

燃料体の跳び上がり量評価に関する試験による確認
(改正 1)

令和 2 年 1 月 31 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 目的

本資料は、模擬集合体数削減（部分装荷）の影響評価のために実施した炉心群振動解析において評価した跳び上がり量について、解析結果が概ね妥当であることを過去の試験結果をより確認した結果をまとめたものである。

なお、燃料体の跳び上がり量評価は、以下の理由から廃止措置段階において原子炉施設の安全性確保のために必須となる技術課題ではない。

- ・通常運転時に跳び上がり挙動を評価しているのは、制御棒挿入性を担保する水平方向の支持条件が変化しないことを確認するためである。廃止措置段階においては、制御棒は既に挿入済であり、燃料体の跳び上がりによる安全評価上の影響はない。
- ・廃止措置段階（炉停止時）は、通常運転時に比べ1次主循環ポンプは主モーターが停止し、ポニーモーターで運転しているため、炉心を通る冷却材流量が大きく低減する（約1/10）。このため、冷却材が燃料体内を通ることにより作用する上向き流体力も大きく低減し、燃料体に作用する見かけの重力加速度が0.5Gから0.9Gと大きくなっている。よって、通常運転時に比較して、入力が同じならば跳び上がり量が小さくなることは定性的に明らかであり、燃料体の跳び上がり量は通常運転時の評価を下回る。
- ・部分装荷においては、装荷しない箇所の空隙により見かけ上のパッド部ギャップが大きくなり、水平方向変位を大きくするため、跳び上がりを抑制する方向に働くとみられる。また、鉛直方向の挙動に直接関わる条件は変化しないため、部分装荷による影響は限定的である。

燃料体の跳び上がり量については、炉心の群振動解析においては参考値として評価していたが、燃料交換装置等に影響を与えないことを確実にするため、跳び上がり評価結果について、耐震バックチェック時に実施した試験結果をもとに妥当性の確認を行ったものである。

2. 跳び上がり量評価の妥当性確認

(1) 妥当性確認の方法

炉心群振動解析にて評価した跳び上がり量について、類似試験結果及び類似解析結果（耐震バックチェック時に実施した通常運転中の炉心耐震評価結果）との比較、並びに、物理的又は工学的整合性の確認を行うことで、解析結果が概ね妥当であることを確認する。

具体的には、平成21年度に実施した「高速増殖原型炉もんじゅ 新耐震指針に照らした耐震安全性評価」（耐震バックチェック）に使用されている、「もんじゅ」燃料集合体の模擬集合体を用いた振動試験、及び、解析評価結果と

今回の解析結果を比較して、その差が物理的に整合する（流体力の差異によって変動の説明ができる）ことを確認する。

(2) 比較対象

ア. 模擬燃料集合体を用いた振動試験

耐震バックチェック時の検証に適用した振動試験を比較対象に用いる。

この試験では、炉心構成要素の跳び上がり量を確認するため、「もんじゅ」実機の炉心燃料集合体と連結管を実寸で模擬した単体試験であり、地震動は S2 地震動を係数倍した地震波形を使用している。比較対象に用いる試験データを図-1 に示す。

イ. 耐震バックチェック時の解析

耐震バックチェック時の解析結果を比較対象に用いる。

この解析では、鉛直、水平同時加振を考慮した解析を実施しており、地震動は Ss-D 波を使用している。比較対象に用いる試験データを図-2 に示す。

(3) 確認の結果

模擬燃料集合体を用いた振動試験の試験結果、耐震バックチェック時の解析結果、及び、今回の解析結果について跳び上がり量の評価値を比較した結果を表-1 に示す。

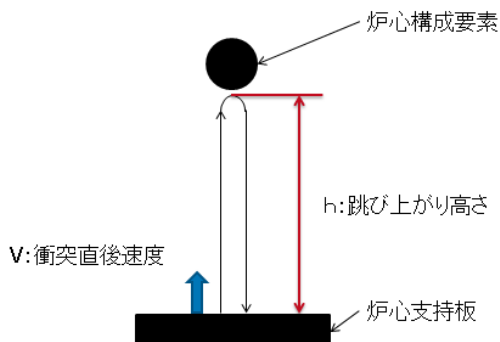
振動試験、耐震バックチェック、及び、本評価では加振波形がそれぞれ異なるが、全て炉心支持板中央部の加速度応答を使用しているため卓越周波数は同等であり、最大加速度についても大きな違いはない。よって、地震波による跳び上がり量への影響は小さいとみられる。

