

論文 津波浮遊物による衝撃を受ける鉄筋コンクリート造壁におけるパンチング破壊性状の評価に関する実験的研究

小原 拓^{*1}・中村 聡^{*2}・渡邊 秀和^{*3}・河野 進^{*4}

要旨：2011 年の東日本大震災で発生した津波は鉄筋コンクリート造（以下、RC 造）建物に甚大な津波被害を与えた。そこで、従来の衝撃実験とは異なる比較的低速度な津波浮遊物を想定した衝撃荷重に対する RC 造壁の挙動を評価するために、実験変数は壁厚、コンクリート圧縮強度、衝突速度とし、試験体 16 体を用いた衝撃実験を行った。実験結果を用いて、裏面剥離と貫通破壊の 2 つの損傷状態を予測できる CRIEPI 式と Chang 式の精度検証を行ったところ、裏面剥離の 3 体、貫通破壊の 6 体ではほぼ危険側の評価となった。そこで、この 2 つの損傷状態を 9 体の試験体で安全側となるように予測できる修正式を提案した。

キーワード：津波浮遊物、衝撃荷重、破壊性状、衝突速度、パンチング破壊

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、従来津波に対して強いとされてきた鉄筋コンクリート造建物（以下、RC 造建物）が甚大な津波被害を受けた¹⁾。なかでも、船舶・コンテナ・流木等の衝突による損傷がこれほどの規模で生じたことは国内初であり、その対策は緊急性を要する。しかし、津波避難ビル等の設計に用いられている「津波避難ビル等に係るガイドライン」²⁾や「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」³⁾で示されている構造設計法では、津波漂流物に対する検討項目が掲げられているにも関わらずその評価法についての記述はなく、津波浮遊物の衝突に対しての設計法はほぼ無策の状態となっている。

津波浮遊物に対して建築構造物を設計するためには、構造耐力上主要となる部材の破壊を防ぎ、柱や耐力壁の一部が損傷しても崩壊しないことが重要である。本研究では、部材の局所破壊に対する研究が特に欠如している現状に着目し、検討を行う。

衝撃荷重によって RC 板に生じる破壊性状は、大きく 2 種に分類されることが Kennedy³⁾により報告されている。1 つは局所破壊であり、主に剛な物体が高速で衝突した場合に生じ、破壊の範囲が衝突部付近に集中し、パンチング破壊により壁面が破壊される。もう 1 つは全体応答といわれ、衝突体の質量が比較的大きく、低速度で衝突したときに生じる破壊である。図-1 に、衝撃荷重によって RC 板にみられる典型的な局所破壊性状を示す。局所破壊では、コンクリートの表面が飛散し、RC 板の表面破壊(a)が生じる。また、衝突体の速度を上げると、コ

ンクリートの裏面が剥離する現象(b)が起き、さらに衝突体の速度を上げると、衝突物が RC 板を貫通する現象(c)が起きる。ここで破壊性状の定義を示す。

『表面破壊』：衝突面は、貫入やコンクリートの表面飛散（Spalling）が生じる。RC 板裏面に放射状または円周上にひび割れが生じることもある（図-1 (a)に相当）。

『裏面剥離』：RC 板裏面で放射状または円周上にひび割れが発生し、尚且つコンクリートの剥離・剥落が生じた状態（図-1 (b)に相当）。

『貫通破壊』：RC 板に貫通孔が形成され、衝突体が RC 板を通り抜ける破壊状態（図-1 (c)に相当）。

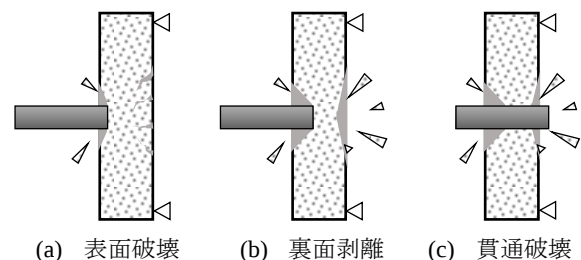


図-1 破壊性状の定義

これらの局所破壊を評価する式は既往の研究で多く提案されている⁴⁾が、その多くは適用範囲がミサイルや銃弾などを想定した高速域での衝突を想定しており、津波漂流物を想定した 7.0m/s 程度における低速域での適用に対し不明瞭な点が多い。なかでも津波漂流物を想定した低速域での衝突実験において貫通破壊を観測した実験例³⁾は数少ない。

