the characteristics of impact spring element by rounding effect

玉井宏樹*, 園田佳巨**, 後藤恵一***, 梶田幸秀****, 濱本朋久*****
Hiroki TAMAI*, Yoshimi SONODA**, Keiichi GOTOU***, Yukihide KAJITA****, Tomohisa HAM*****

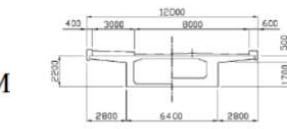


図-2 解析対象橋梁断面図 (単位: mm)

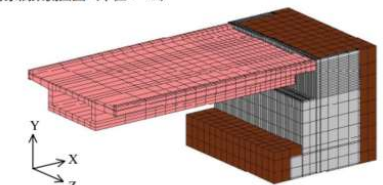


図-3 解析モデル

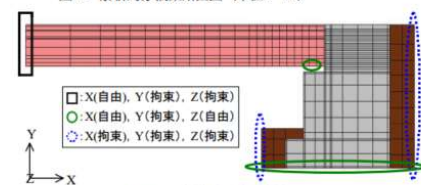


図-4 各節点の拘束条件

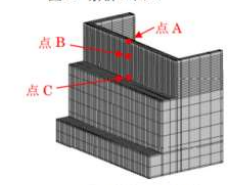


図-5 変位の出力節点



はじめに 目的

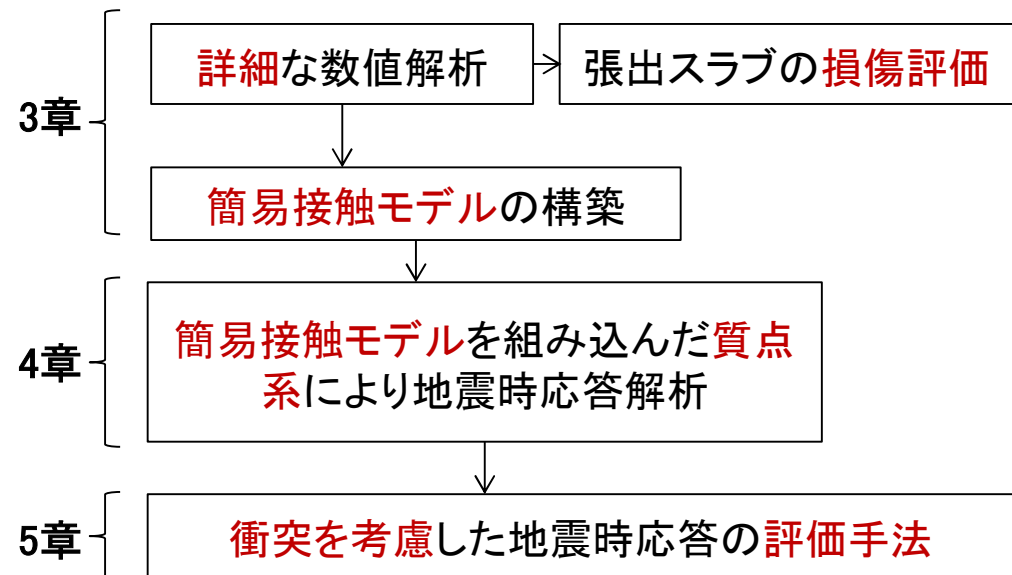
■課題

- ・張出スラブのように比較的部材厚が薄く変形や損傷が発生しやすい部材相互の衝突は、過去に検討なし
- ・衝突損傷に伴うエネルギー損失不明
- ・長時間に亘る地震動継続時間において、繰り返し発生するマルチスケール問題を効率よく解析する手法はなし



■目的

鉄道RC高架橋相互の地震時繰り返し衝突を考慮した耐震設計法の提案



発表内容

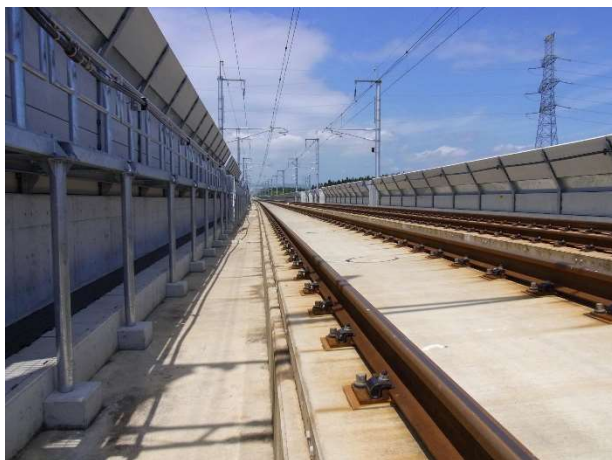
1章. はじめに(研究の背景)

2章. 検討手法

3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価

4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価

5章. まとめ



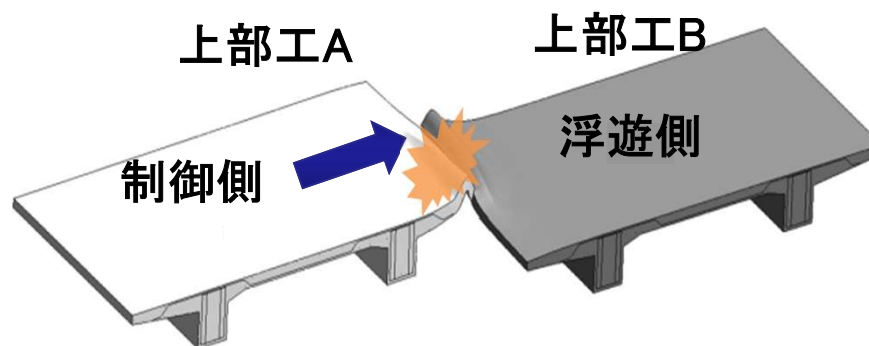
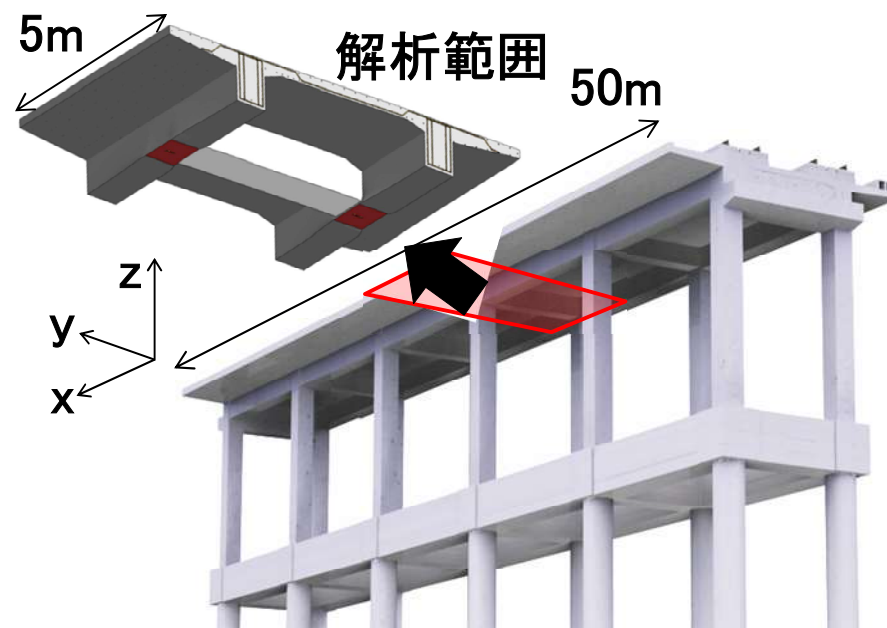
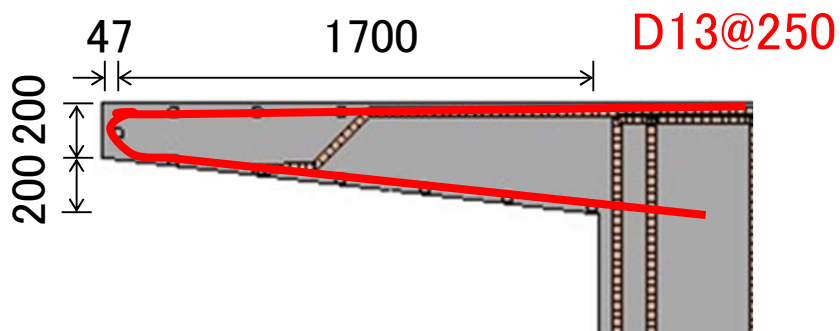
対象構造物 詳細解析概要

対象構造物



調整桁式ラーメン高架橋(照査例)

張出スラブ



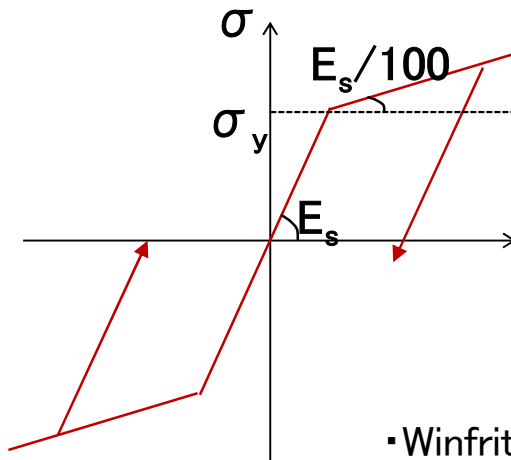
詳細解析方法1

解析モデル

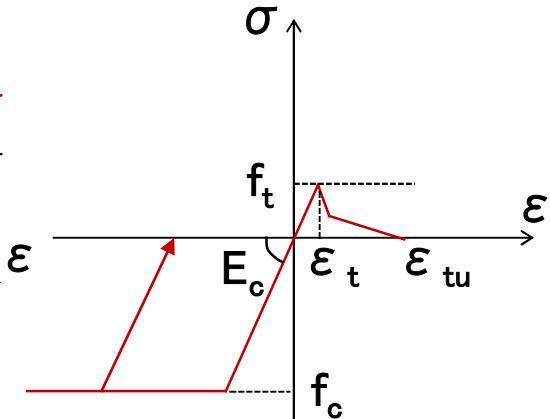
- コンクリート:
弾塑性ソリッド要素
(30mm, 8節点, 1積分点)
- 鉄筋:
弾塑性梁要素
(30mm, 2節点, 4積分点)

材料モデル

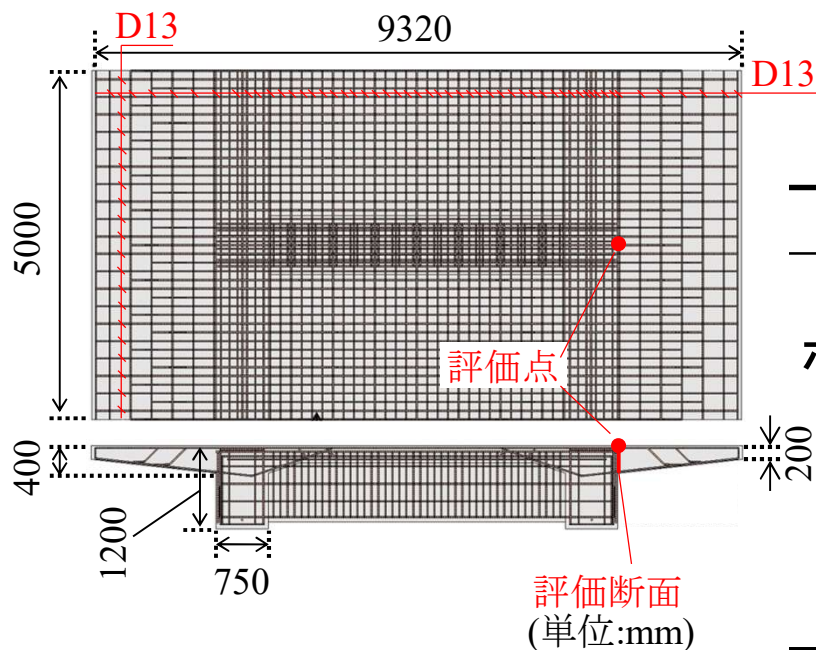
鉄筋要素



コンクリート要素



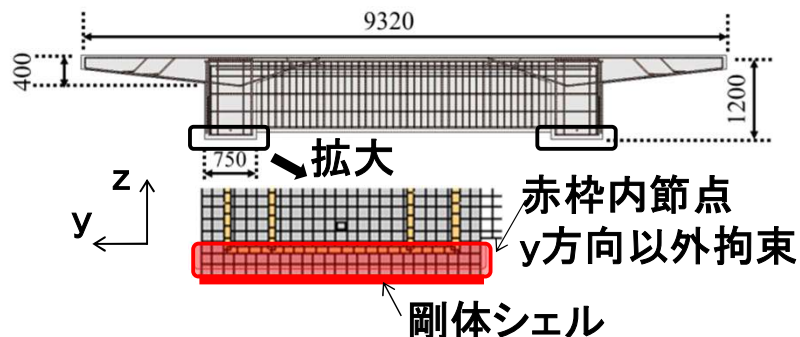
- ・Winfrithコンクリートモデル(LSDYNA)
- ・Otossenの破壊基準
- ・ひずみ速度効果を考慮



