

令和4年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

原子力規制庁における構造物の耐衝撃作用 に関する研究

令和4年11月22日

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

主任技術研究調査官
太田 良巳



規制庁における衝撃工学研究と国際動向

	規制庁/JNES	OECD/NEA
2000年代	<ul style="list-style-type: none">コンクリートの衝撃破壊評価に関する研究 (JNES)	<ul style="list-style-type: none">IRIS2010・2012 (高速衝突に伴う局部損傷に係る解析プロジェクト)
2010 ～2012	<ul style="list-style-type: none">IRIS2010・2012に参加 (JNES)	
2013 ～2014	<ul style="list-style-type: none">「実用発電用原子炉に係る特定重大事故等対処施設に関する審査ガイド」、「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド」作成・公開 (以降、規制庁)	
2015 ～2016	<ul style="list-style-type: none">鉄筋コンクリート (RC) 構造物の局部損傷評価に関する実験・解析的研究	
2017 ～2020	<ul style="list-style-type: none">RC構造物の衝撃挙動 (応力波伝播) 評価」に関する実験・解析的研究実施 <div data-bbox="331 970 884 1348"></div> <p>大型RC構造物への衝突実験</p> <div data-bbox="958 965 1326 1268"></div> <p>衝撃問題における構造物—地盤の相互作用に関する衝突実験</p>	<div data-bbox="1518 502 2004 901"></div> <p>flexural_model9m_run102e_371fi_03at Cycle 0 Time 0.000E+000 ms Units mm, g, ms</p> <p>IRIS2010・2012解析モデル</p> <ul style="list-style-type: none">IRIS3 (2016～2022) 衝撃挙動 (応力波伝播) に係る解析プロジェクト <div data-bbox="1489 1125 1803 1428"></div> <p>mockup_model9_0c Cycle 0 Time 0.000E+000 ms Units mm, g, ms</p> <p>IRIS3解析モデル</p>
2021～	<ul style="list-style-type: none">特殊形状RC構造物の局部損傷評価に関する実験・解析的研究岩盤・地盤への貫入事象に関する実験・解析的研究	



本日の発表

- 原子力規制庁では、前身の原子力安全基盤機構時代より、衝撃工学に関する様々な研究に取り組んできています。また、それら研究成果について公表をしてきました。
- これまでの研究成果の中から、本日は、土木学会構造工学論文集A (Vol.65A, pp.890-900, 2019.) に掲載されている「[柔飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート板の局部損傷評価に関する実験的研究](#)」について報告します。
- 当該論文にご興味がありましたら、下記アドレスから論文が確認できます。

太田良巳、高橋千明、蔡飛、鈴木哲夫：柔飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート板の局部損傷評価に関する実験的研究,土木学会構造工学論文集, Vol.65A, pp.890-900, 2019.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/65A/0/65A_890/_article/-char/ja/



既往局部損傷評価について

- 原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の衝突に係る研究が行われてきた。
- 衝突による構造物の局部破壊（貫入・貫通・裏面剥離）について、多くの経験的な評価式が提案され、原子力施設の構造評価は、それら評価式による簡易評価が行われている。
- 既往の評価式は、一般的に剛飛翔体が構造物に垂直に衝突する事を前提としている。
- 一方、衝突により飛翔体自体が変形する柔飛翔体の衝突による損傷評価では、既往の評価式に柔性係数を乗じて評価する。



研究の目的

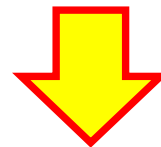
耐衝撃設計の考え方

衝突物

剛衝突物 衝突エネルギー < 構造物の吸収エネルギー

柔衝突物 衝突エネルギー < 構造物の吸収エネルギー
+ 衝突物の吸収エネルギー

構造物の損傷による吸収エネルギー及び衝突物の変形による吸収エネルギーが適切に評価できれば、より現実的な構造物の耐衝撃設計が可能になると考えられる。



本研究は、鉄筋コンクリート板に、剛及び柔飛翔体を衝突させる実験を実施し、柔飛翔体の座屈変形によるエネルギー吸収の観点から柔性係数について検討し、その適用性について確認した。