ここで、局所破壊の評価式である Chang 式⁵⁾と CRIEPI 式⁶⁾を紹介する。Chang 式⁵⁾は、RC 板に飛来物が衝突するときの破壊性状を予測する評価式であり、CRIEPI

*1 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻

*3 東京工業大学 建築物理センター 助教 博士 (工学) (正会員)

*4 東京工業大学 建築物理センター 教授 PhD. (正会員)

式⁶⁾は、伊藤らが、Chang 式⁵⁾を 4.0m/s～40m/s の比較的低速度の実験結果を用いて修正した評価式である。津波浮遊物を想定した低速域に対する実験結果が非常に少ない中で、CRIEPI 式の適用範囲内である速度は、本実験の目的である津波浮遊物を想定した 7.0m/s 程度の低速域を網羅している。そのため本実験結果の破壊性状における予測に対して CRIEPI 式を用い、さらに CRIEPI 式の参考となっている Chang 式を用いることとした。

式(1)に CRIEPI 式と Chang 式における裏面剥離に対する限界厚さ t_s の評価式を示す。

$$t_s = RF_s \times a_s \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.13} \left\{ \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 RF_s ：柔飛来物に対する低減率(剛飛来物では 1.0)、 V_0 ：基準速度(60.96m/sec)、 V ：衝突速度(m/sec)、 M ：衝突体質量(kg)、 d ：衝突体直径(m)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度で単位は CRIEPI 式で(N/mm²)、Chang 式で(N/m²)、係数 a_s は CRIEPI 式で 6.96×10^{-3} 、Chang 式では 1.84 である。

式(2)に CRIEPI 式と Chang 式における貫通限界厚さ t_p の評価式を示す。

$$t_p = RF_p \times a_p \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.25} \left\{ \frac{MV^2}{d \cdot f_c} \right\}^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 RF_p ：柔飛来物に対する低減率(剛飛来物では 1.0)、係数 a_p は、CRIEPI 式で 8.96×10^{-4} 、Chang 式では 1.00 である。 V_0, V, M, d, f_c は式(1)と同じである。

図-2 に電力中央研究所 (CRIEPI) で行われた衝突速度約 5.0m/s～約 250m/s の実験結果^{6),7)}を CRIEPI と Chang の評価式と共に示す。表面破壊 (□) は黄線の左側に、裏面剥離 (△) は黄線と赤線の間に、貫通破壊 (×) は赤線の右側に位置すると評価式が正確に破壊性状を説明できることになる。裏面剥離 (△) が黄線の左側、又は貫通破壊 (×) が赤線の左側に位置すると評価式は危険側となる。図-2 に示す試験体における実験変数の範囲は、(a)中速度衝撃実験では、衝突速度 4m/s から 40m/s、衝突体質量 70kg、壁厚 100mm から 300mm で衝突体の先端径は約 100mm であり、(b)高速衝撃実験では、衝突速度 40m/s から 250m/s、衝突体質量 100kg、壁厚 400mm から 600mm で衝突体の先端径は 230mm である。図-2 より CRIEPI 式と Chang 式は、実験が行われた(a)中速域の 20m/s 程度以下の範囲では裏面剥離 (△) の数点が貫通破壊を示す評価式 (Chang 式(2)、CRIEPI 式(2)) の右側に位置し、過大に安全側の評価となる。(b)高速域の速度範囲において裏面剥離限界厚さや貫通限界厚さの評価が CRIEPI 式では精度良く評価されているが、Chang 式では(a)中速域と同様に裏面剥離 (△) となった試験体が貫通

破壊を示す評価式 (Chang 式(2)) の右側に位置し、やはり過大に安全側の評価となる。さらに、津波浮遊物を想定した約 7.0m/s 程度の低速域 (図-2 の赤枠線) において、2 体の実験結果しか存在しない。

本実験では、船舶・コンテナ・流木等の津波浮遊物を想定した 7.0m/s 程度の低速域において、実験結果が少ないことに着目し、想定している被害の中で最も被害が大きくなるであろう剛衝突体を用いて低速域に対する衝撃実験を行った。さらに、津波浮遊物に対して建築構造物を設計するために RC 造壁のパンチング破壊性状の評価を行い、比較的低速度に対して評価できる CRIEPI 式および、Chang 式を用いて、低速域範囲内で RC 造壁における破壊性状予測の精度を検証する。そこで破壊性状予測に対して、CRIEPI 式を用いてより精度が高い予測式の提案を行う。CRIEPI 式は、理論式であるが、一部で実験結果からの回帰係数を用いている。このような中で、CRIEPI 式は、比較的低速度もカバーしているが、式を作成したときのメインの実験結果が必ずしも低速度だけを考慮しているわけではない。そのため、低速度をメインターゲットとして実験を行なった本研究の結果を用いて回帰係数についての検討を行う。