上向き流体力に差がない振動試験と耐震バックチェック時の解析結果は、跳び上がり量が 40mm 前後となっているのに対し、今回の解析結果は約 20mm と約半分程度となった。

ここで、跳び上がり量は、炉心支持板と炉心構成要素の衝突によって発生する。衝突後の炉心構成要素は、周囲からの干渉の影響等を除けば、概ね等加速度運動となるため、衝突直後の速度を用いると、跳び上がり高さは簡易的に以下の式で計算できる。

$$h = \frac{V^2}{2g'}$$

h: 跳び上がり高さ
 V: 衝突直後の速度
 g': 見かけの重力加速度



よって、跳び上がり量は見かけの重力加速度に概ね反比例する。(実際には、周囲からの摩擦力(干渉力)や、上向き流体力以外の流体力(排除質量流体力)などにより、跳び上がり挙動は変化するほか、跳び上がり挙動は非線形性が強い挙動のため、評価結果にはバラつきが生じる。)そのため、振動試験や耐震バックチェック時の見かけの重力加速度が0.5G程度であるのに対し、今回の解析では0.9G程度であり、 $0.5/0.9 = 0.55$ 倍程度に跳び上がり量が低下するとみられる。

これは、今回の跳び上がり量の結果の比(0.5倍程度)と概ね整合しており、今回の解析結果は妥当であると判断した。

表1 跳び上がり量の比較

	今回解析		もんじゅ 振動試験	耐震 BC 解析結果
	部分装荷あり	部分装荷なし		
跳び上がり量	17mm	16mm	41mm	38mm
加振波形	Ss-D		S2 地震波	Ss-D
最大加振加速度	31 m/s ²		35 m/s ²	35 m/s ²
見かけの重力 加速度	8.7 m/s ² (0.89G)		4.7 m/s ² (0.48G)	<u>4.7 m/s²</u> <u>(0.48G)</u>