実験の概要

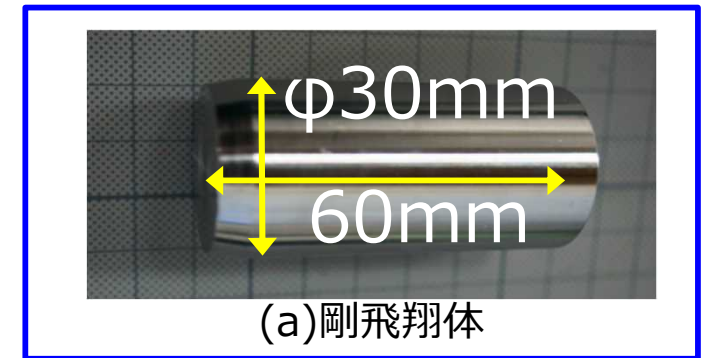
垂直に設置した鉄筋コンクリート板に飛翔体を衝突させる実験を実施。

飛翔体

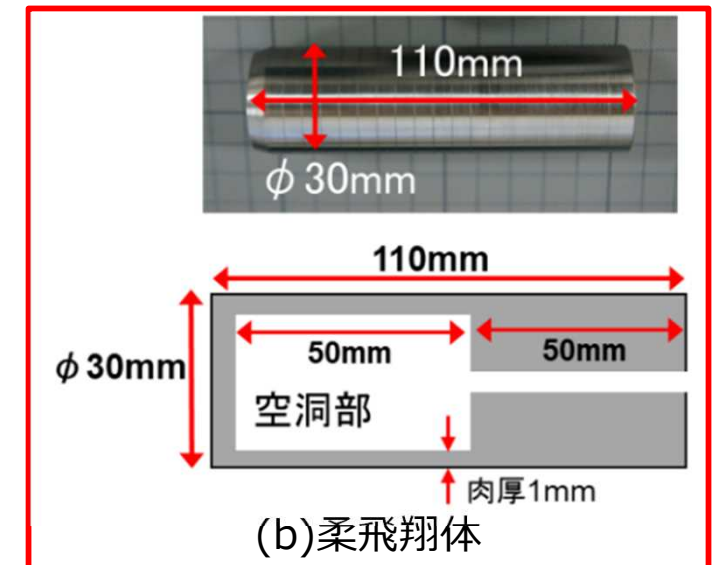
飛翔体直径	: 0.03(m)
飛翔体質量	: 0.33(kg)
衝突速度	: 約50 ~ 200(m/s)
飛翔体先端形状	: 平坦
飛翔体剛性	: 剛飛翔体, 柔飛翔体

コンクリート板

コンクリート圧縮強度	: 20~30 MPa
コンクリート板厚	: 0.06, 0.08, 0.10 (m)
コンクリート板寸法	: 0.55 × 0.55 (m)
鉄筋比	: 2%以下