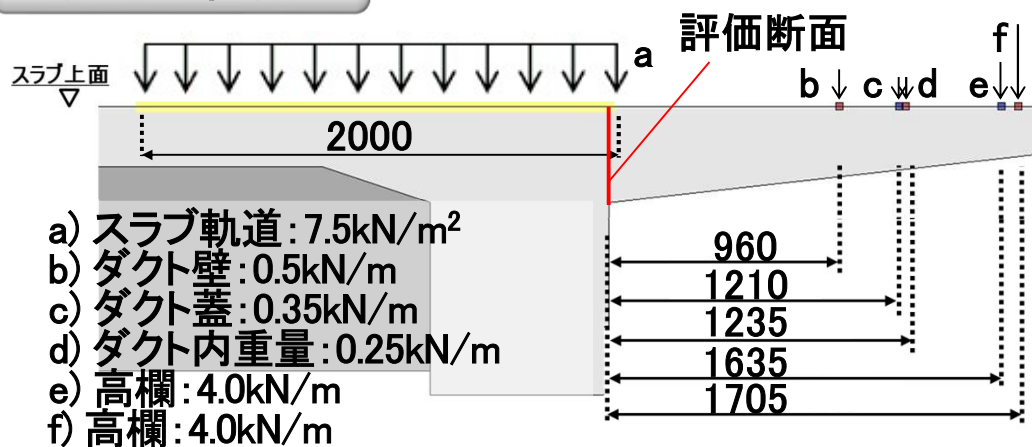
		単位	コンクリート	鉄筋
単位重量	ρ	(kN/m^3)	23	77
ポアソン比	γ		0.2	0.3
弾性係数	E_c, E_s	(N/mm^2)	26500	200000
圧縮強度	f_c	(N/mm^2)	27	-
引張強度	f_t	(N/mm^2)	2.1	-
降伏応力	σ_y	(N/mm^2)	-	345

詳細解析方法2

境界条件



荷重条件

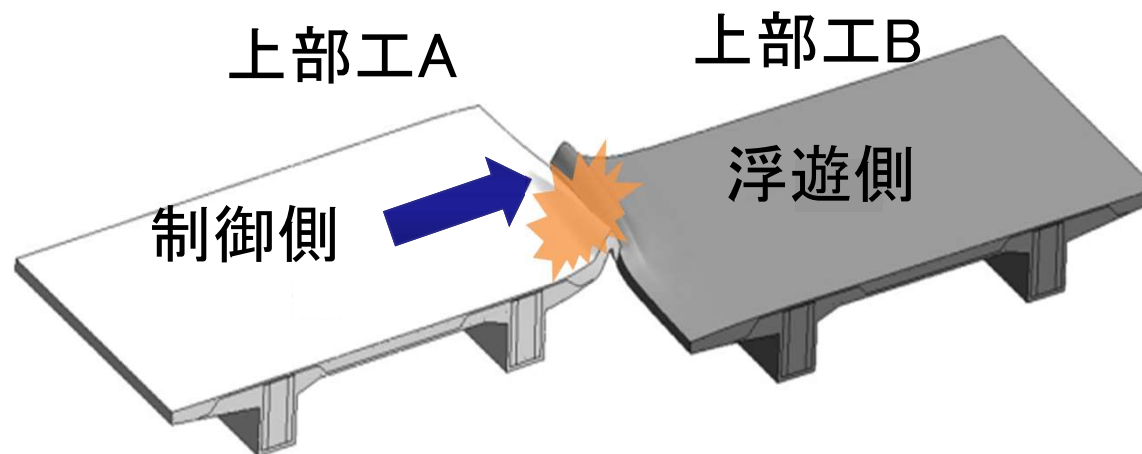


解析環境

- LS-DYNA (ver.971d)
- DELL Precision T7600
- CPU:2.30GHz Intel Xeon
- メインメモリ:32GB
- 節点数 1198358
- 梁要素数 122118
- ソリッド要素数 861336
- 0.1秒間の接触解析
- 10時間程度/1ケース

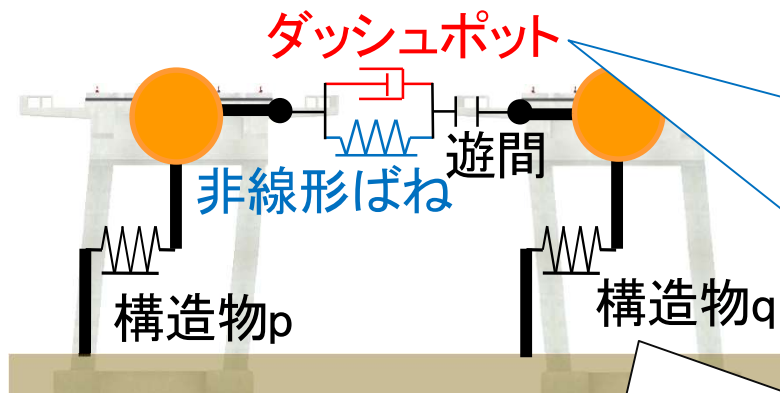


詳細解析ケース



衝突角度 θ_0 (rad)		衝突速度 v_0 (m/s)
$\theta_0 = 0$	$\theta_0 = 0.005, 0.01$	$v_0 = 0.2, 1, 2, 3, 5$

■ 計15ケース



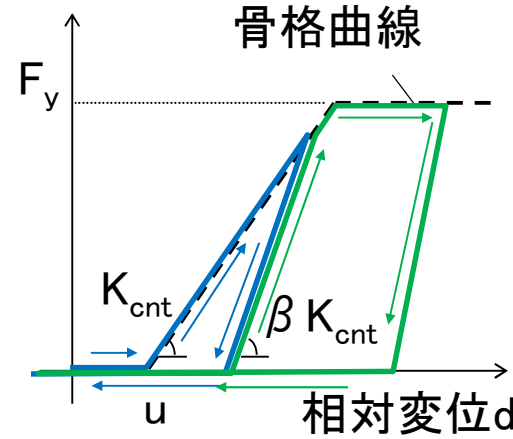
簡易接触モデル

非線形ばね: 履歴エネルギー

ダッシュポット: 波動エネルギー

接触力 $F_{k, cnt}$

骨格曲線

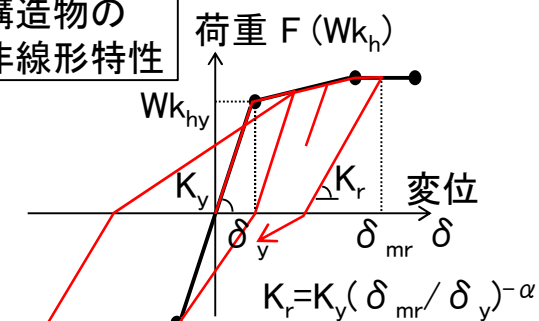


構造物非線形ばねモデル

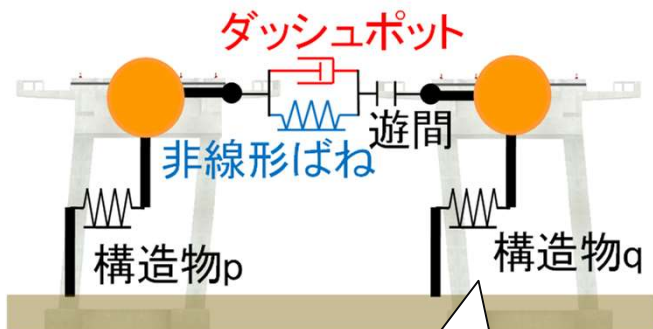
履歴: トリリニア型修正Cloughモデル

粘性減衰: 5%

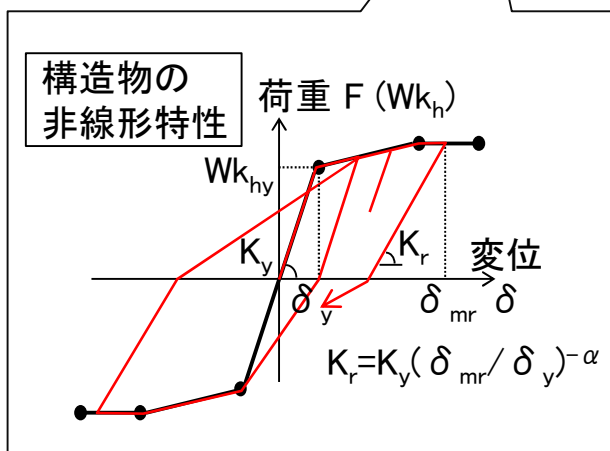
構造物の
非線形特性



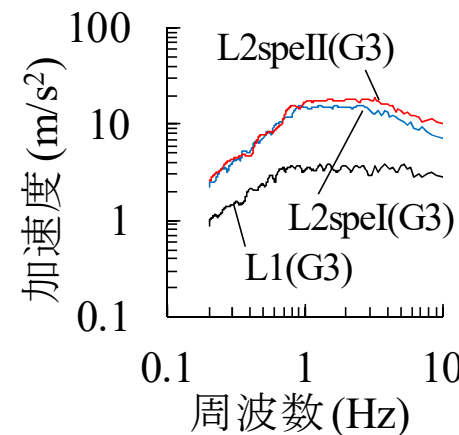
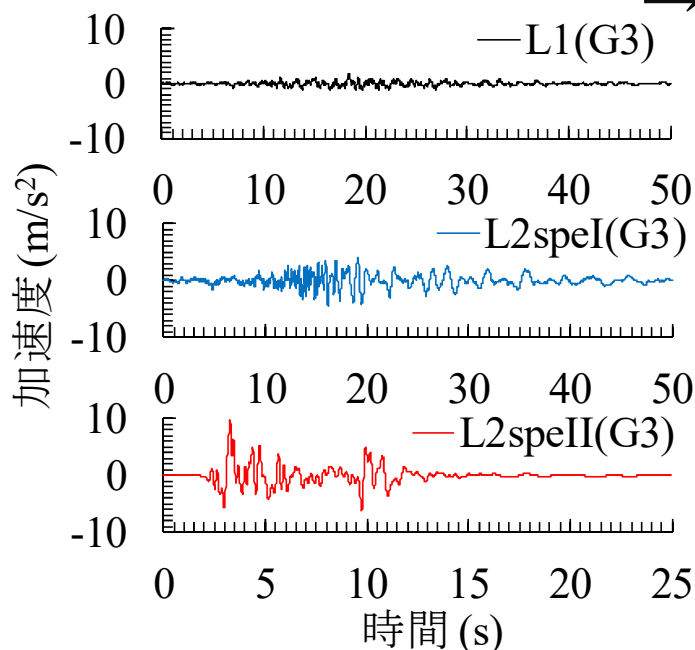
簡易解析ケース