4(4). ⑥ 炉心構成要素飛び上り解析コードの検証

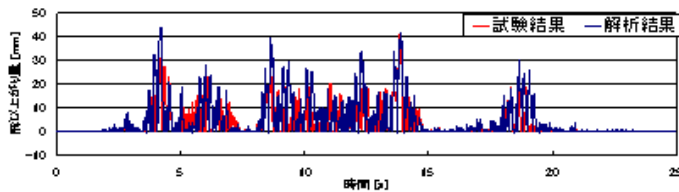
集合体の単体加振試験結果を用い解析コードを検証
解析は水の物性値を使用

検証結果

	最大値	二乗和平方根
試験結果	41.0 mm	5.9 mm
解析結果	43.9 mm	8.6 mm



試験装置全景



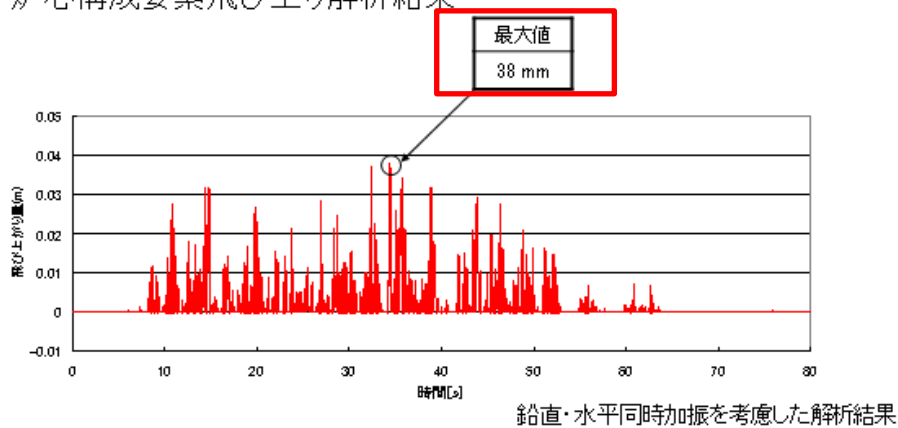
炉心構成要素飛び上り解析結果は、単体加振試験結果と精度良く一致しており、解析コードは妥当である

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委 WG2 第 47-8 号）

図-1 もんじゅ振動試験の試験結果

4(4). ⑦ 炉心構成要素飛び上り評価結果

炉心構成要素飛び上り解析結果



鉛直・水平同時加振を考慮した解析結果

最大飛び上り量 38 mm ≤ 評価基準値 45 mm

炉心体系（幾何学的形状）は維持される

出典：耐震バックチェック説明資料（原安委 WG2 第 47-8 号）

図-2 耐震バックチェックの解析結果

(参考) もんじゅ単体試験を比較対象とした理由について

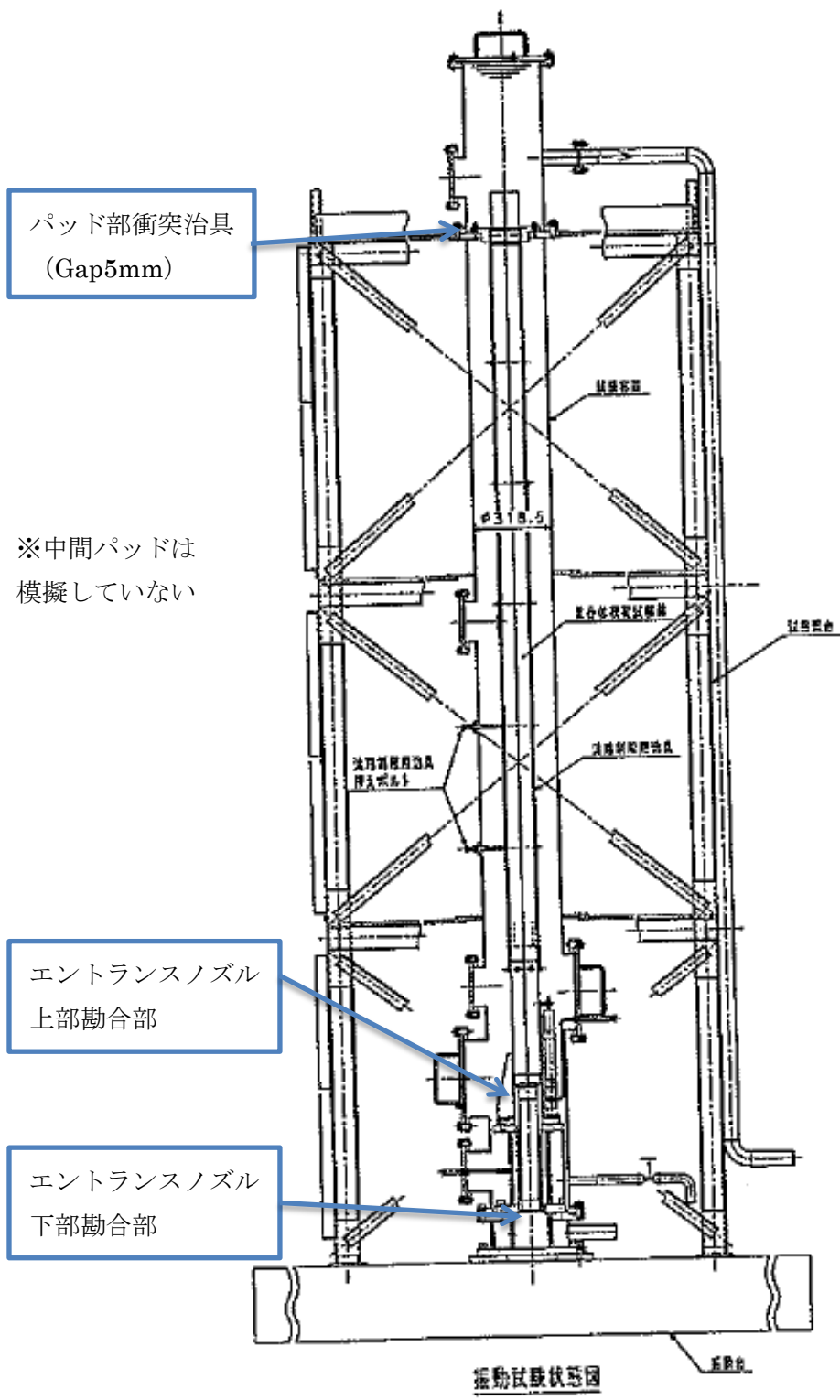
本解析の妥当性を確認するうえで、耐震バックチェック時の検証に用いたもんじゅ単体試験結果を比較対象に選定した理由について以下に記載する。