(a)剛飛翔体



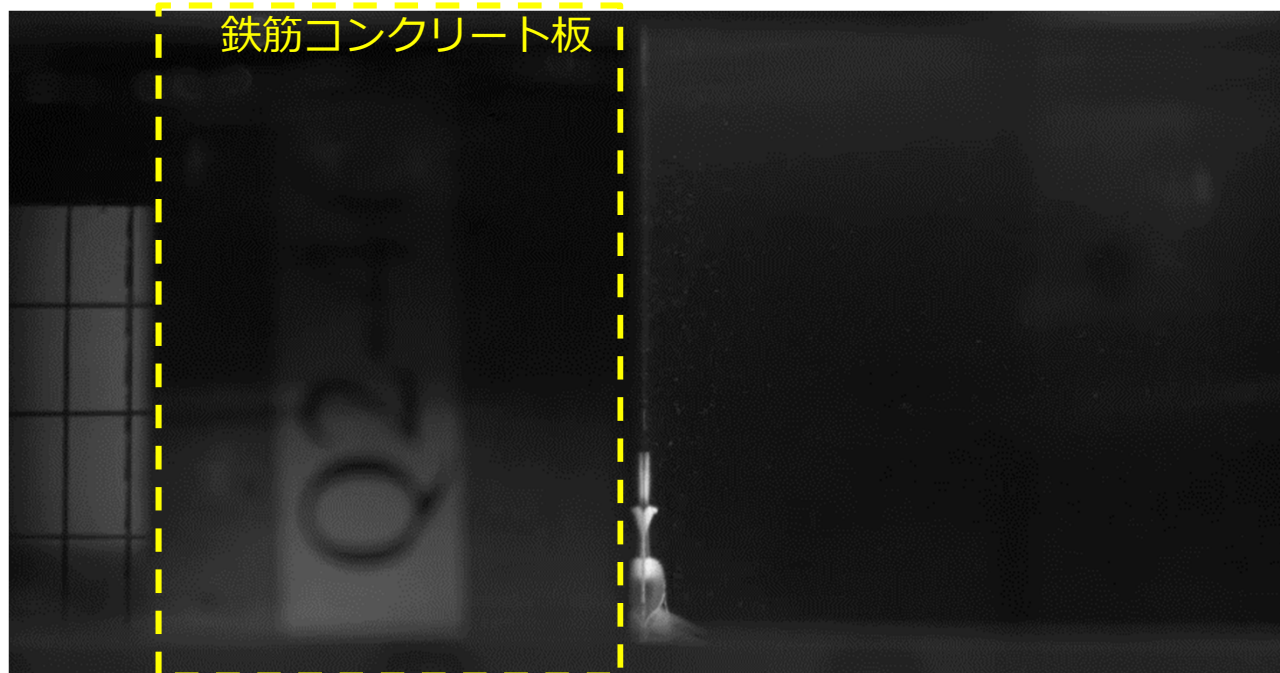
(b)柔飛翔体
鋼製飛翔体

柔飛翔体は空洞部が座屈変形する。



衝突実験の様子

柔飛翔体
衝突速度148m/s
板厚8cm



柔飛翔体の損傷状況



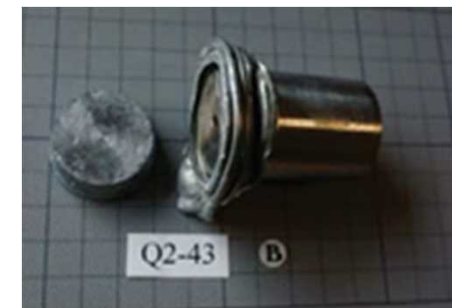
実験前



衝突速度：107m/s
板厚：60mm



衝突速度：146m/s
板厚：60mm



衝突速度：193m/s
板厚：100mm



Chang式による実験結果の整理

Chang式 (1981)

裏面剥離限界板厚(h_s)評価式

$$\frac{h_s}{d} = 1.84 \left(\frac{u}{V}\right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{1.2} f_c^{0.4}}$$