		構造物p	構造物q
構造物モデル	k_{hy}	0.3, 0.5, 0.7	0.3, 0.5, 0.7
	f_{eq} (Hz)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
	w_s/w_t	1, 5, 10	1, 5, 10
接触モデル	u (m)	0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30	
	θ_0 (rad)	0, 0.01	
入力地震波 3波		L1(G3), L2speI(G3), L2speII(G3)	



→55000ケース程度

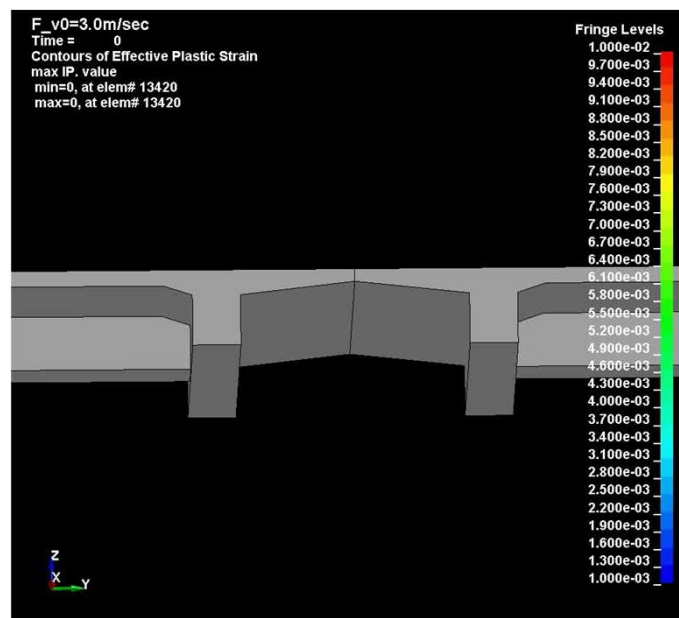
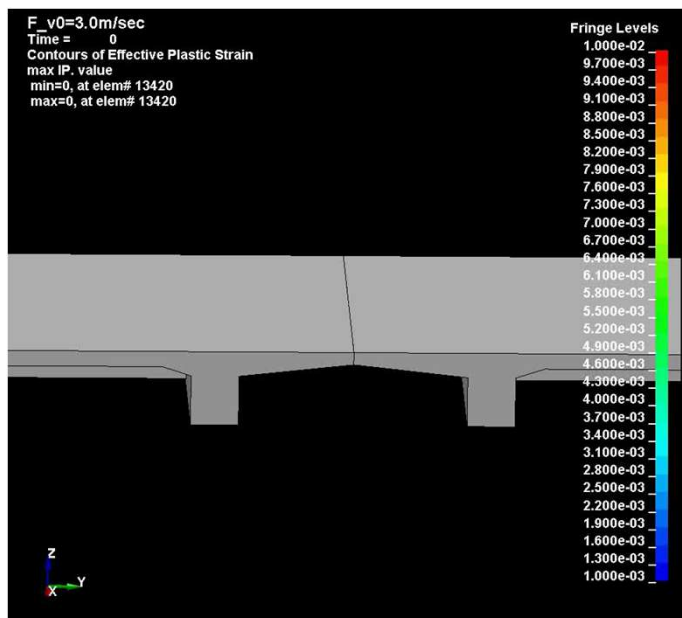


- 1章. はじめに(研究の背景)
- 2章. 検討手法
- 3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価**
- 4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価
- 5章. まとめ

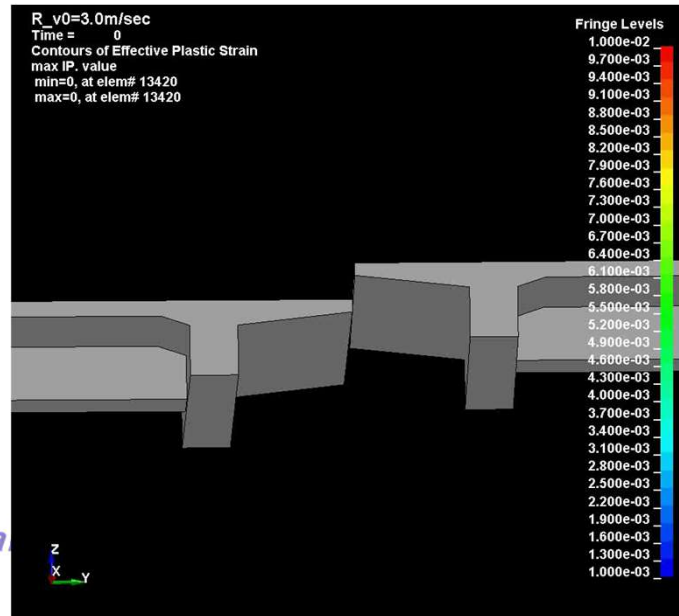
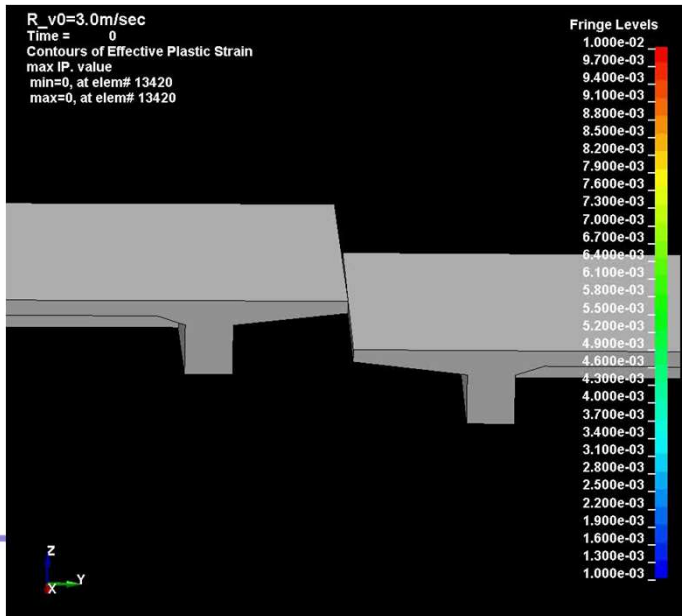


詳細解析結果 動画

$$\Theta_0 = 0$$

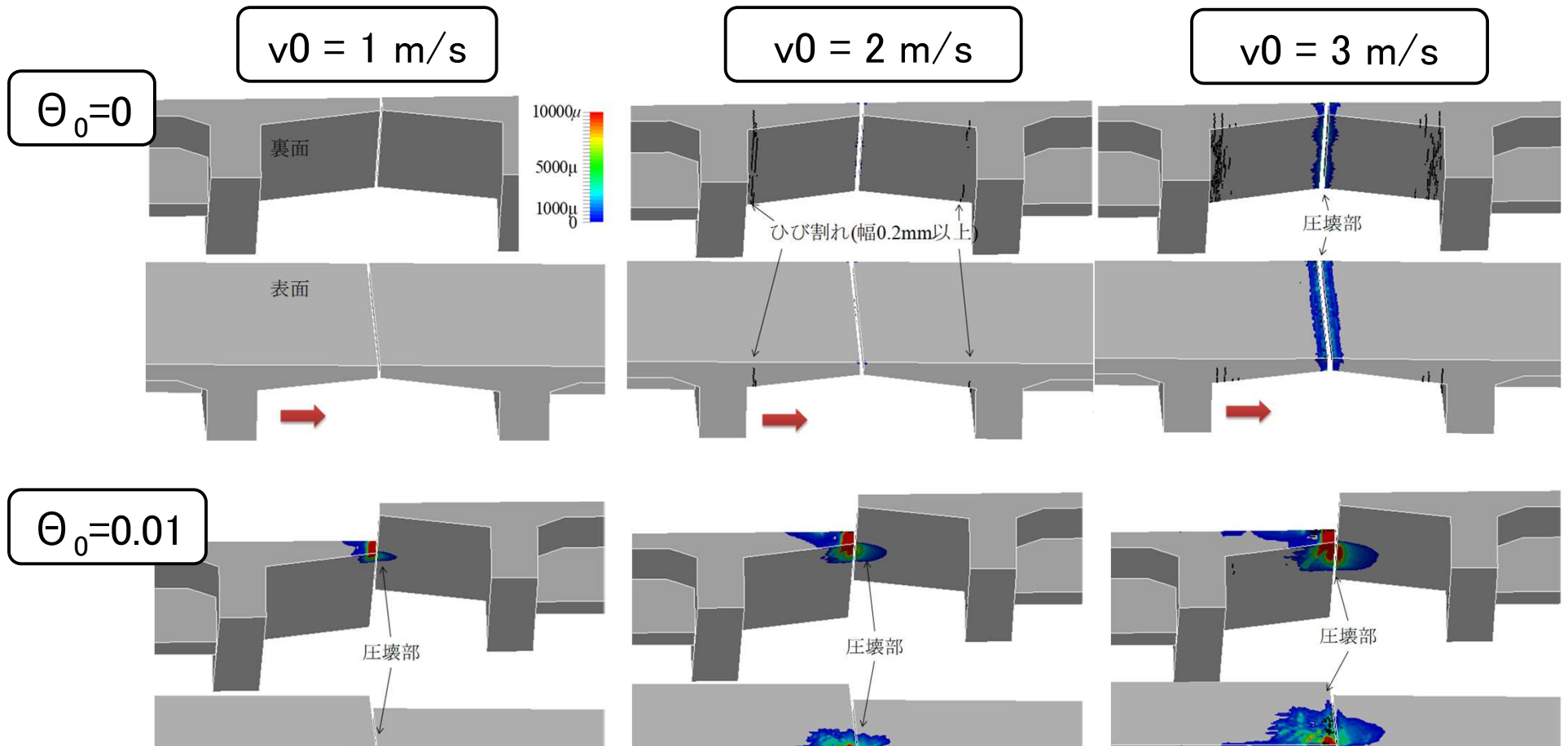


$$\Theta_0 = 0.01$$



Ra

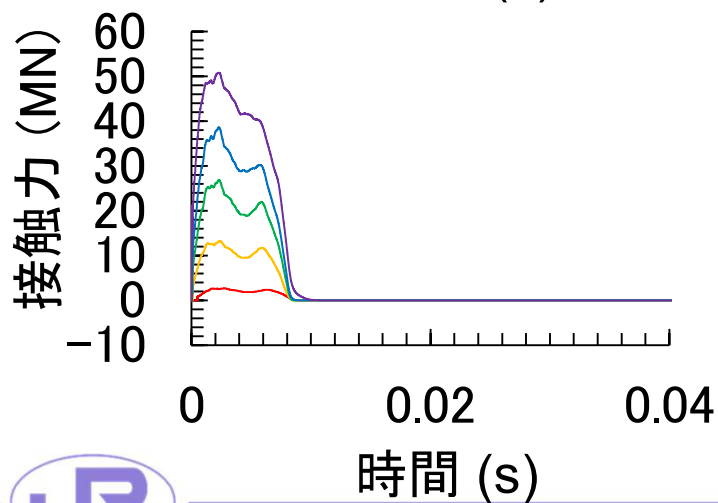
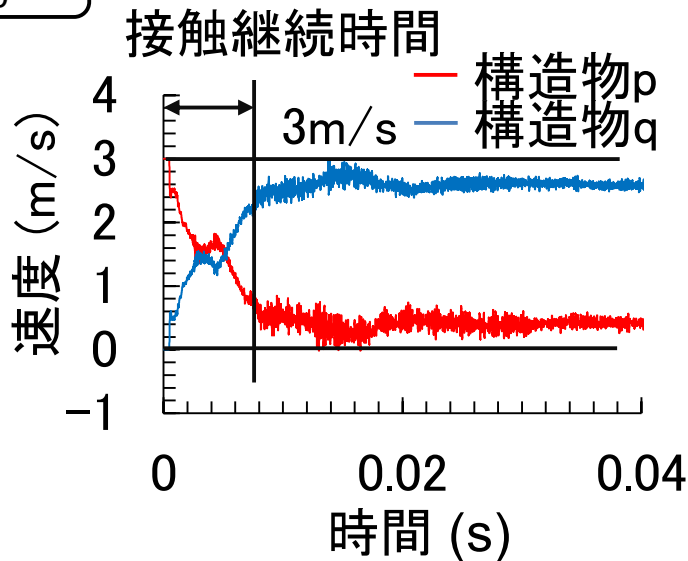
e