- ・もんじゅ単体試験結果は、もんじゅの燃料集合体を実寸大で模擬した模擬燃料集合体を使用して試験を実施しており、炉心構成要素の振動特性、衝突特性が実機に最も近い。
- ・次ページに示す通り、加振波形について、鉛直・水平の両方とも、実機解析と概ね同等の加速度レベルにて加振している。
- ・跳び上がり量に関するパラメータのうち、影響が大きい上向き流体力を通常運転時の条件に概ね一致させている。
- ・同じく跳び上がり量に影響が大きい反発係数は、この試験データを基に解析にて設定されたものである。
- ・パッド間ギャップを±5mmとし、自由倒れ分(2mm弱)よりも大きく変位できるようにすることで、水平加振によって生じるエントランスノズル部の干渉*による跳び上がりの抑制を模擬した試験となっている。(単体試験ではあるが水平加振による跳びあがりの抑制効果も考慮に入っている)

以上のことから、実機の通常運転時と概ね同等の跳び上がり量となる試験条件となっている。これは、本試験結果(41mm)と耐震バックチェック時の解析評価結果(38mm)が概ね同等となっていることから裏付けられる。

よって、本解析との流体力以外の試験条件の差が小さく、炉停止中の解析について妥当性を確認するための比較対象として適切であるとみられる。

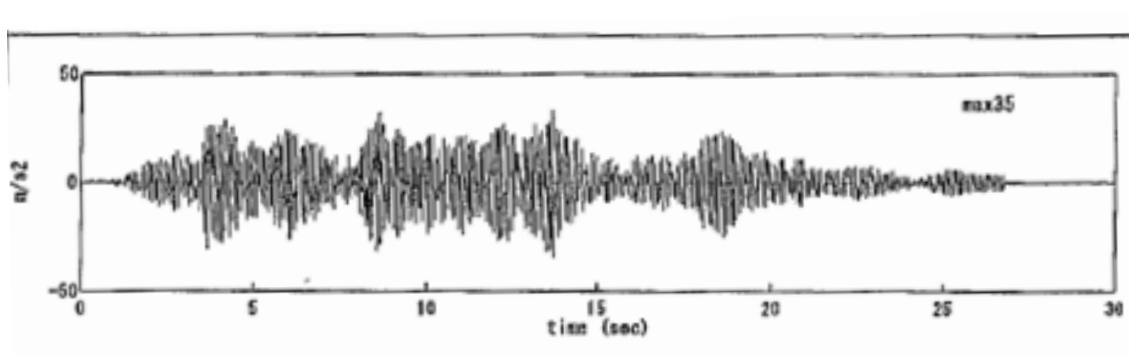
*水平加振によって、干渉が生じる箇所は、パッド部とエントランスノズル部の2カ所であるが、パッド部の干渉力は接触時間が短く、跳び上がりの抑制効果は小さい。これは、パッド部摩擦係数をパラメータとした感度解析によって確認されている。そのため、水平加振による跳び上がりの低減効果はエントランスノズル部の干渉力が支配的となっている。