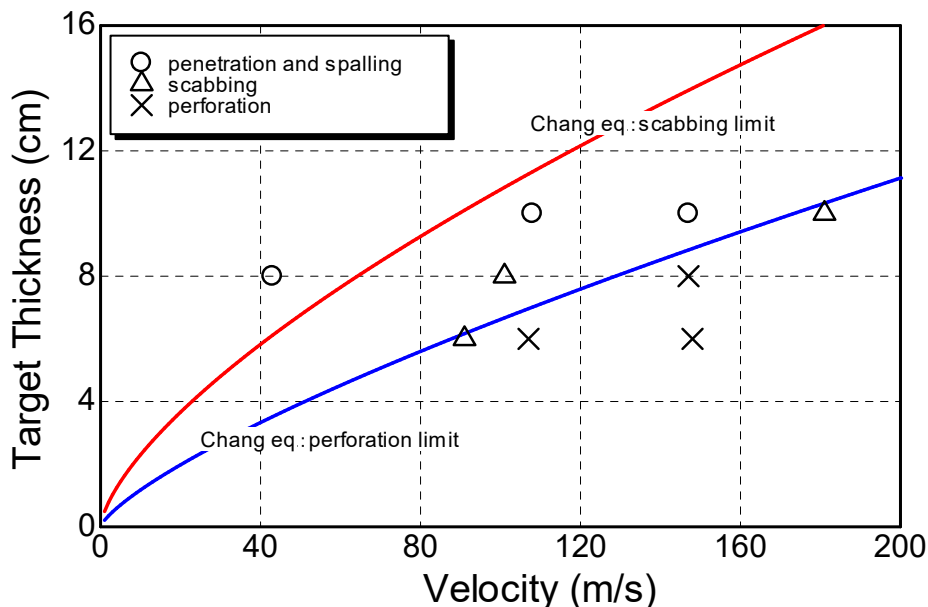
貫通限界板厚(e)評価式

$$\frac{e}{d} = \left(\frac{u}{V}\right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{d^3 f_c}\right)^{0.5}$$

d : 飛翔体直径(m),
 V : 衝突速度(m/s),
 M : 飛翔体質量(kg),
 f_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²),
 u : 基準速度(m/s)

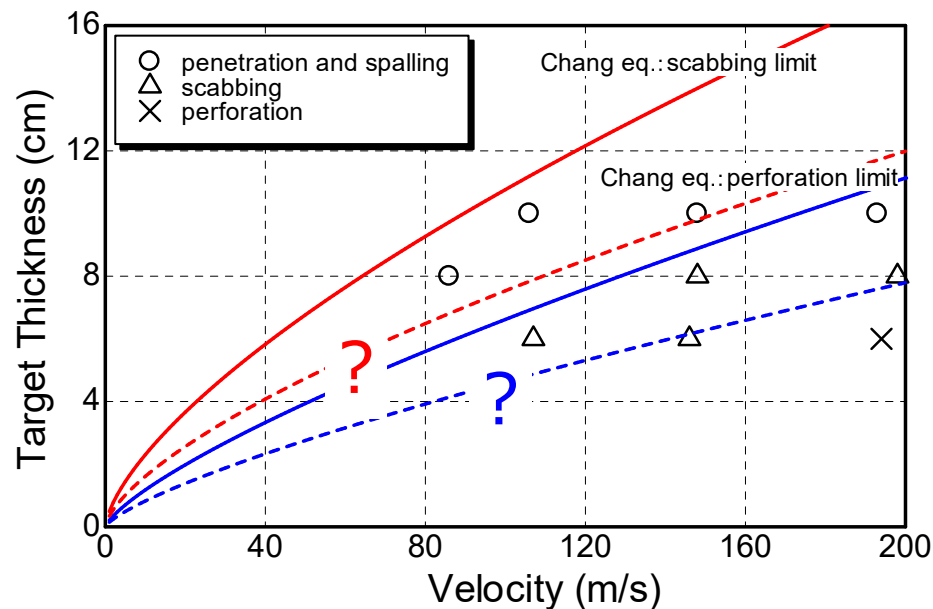
衝突実験後、鉄筋コンクリート板の損傷状況を確認し、貫通を「X」、裏面剥離を「△」、貫入及び裏面剥離なしを「○」として整理。

Chang Eq. following range
衝突速度 V : 16.72 - 311.81(m/s)
飛翔体質量 M : 0.11 - 342.9(kg)
飛翔体直径 d : 0.0201 - 0.3048(m)