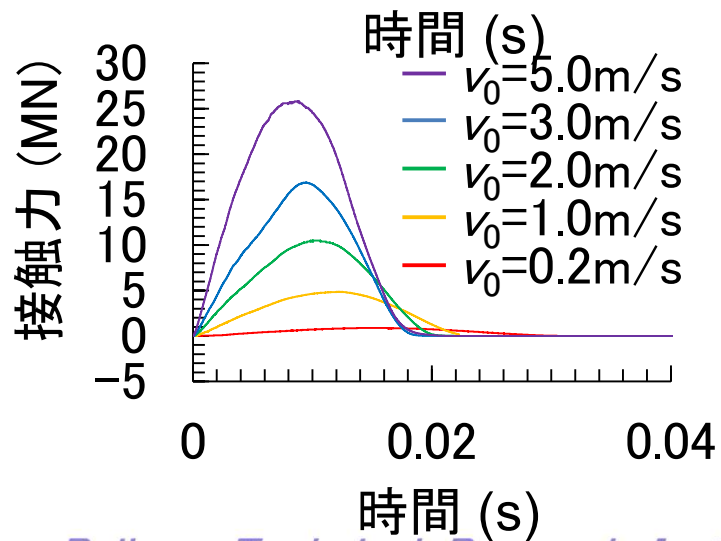
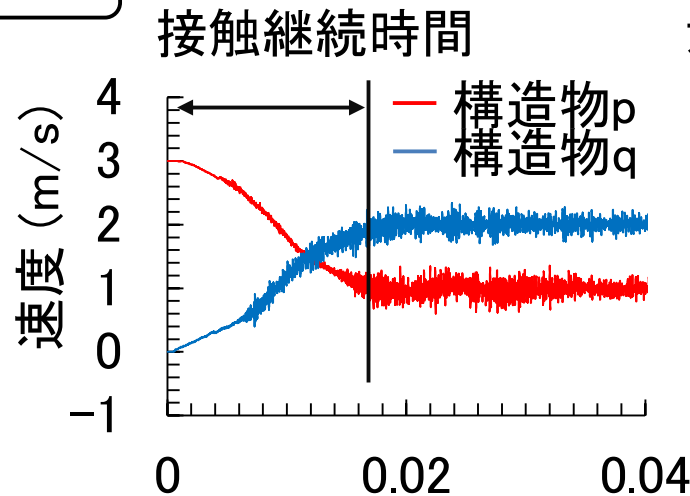
上部工相互の接触による上部工の損傷は、衝突速度、衝突角度に依存して変化し、衝突速度が1m/sの場合には比較的軽微な損傷で済むが、衝突速度が2m/s以上の場合には接触部近傍で圧壊し、張り出しスラブの付け根においてひび割れの損傷が発生する可能性がある。

詳細解析結果 速度 接觸力

$\Theta_0=0$

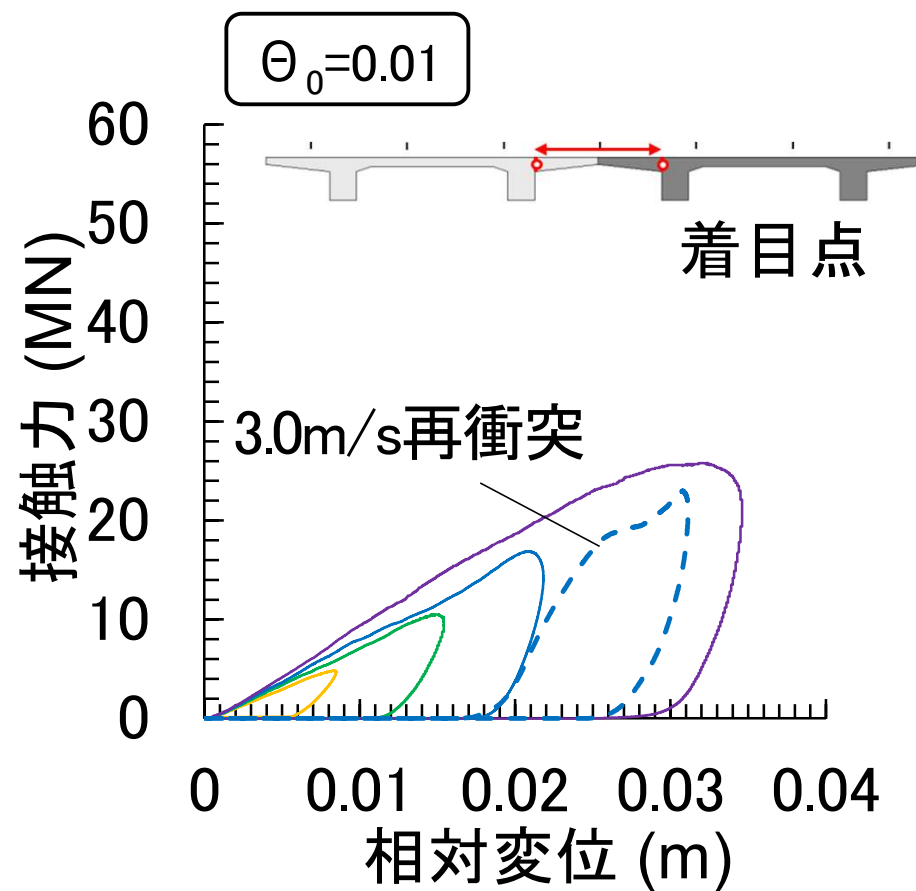
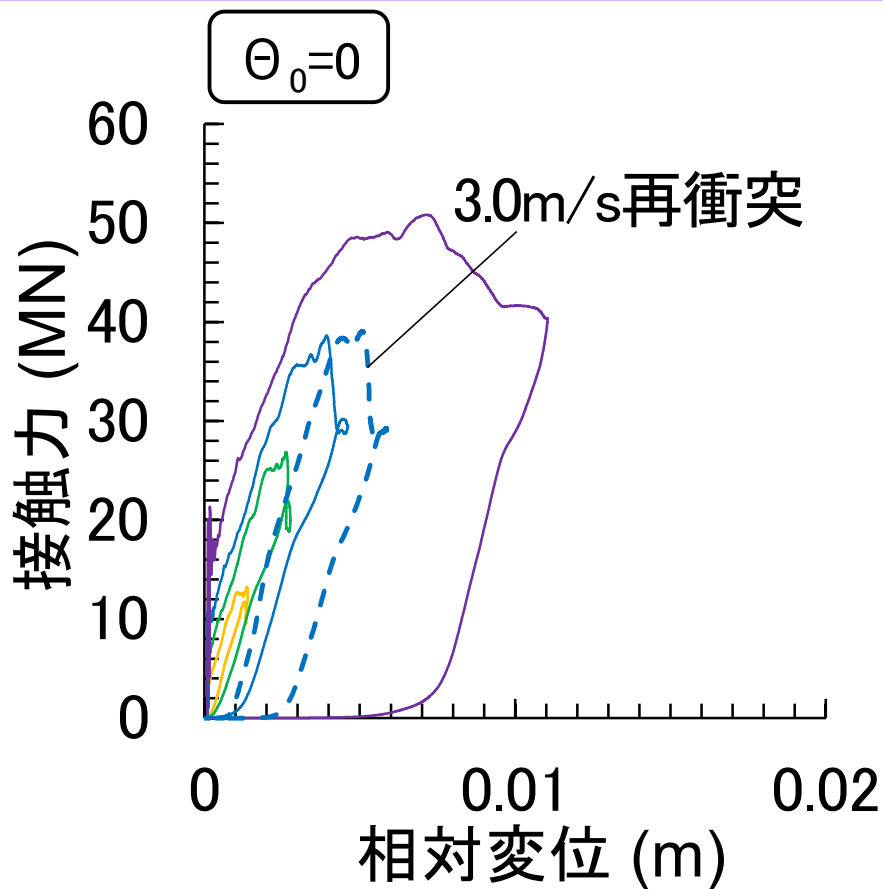


$\Theta_0=0.01$

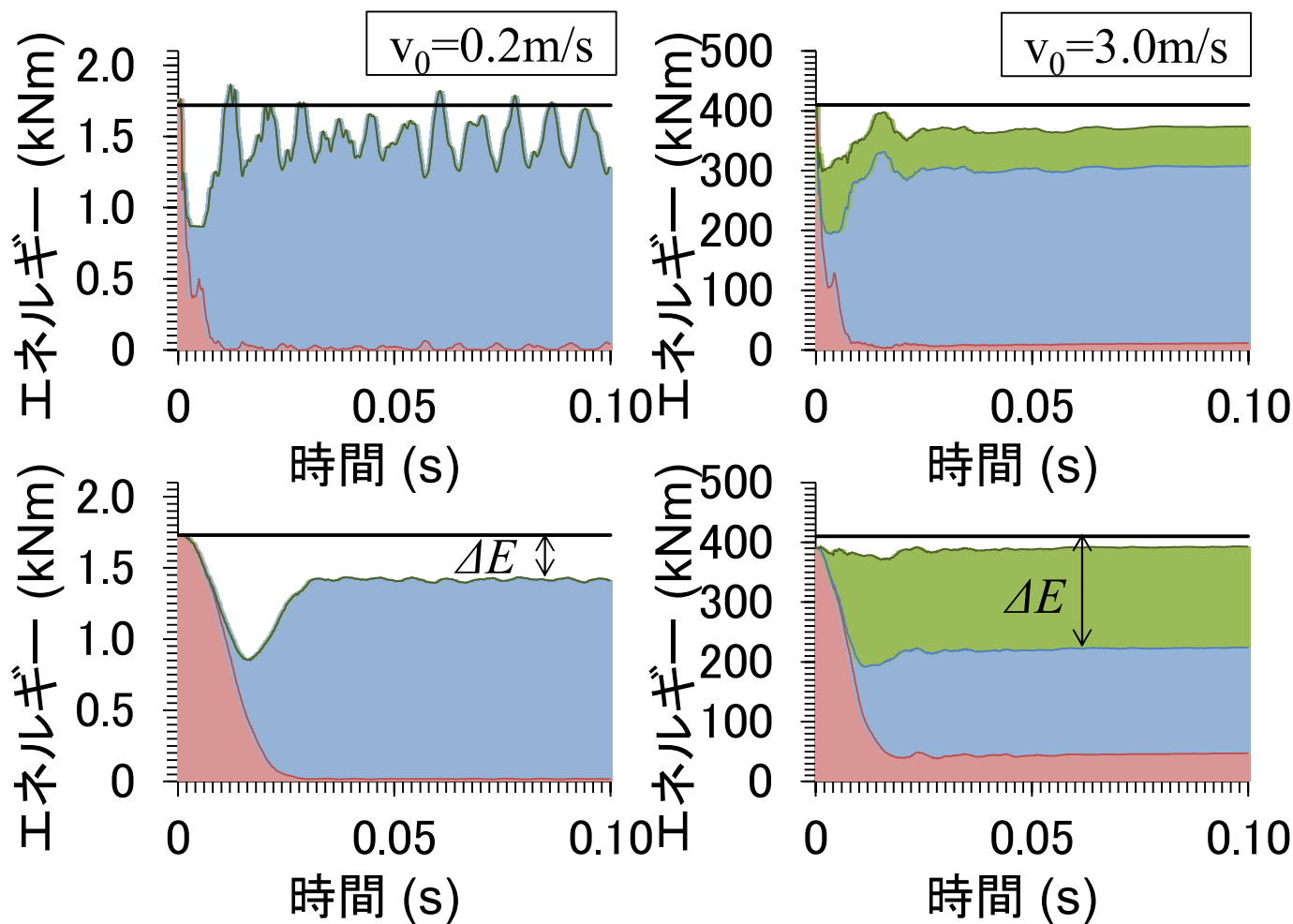


着目点

詳細解析結果 接触力-変位関係



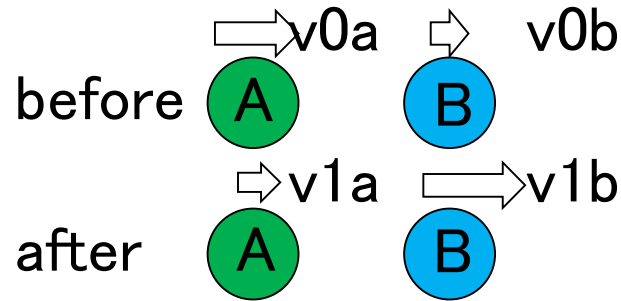
詳細解析結果 衝突によるエネルギー損失



- E_0 : Aの初期運動エネルギー E_{ak} : Aの運動エネルギー $m_a v_a(t)^2/2$
 E_d : 履歴エネルギー(着目断面) E_{bk} : Bの運動エネルギー $m_b v_b(t)^2/2$