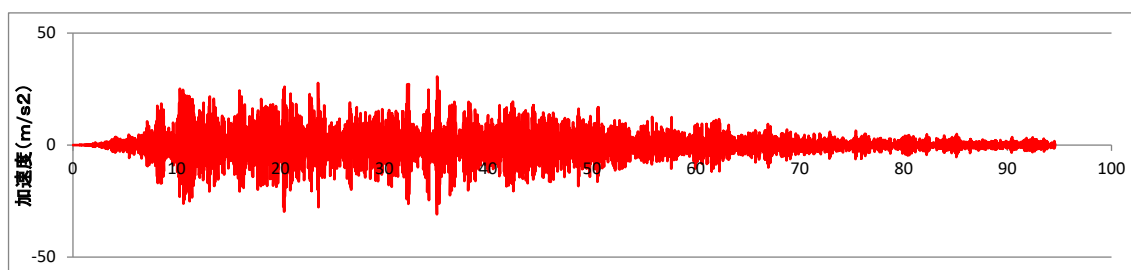
(参考) 炉心支持板における加速度時刻歴波形の比較

鉛直方向

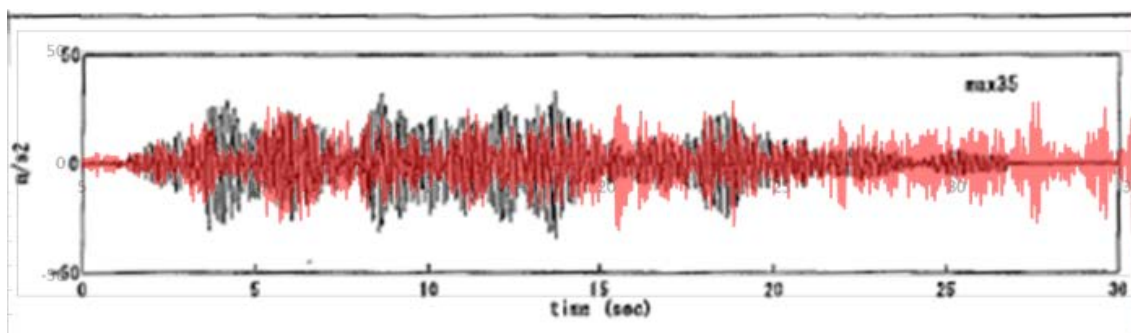
もんじゅ振動試験時の加振波形



部分装荷評価に用いた加振波形



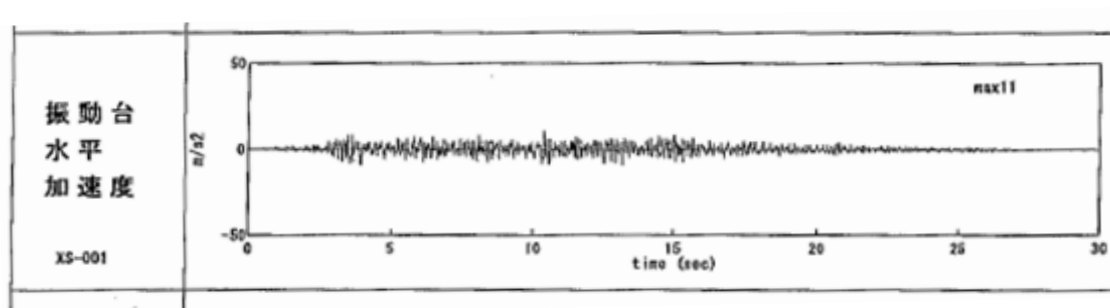
重ね合わせて両者の波形を比較 (時間軸を合わせた)