剛飛翔体実験結果と評価結果の比較

Chang式による評価結果は実験結果をよく評価できている。



柔飛翔体実験結果

柔飛翔体の衝突に係る評価は、剛飛翔体の評価結果に柔性係数を乗じて評価する。



柔飛翔体の変形による座屈吸収エネルギーの考え方

Jones and Abramowics(1985)によると平均座屈力 P_m は次式より求められる。

$$P_m = \sigma_0 t \frac{6\sqrt{Dt} + 3.44t}{0.86 - 0.57\sqrt{t/D}}$$

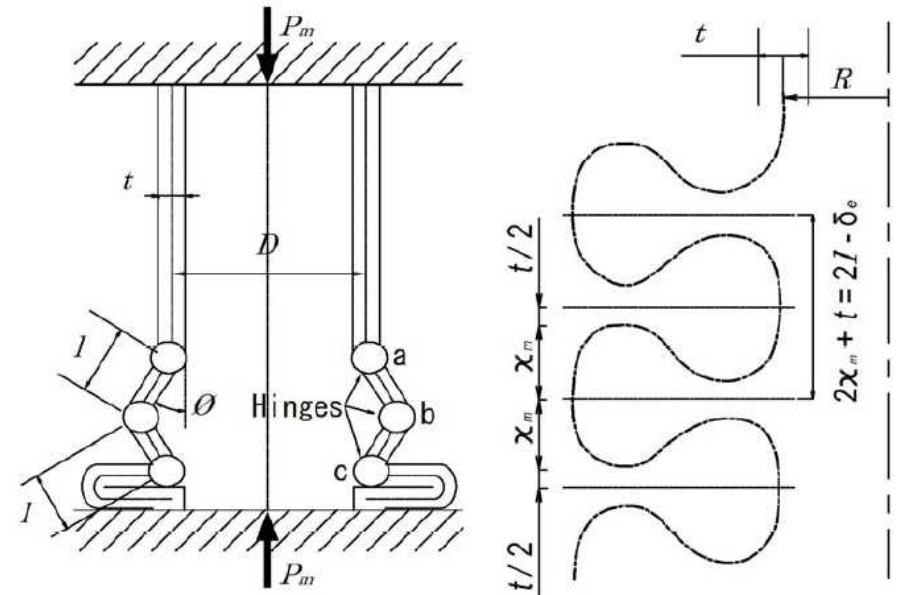
ここで, t : 円筒の肉厚(m), D : 円筒の平均直径(m), σ_0 : 流動応力350MPaである。

平均座屈力を用いて座屈吸収エネルギー E_B (J)を算出する。座屈吸収エネルギーは Riera式より求められる。

$$E_B = \begin{cases} DIF \cdot P_m \Delta l + \frac{\mu V_0^2}{2} \Delta l, & \text{for } \Delta l \leq n\delta_e \\ DIF \cdot P_m n\delta_e + \alpha \cdot DIF \cdot P_{max} (\Delta l - n\delta_e) + \frac{\mu V_0^2}{2} \Delta l, & \text{for } \Delta l > n\delta_e \end{cases}$$

ここで, Δl : 座屈長さ(m), $n\delta_e$: 全有効座屈長(m), DIF : 動的倍率, μ : 単位長さ質量(kg/m), P_{max} : 最大座屈力(kN)である。

出典 太田良巳、高橋千明、蔡飛、鈴木哲夫：柔飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート板の局部損傷評価に関する実験的研究,土木学会構造工学論文集, Vol.65A, pp.890-900, 2019.



(a) Plastic hinges.

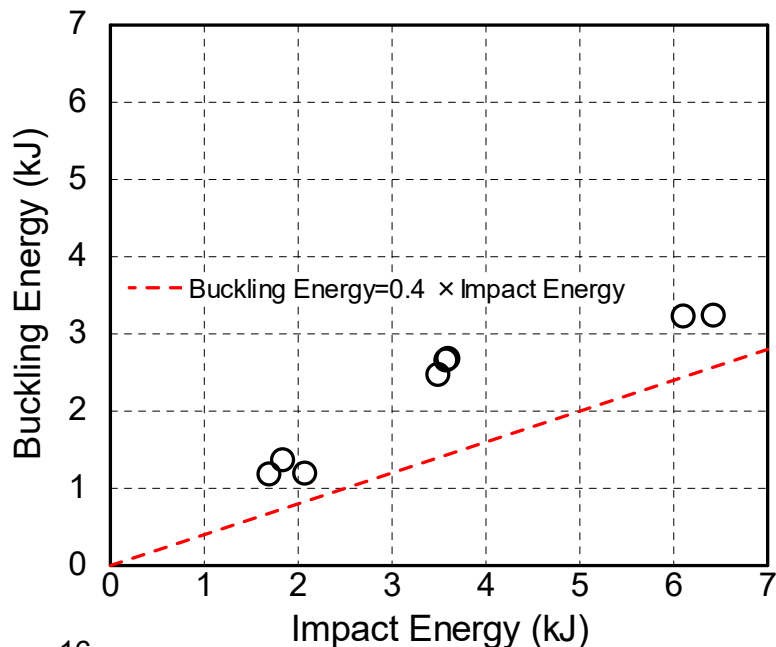
(b) Effective distance δ_e .