詳細解析結果 運動量保存の法則



■ 反発係数

$$e = -\frac{v_{1a} - v_{1b}}{v_{0a} - v_{0b}}$$

■ 運動量保存

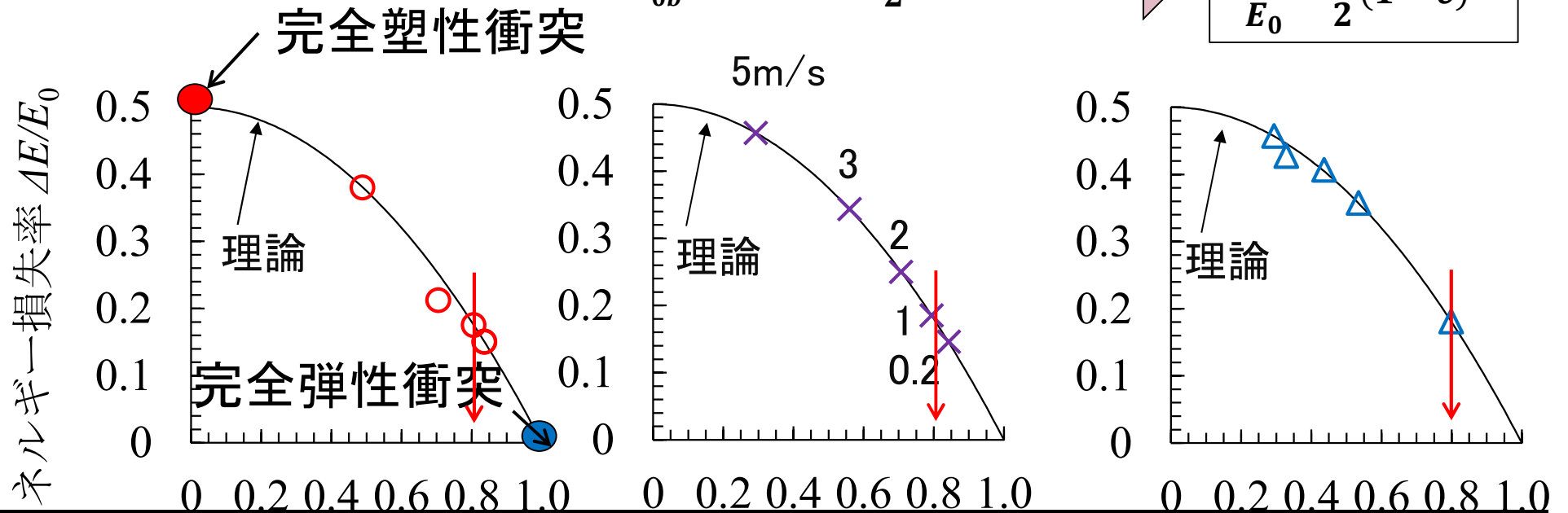
$$m_a v_{0a} + m_b v_{0b} = m_a v_{1a} + m_b v_{1b}$$

■ 損失エネルギー

$$\Delta E = \frac{1}{2} (v_{0a} - v_{0b})^2 \frac{m_a m_b}{m_a + m_b} (1 - e)^2$$

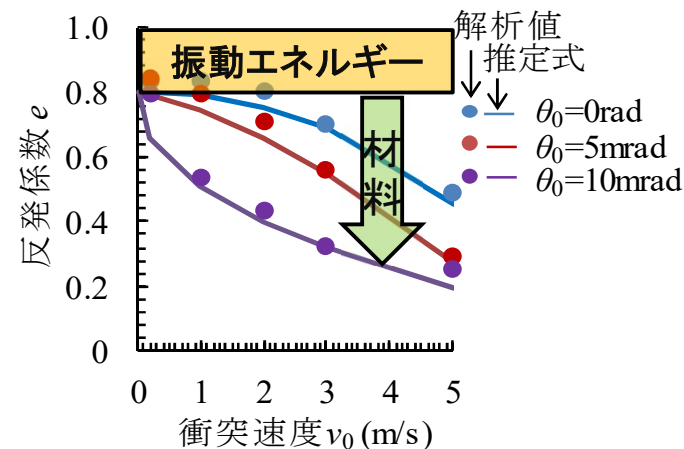
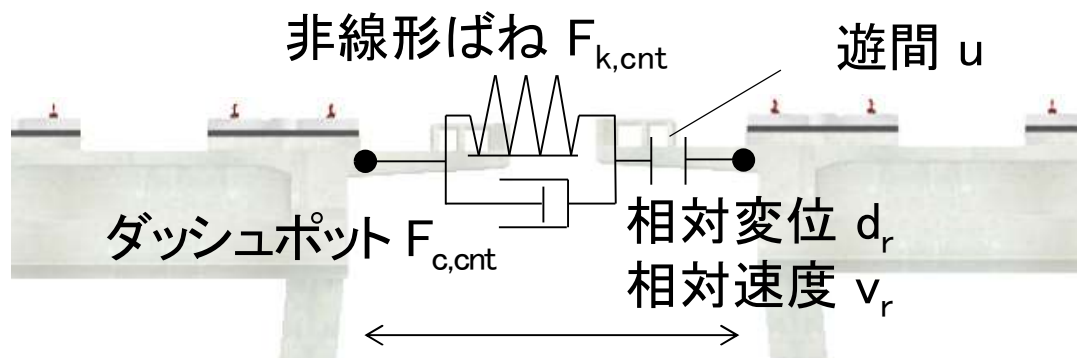
$$m_a = m_b, v_{0b} = 0 \quad E_0 = \frac{1}{2} m_a v_{0a}^2$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{1}{2} (1 - e)^2$$



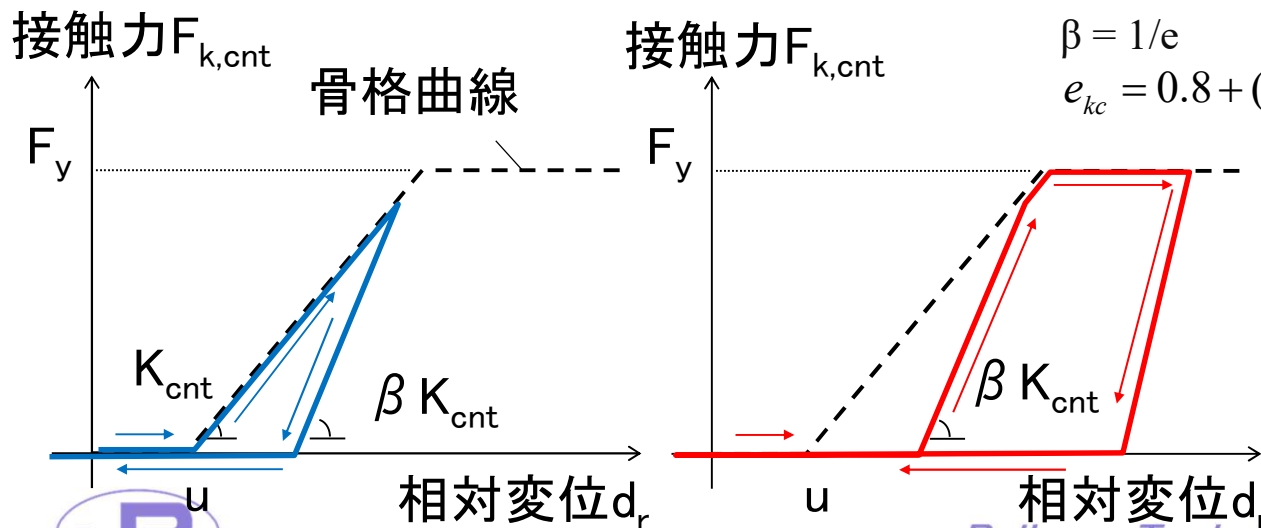
上部工相互の衝突は反発係数0.3~0.8程度の非弾性衝突となる。衝突速度、衝突角度が大きいほど、衝突によるエネルギー損失は大きくなる。

詳細解析結果 簡易接触モデルの構築



■ 衝突によるエネルギー損失の一般化

- ・材料の非線形化により損失される履歴エネルギー → 非線形ばね
- ・振動エネルギーに変換されるエネルギー → ダッシュポット



$$\beta = 1/e$$

$$e_{kc} = 0.8 + (-0.01 - 0.0005\theta_0^{2.75})v_0^{(2.2-0.11\theta_0^{1.2})}$$

$$K_{cnt} = 9500 - 2200\theta_0^{0.6}$$

$$F_y = A_{cnt} f_c$$

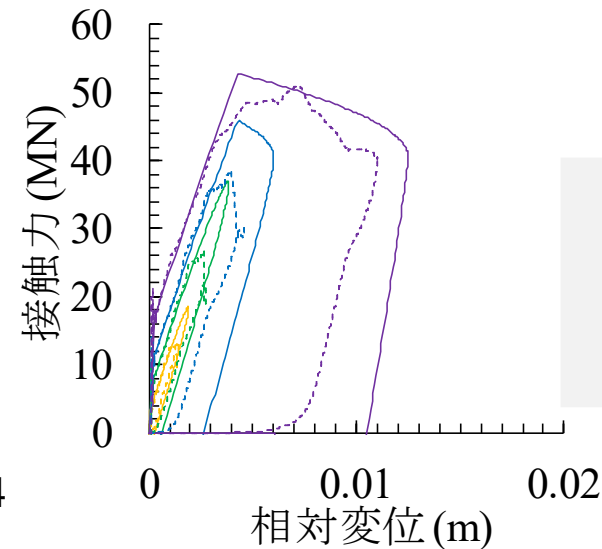
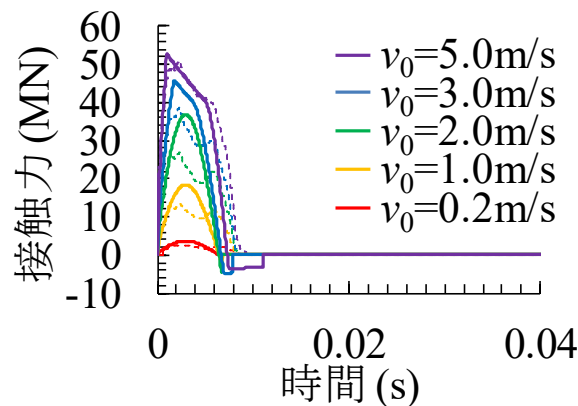
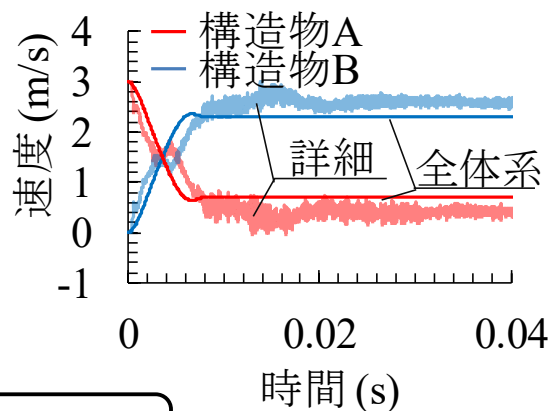
$$A_{cnt} = 0.3(5 - 2500\theta_0)$$