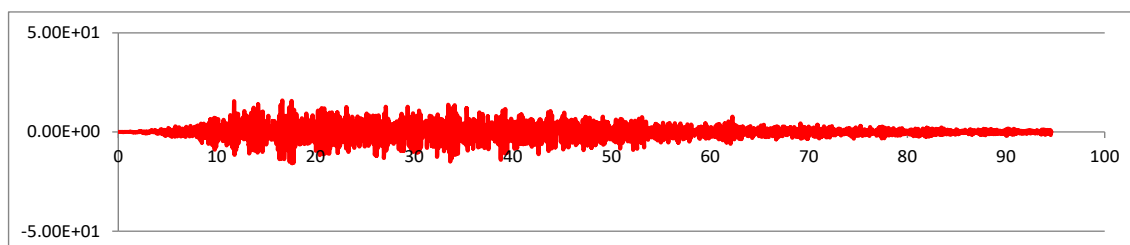
炉心支持板における加速度時刻歴波を比較すると、最大加速度は両者同等のレベルとなっている。

水平方向

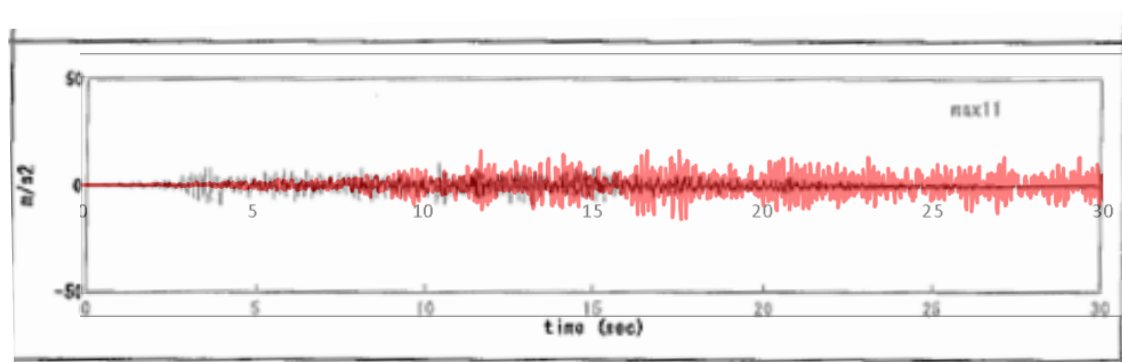
もんじゅ振動試験時の加振波形



部分装荷評価に用いた加振波形



重ね合わせて両者の波形を比較（時間軸を合わせた）

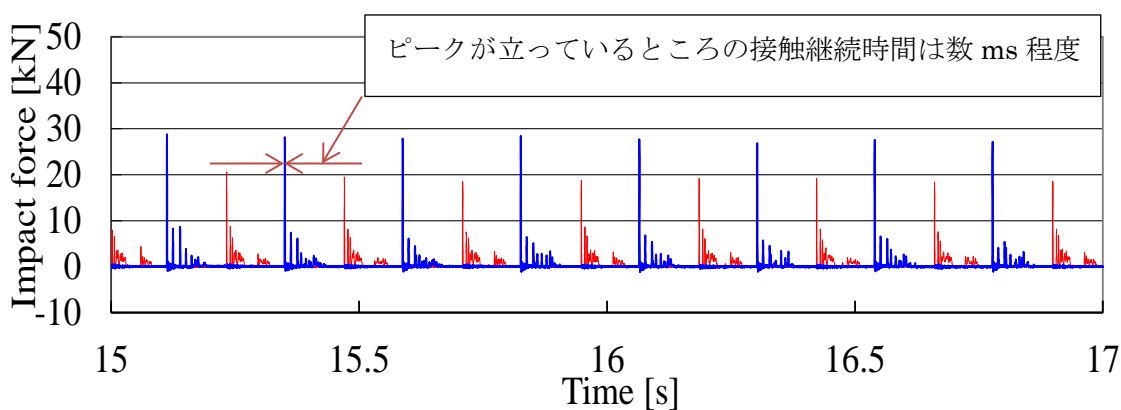


炉心支持板における加速度時刻歴波を比較すると、最大加速度は試験の方が最大値は若干小さい（試験が $\text{max}11\text{m/s}^2$ に対し、解析は $\text{max}:15.9\text{m/s}^2$ ）。