蛇腹座屈モードの理想化および有効座屈長



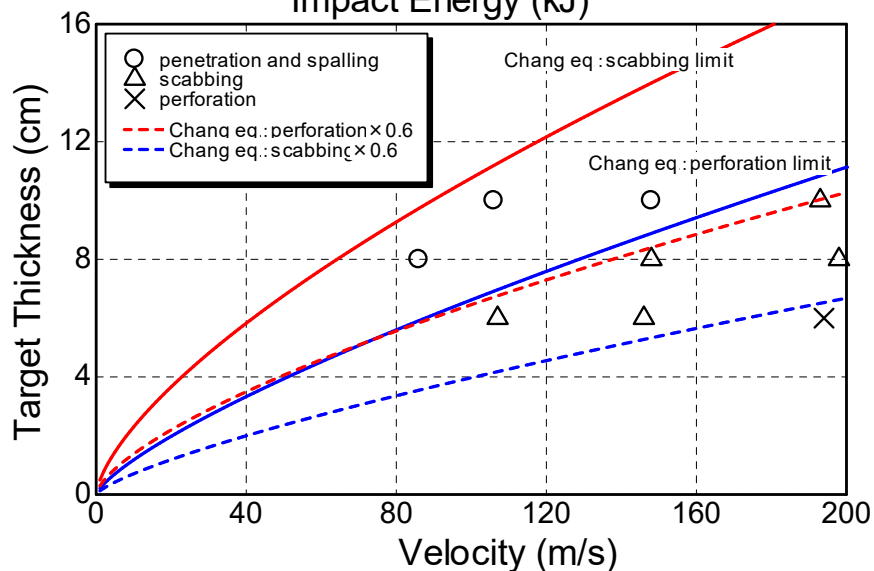
柔飛翔体の変形による柔性係数の考え方

柔飛翔体の衝突エネルギーと吸収エネルギーの関係



柔飛翔体の衝突エネルギーと座屈吸収エネルギーの関係を示す。安全側に見ると座屈による吸収で全衝突エネルギーの4割程度が消費される。

残りの6割が構造物に影響するとし、本実験に対する柔性係数を**0.6**とした。



柔性係数0.6を適用したChang式による評価結果は、柔飛翔体衝突による鉄筋コンクリート板の損傷状況とよい対応がみられた。



UMIST式を用いたエネルギー指標による評価

ひび割れ限界エネルギー ; E_c

$$\frac{E_c}{\eta\sigma_t d^3} = -0.00031 \left(\frac{H}{d}\right) + 0.00113 \left(\frac{H}{d}\right)^2 \quad \text{for } 0 < \frac{H}{d} \leq 2$$

$$\frac{E_c}{\eta\sigma_t d^3} = -0.00325 \left(\frac{H}{d}\right) + 0.0013 \left(\frac{H}{d}\right)^3 \quad \text{for } 2 < \frac{H}{d} \leq 5$$

$$\frac{E_c}{\eta\sigma_t d^3} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 4.7\right) \quad \text{for } \frac{H}{d} > 5$$

裏面剥離限界エネルギー ; E_s

$$\frac{E_s}{\eta\sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = -0.005441 \left(\frac{H}{d}\right) + 0.01386 \left(\frac{H}{d}\right)^2 \quad \text{for } 0 < \frac{H}{d} \leq 5$$

$$\frac{E_s}{\sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{d} - 4.3\right) \quad \text{for } \frac{H}{d} \geq 5$$