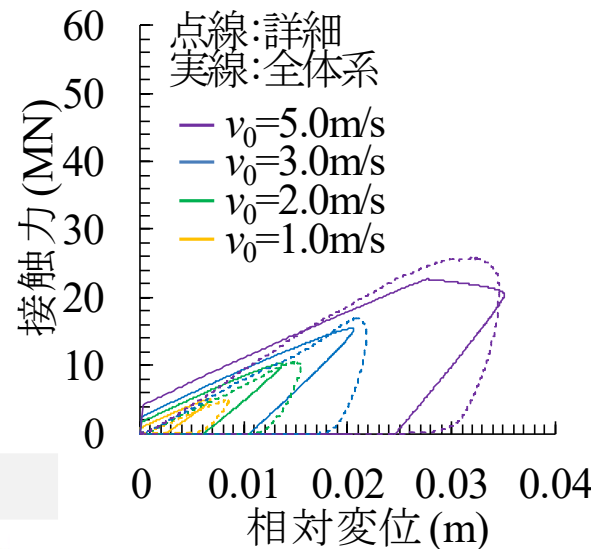
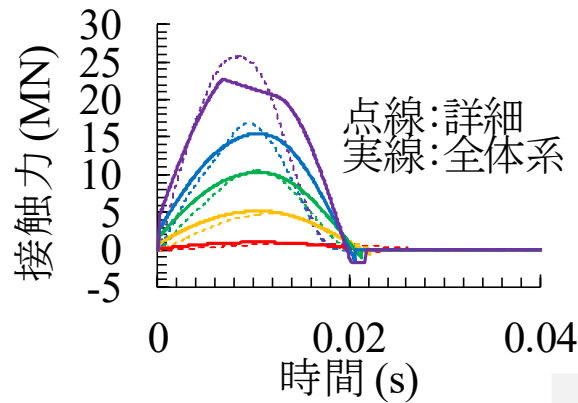
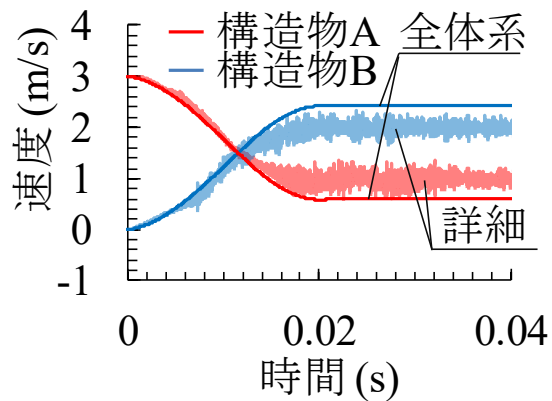
詳細解析結果 簡易接触モデルの構築

妥当性

$\Theta_0=0$



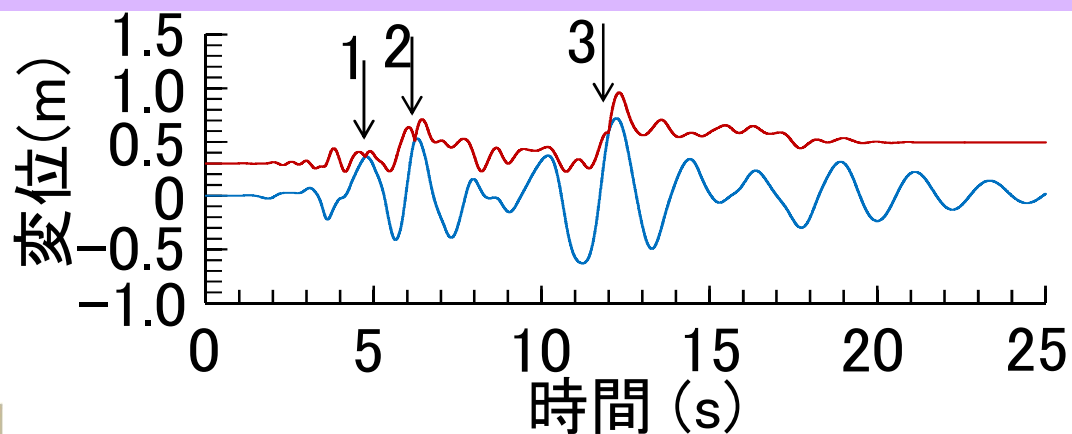
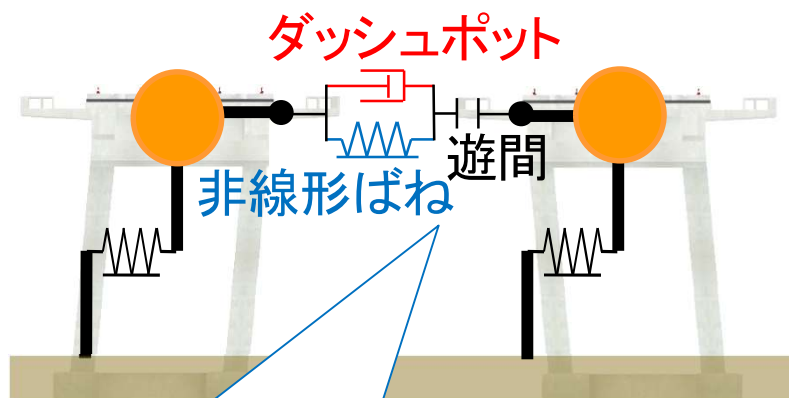
$\Theta_0=0.01$



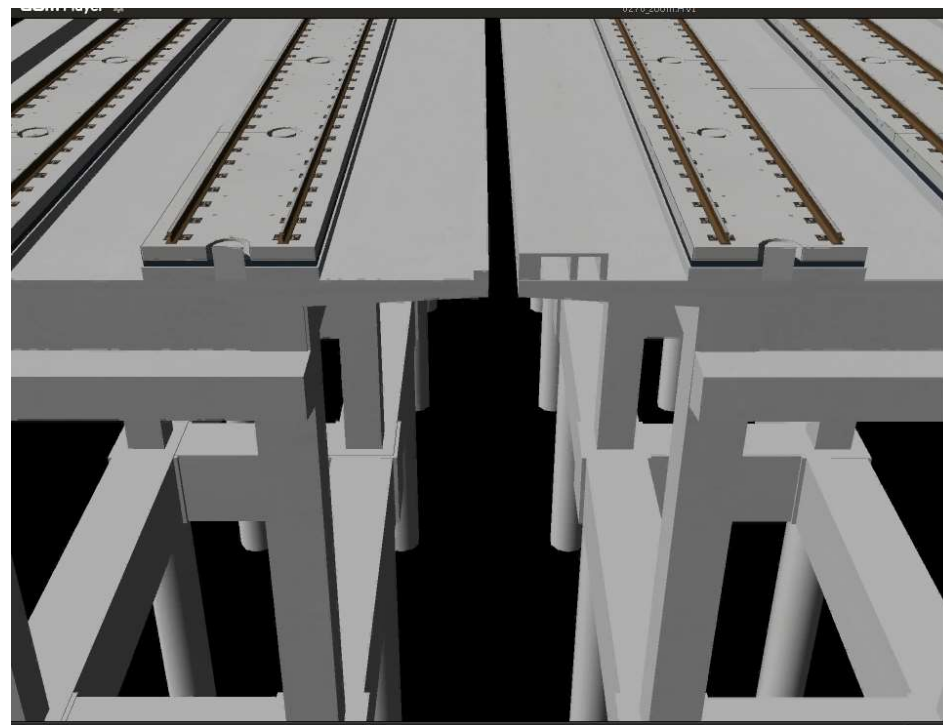
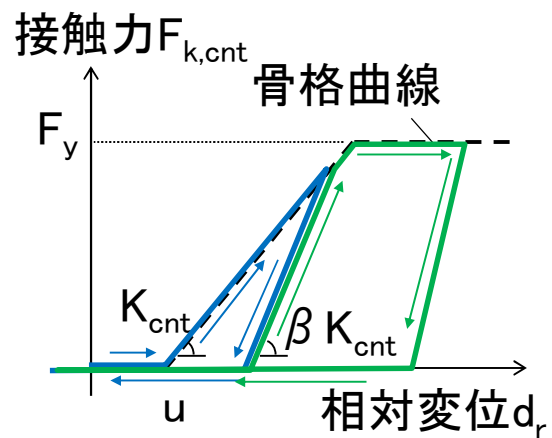
- 1章. はじめに(研究の背景)
- 2章. 検討手法
- 3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価
- 4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価**
- 5章. まとめ