※ エントランスノズル部が支配的となる理由

水平加振によって、干渉が生じる箇所は、パッド部とエントランスノズル部の2カ所であるが、パッド部の干渉力は接触時間が短く、跳び上がりの抑制効果は小さい。一方、エントランスノズル部の干渉力は接触時間が長く、そのため、水平加振による跳び上がりの低減効果はエントランスノズル部の干渉力が支配的となっている。

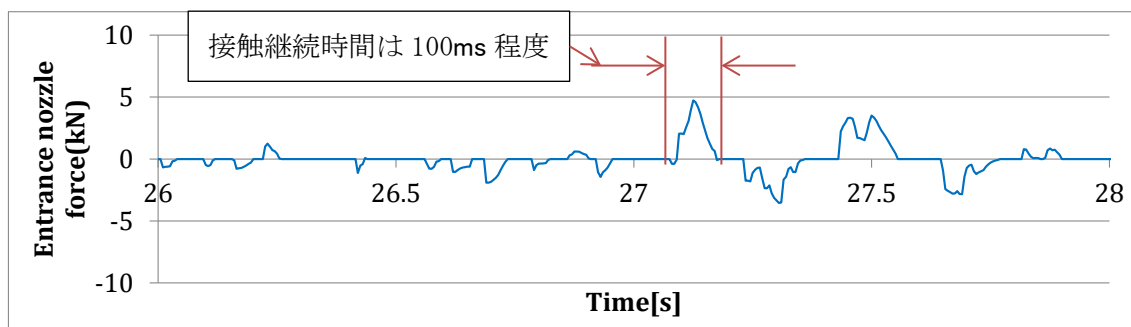
パッド部の接触時間



実寸単体試験 パッド部荷重時刻歴波形

※パッド部の接触時間はロードセルによる計測結果（試験結果）

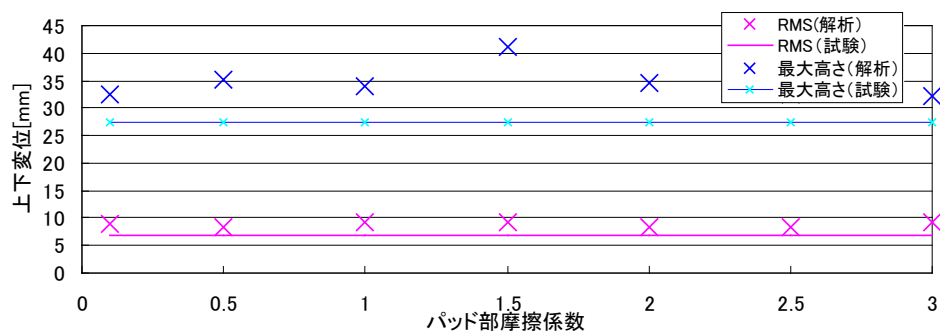
エントランスノズル部の接触時間



エントランスノズル 時刻歴波形（地震波解析結果）

※エントランスノズル部の荷重は測定していないため解析結果により例示

また、JSFR の実寸単体試験を対象に、パッド部摩擦係数を 0.1~3 まで変化させて感度解析を行っている。結果、パッド部摩擦係数は跳び上がりに殆ど影響を与えておらず、パッド部の干渉力が跳び上がりに影響がないことを示している。



摩擦係数と跳び上がり高さのサーベイ結果 (ギャップ 5.0mm)