貫通限界エネルギー ; E_p

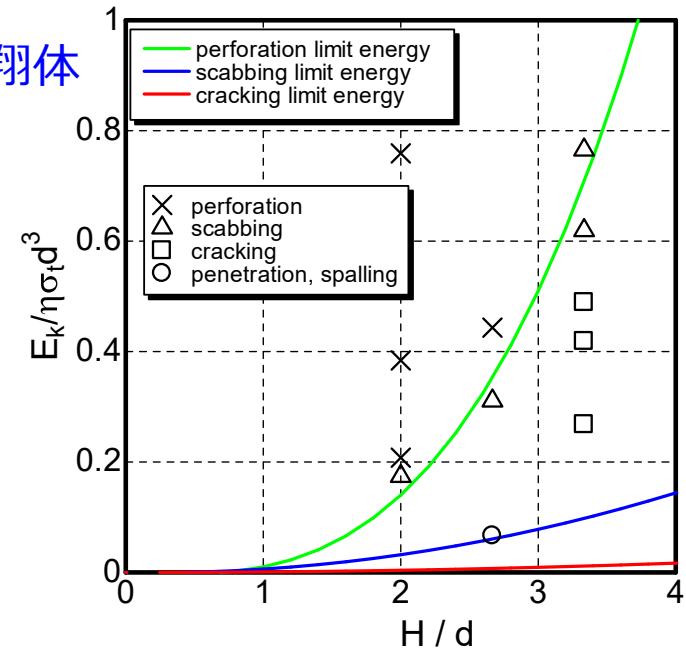
$$\frac{E_p}{f_c' d^3} = \left(\frac{V}{d}\right)^{0.2} f_c'^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \left(210.30 - \sqrt{10^3 \left(44.22 - 10.96 \left(\frac{H}{d}\right) \right)} \right)^2 \quad \text{for } \frac{H}{d} \leq 3.0$$

$$\frac{E_p}{f_c' d^3} = \left(\frac{V}{d}\right)^{0.2} f_c'^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \left(44.45 \left(\frac{H}{d}\right) - 30.68 \right)^2 \quad \text{for } 3.0 < \frac{H}{d} \leq 3.8$$

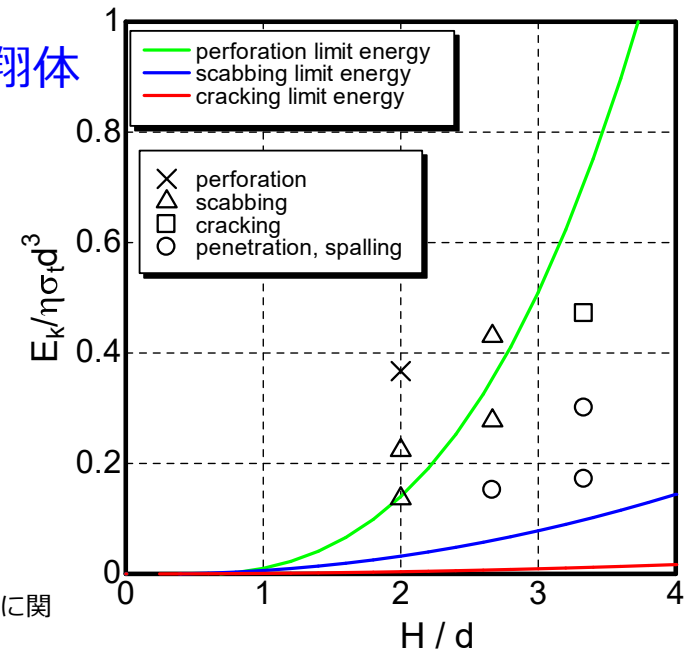
$$\frac{E_p}{f_c' d^3} = \left(\frac{V}{d}\right)^{0.2} f_c'^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \left(10.2 \times 10^3 \left(\frac{H}{d}\right) - 2.02 \times 10^4 \right) \quad \text{for } 3.8 < \frac{H}{d} \leq 18.0$$

H : 板厚

剛飛翔体



柔飛翔体





まとめと今後の展開

- 本研究では、鉄筋コンクリート板への剛及び柔飛翔体の衝突実験を実施し、鉄筋コンクリート板の局部損傷について検討した。
- 柔飛翔体の座屈力から飛翔体の変形による座屈吸収エネルギーを算出し、衝突エネルギーとの比較により柔性係数を求める方法を提案した。今回の実験条件に則した柔性係数を既往の評価式であるChang式に適用した結果、実験結果とよい対応がみられた。
- エネルギーを指標とした評価式であるUMIST式を用いて実験結果の評価を実施した。UMIST式による評価は安全側の結果となった。
- 今後、異なる直径の飛翔体による実験結果を用いて、その適用性を確認していく。