全体解析結果 時刻歴応答

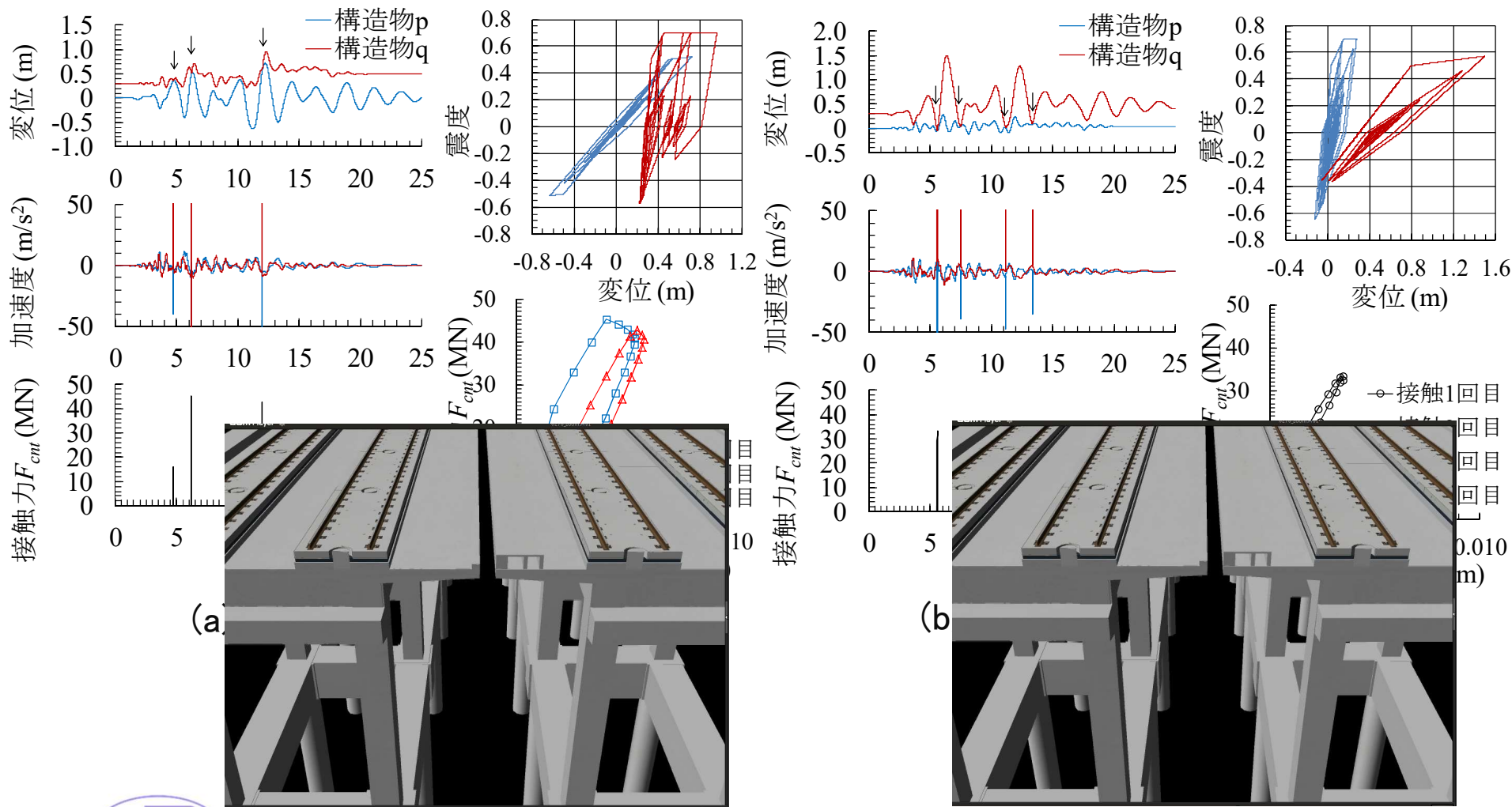


非線形ばね: 履歴エネルギー
ダッシュポット: 波動エネルギー

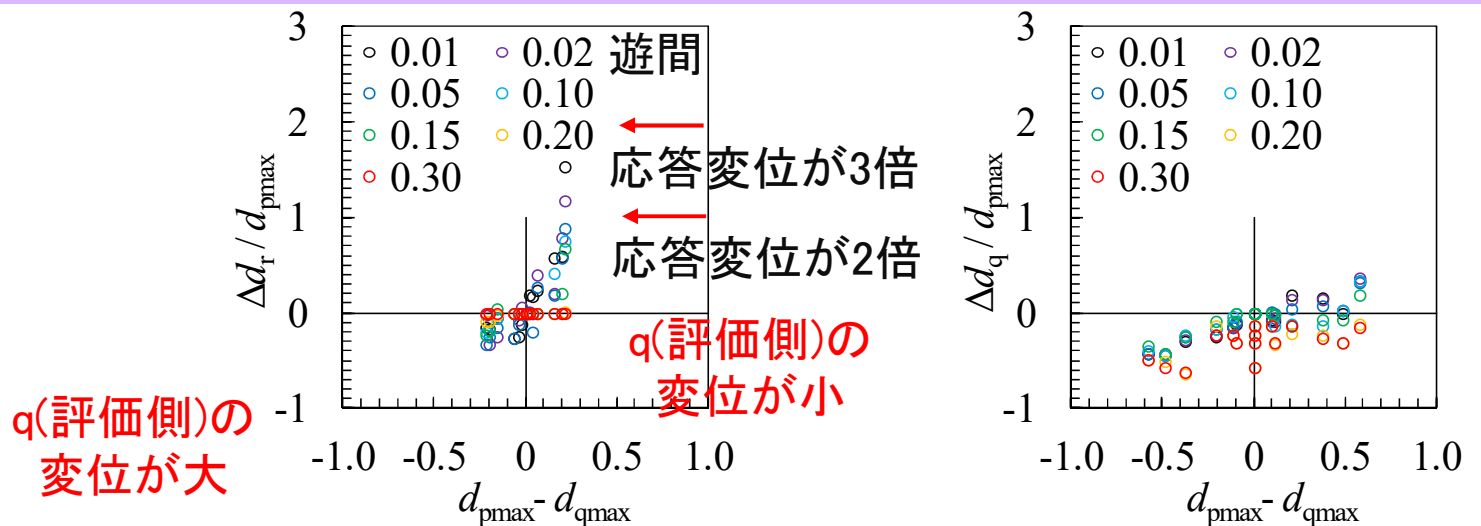


全体解析結果 時刻歴応答

時刻歴波形 ($u=0.3\text{m}$, $\theta_0=0\text{rad}$, L2speII(G3))

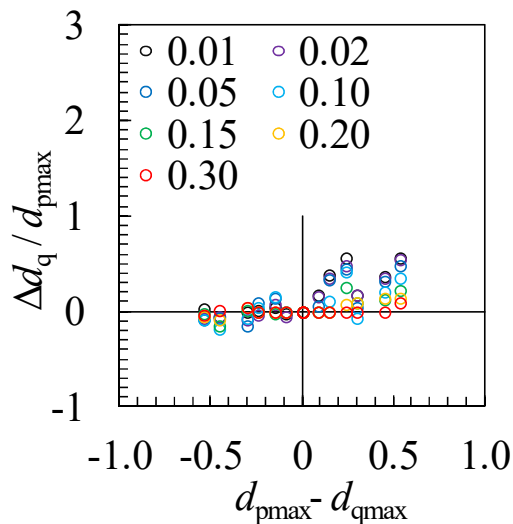


全体解析結果 最大応答

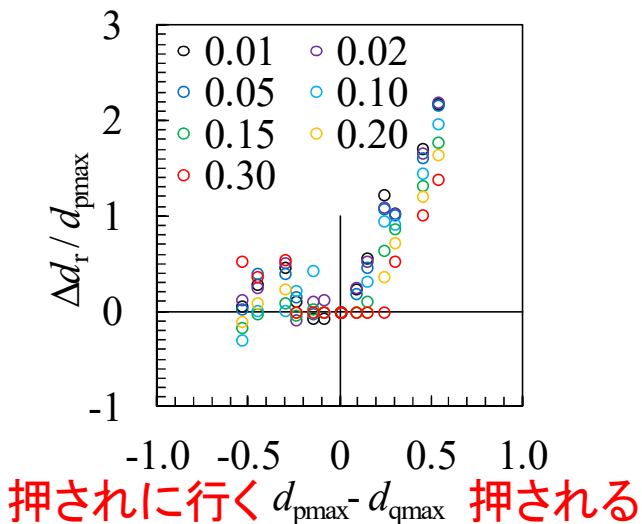


(a) L1(G3) (mp/mq=1)

(b) L2speI(G3) (mp/mq =1)



(c) L2speII(G3) (mp/mq =1)



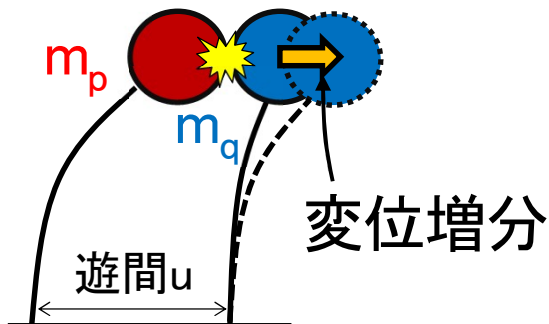
(d) L2speII(G3) (mp/mq =10)



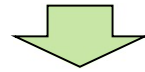
変位応答増幅の一般化

● 衝突エネルギー法

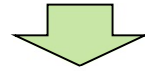
衝突速度 v_0
(構造物の固有振動数と振動振幅に依存)



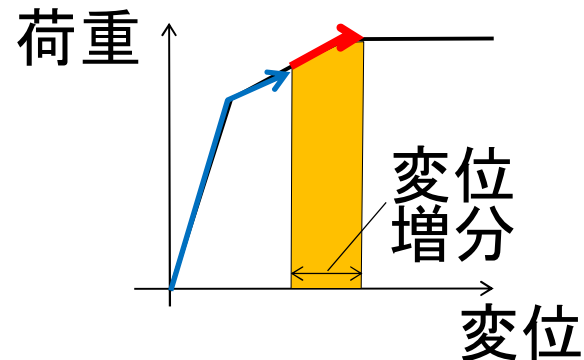
$$\text{衝突後速度} = \frac{m_p}{m_p + m_q} (1+e)v_0$$



$$\text{衝突エネルギー} = \frac{1}{2} m_q v_0^2$$



構造物の履歴エネルギーにより吸収



● 簡易算定式

$$\text{変位増分} = k \times \frac{m_p}{m_q} \times (d_{p\max} - d_{q\max} - \text{遊間})$$

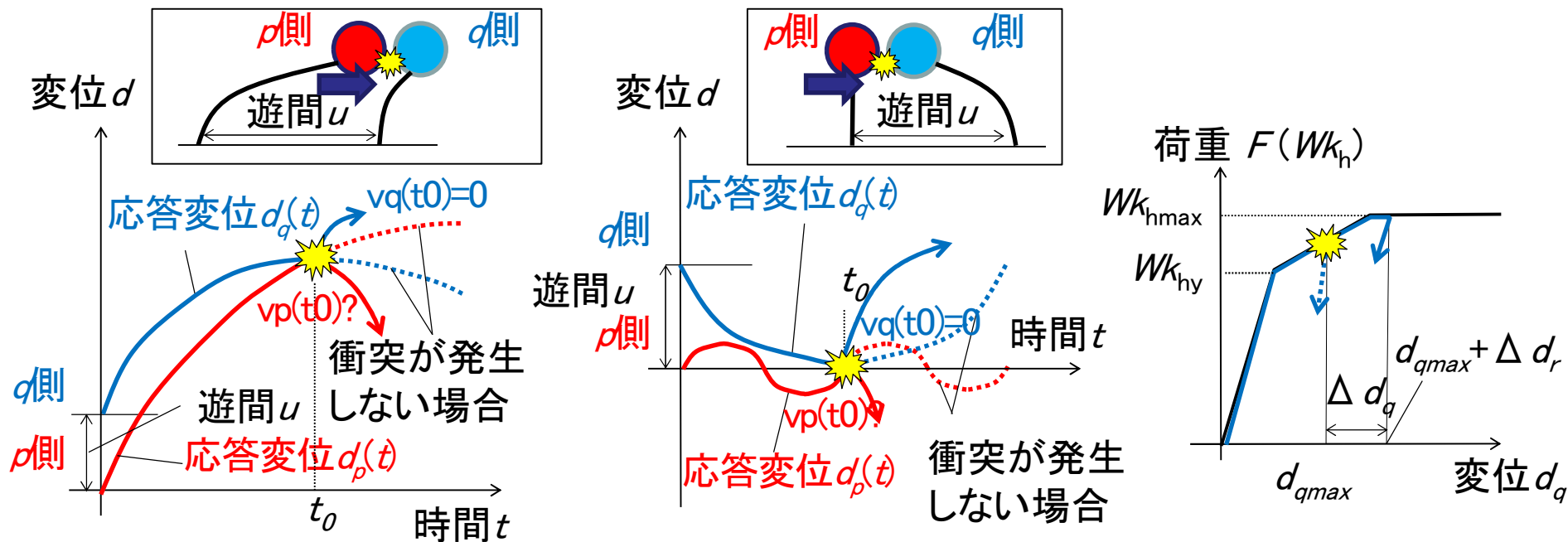
L1地震時: $k=1$

L2地震時: $k=2$

質量比

衝突を考慮せず1自由度系の場合の
最大応答変位の差

変位応答増幅の一般化 衝突エネルギー法 ³⁴



$$d_p(t) = d_{p \max} \sin(2\pi f_p t)$$

$$d_q(t) = d_{q \max} \sin(2\pi f_q t) + u$$

$$v_p(t_0) = 2\pi f_p d_{p \max} \sqrt{1 - \left(\frac{d_{q \max} + u}{d_{p \max}} \right)^2}$$

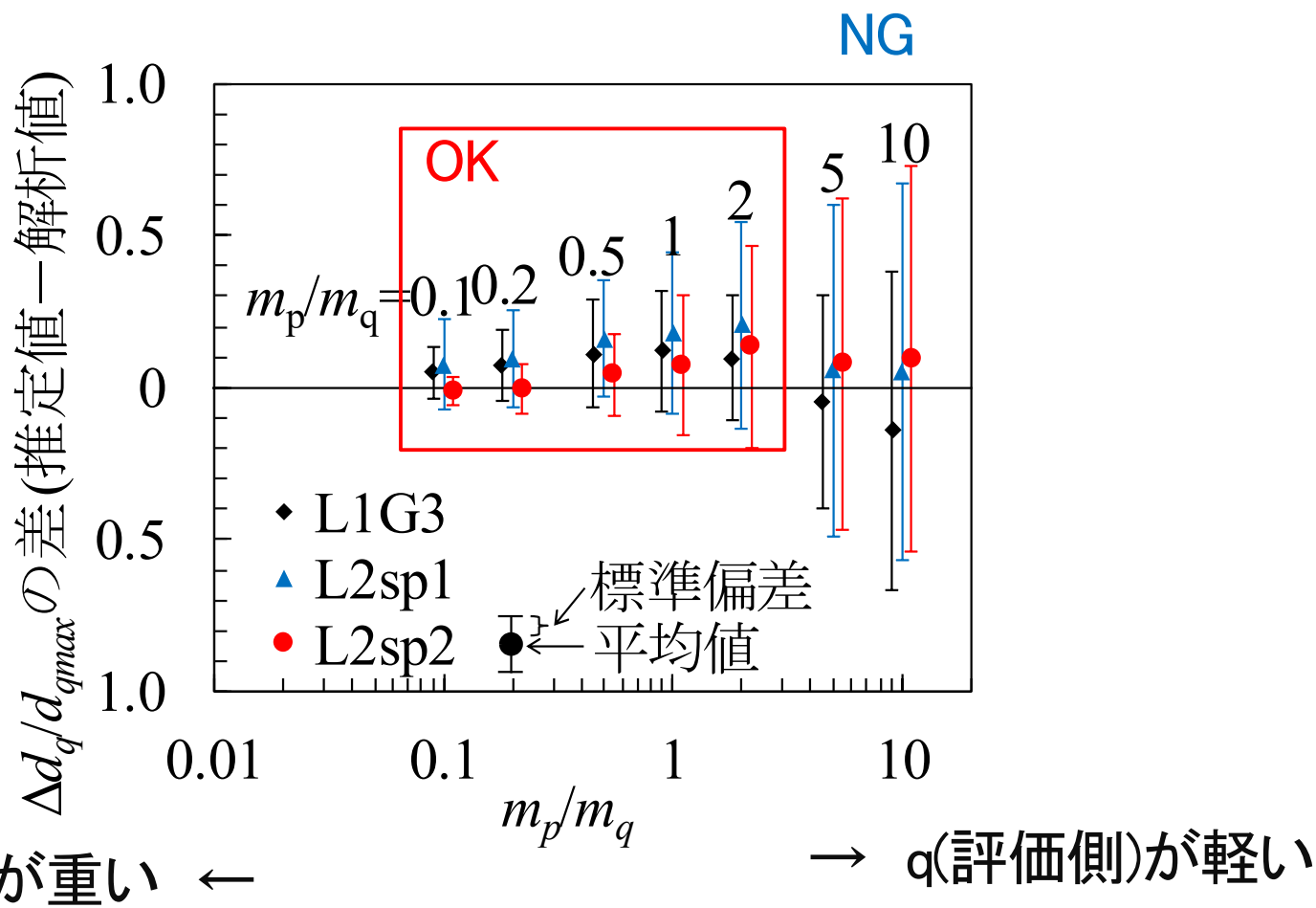
$$v_p(t_0) = 2\pi f_p d_{p \max}$$

$$v_{q1} = \frac{m_p}{m_p + m_q} (1 + e) v_p(t_0)$$

$$\int_{d(t_0)}^{d(t_0) + \Delta d_r} F(d) dd = \frac{1}{2} m_p v_{p1}^2$$

変位応答増幅の一般化 衝突エネルギー法 ³⁵

推定精度



変位応答増幅の一般化 簡易算定式

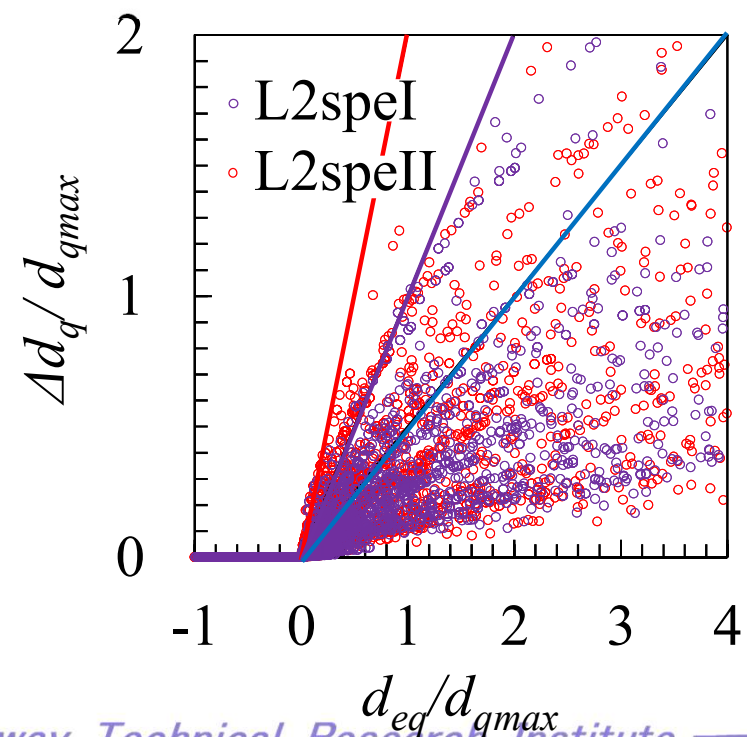
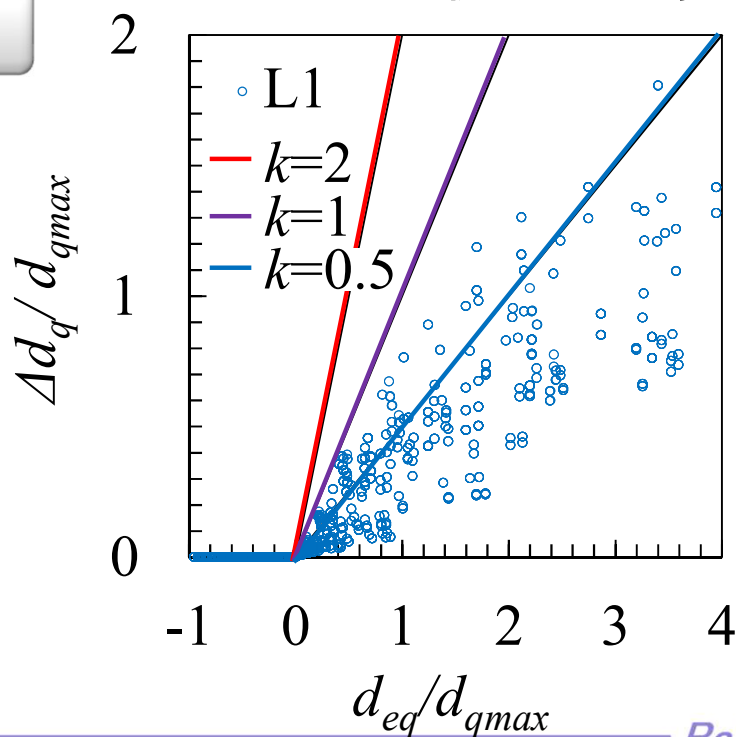
● 簡易算定式

$$\text{変位増分} = k \times \frac{m_p}{m_q} \times (d_{pmax} - d_{qmax} - \text{遊間})$$

L1地震時: $k=1$
L2地震時: $k=2$

推定精度

質量比 衝突を考慮せず1自由度系の場合の
最大応答変位の差



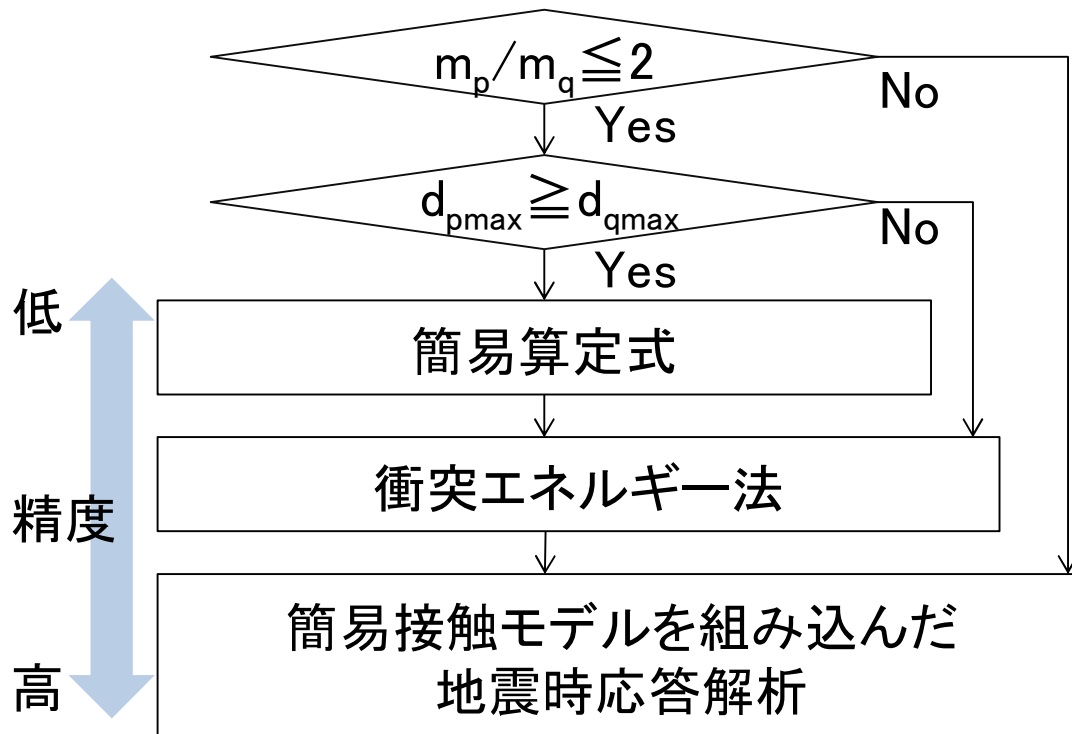
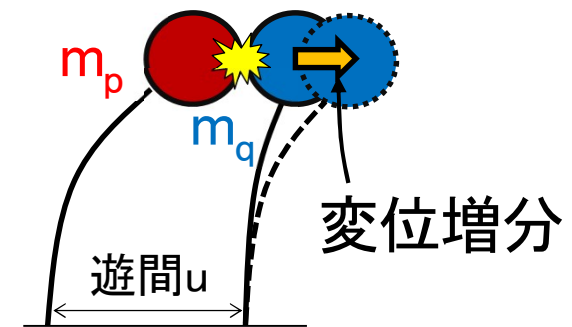
●簡易算定式

$$\text{変位増分} = k \times \frac{m_p}{m_q} \times (d_{p\max} - d_{q\max} - \text{遊間})$$

L1地震時: $k = 1$
L2地震時: $k = 2$

●衝突エネルギー法

衝突速度 v_0
(構造物の固有振動数と振動振幅に依存)



- 1章. はじめに(研究の背景)
- 2章. 検討手法
- 3章. 詳細解析による高架橋相互の衝突評価
- 4章. 高架橋の繰り返し衝突を考慮した
地震時応答評価
- 5章. まとめ



■目的

鉄道RC高架橋相互の地震時繰り返し衝突を考慮した耐震設計法の提案

- 高架橋の張出スラブ相互の衝突により、衝突前の運動エネルギーの一部が上部工内に伝播する**振動エネルギー**、および材料の非線形化により損失される**履歴エネルギー**に変換
- **振動エネルギー**(反発係数0.2)をダッシュポットにより、**履歴エネルギー**を非線形ばね(反発係数0~0.6)により表現する簡易接触モデルを構築 → マルチスケール問題の効率的な計算
- L2スペクトルII地震動時に、固有振動数のみが異なる一般的な構造物間に衝突が生じた場合、**最大で70%程度応答変位が増加**(質量比、遊間等に依存)
- 簡易算定式、衝突エネルギー法、簡易接触モデルを用いた衝突解析の**3つの応答推定手法**を提案 → 遊間や応答増加量を算定可能

ご静聴ありがとうございました