2. 実験概要

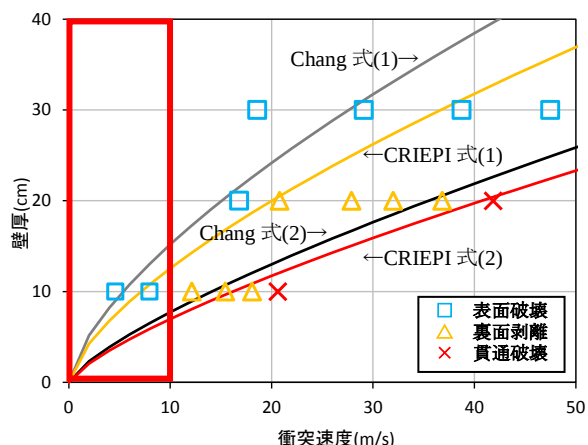
2.1 試験体概要

図-3 に、RC 造壁試験体の寸法と配筋を示す。左半分は壁厚 80mm の試験体を示し、右半分は壁厚 120mm の試験体を示す。RC 造壁試験体は 1300mm×1300mm の正方形 RC 板で、計 16 体製作した。鉄筋には、公称直径 5mm のインデント型溶接金網 (CD5) を用いた。壁厚が 80mm および 120mm の試験体における鉄筋間隔は、それぞれ 150mm と 100mm の 2 種類であり、いずれも鉄筋比は 0.33% である。かぶり厚さは 15mm、最大骨材粒径は 20mm とした。試験体の実験変数を表-1 に示す。試験体の実験変数は、壁厚 (80mm, 120mm)、コンクリート圧縮強度 (28.8MPa, 51.4MPa)、衝突速度 (2.6m/s～9.8m/s) の 3 つとした。表-2 および、表-3 にそれぞれコンクリートおよび鉄筋の静的材料試験によって得られた材料特性を示す。

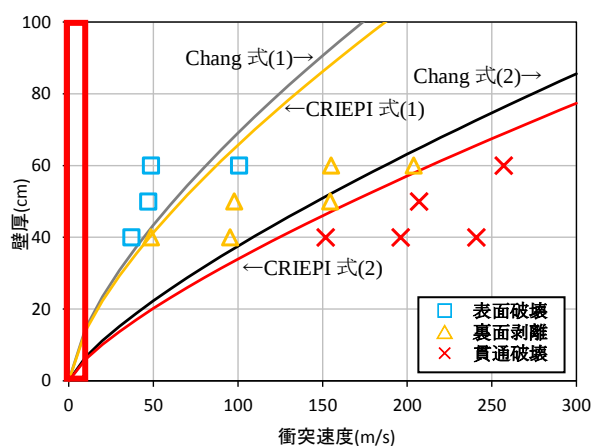
2.2 载荷装置概要

図-4 に、水平衝撃荷重载荷装置を示す。本装置は、反力フレーム、ゴム棒、油圧ジャッキおよび衝突体により構成されている。ゴム棒を油圧ジャッキによって所定の長さだけ伸ばし、ゴム棒の弾性エネルギーを利用して、衝突体を試験体に衝突させることができる。

試験体は、ボルト穴に固定治具を用いて、4 辺とも固定し、3 軸方向の移動と固定辺に対する回転を拘束した。



※図中の式に用いた値： $RF_s=1.0$, $RF_p=1.0$, $M=70\text{kg}$,
 $d=98\text{mm}$, $f_c=29.1\text{N/mm}^2$
 (a) 中速度衝撃実験結果 (4m/s から 40m/s)



※図中の式に用いた値： $RF_s=1.0$, $RF_p=1.0$, $M=100\text{kg}$,
 $d=230\text{mm}$, $f_c=29.1\text{N/mm}^2$
 (b) 高速度衝撃実験結果 (40m/s から 250m/s)

図-2 電力中央研究所 (CRIEPI) で行われた実験結果^{6), 7)}と Chang 式および CRIEPI 式との比較

固定治具周辺において、治具で固定する際のひび割れ防止として、あらかじめ試験体の固定用貫通孔周辺で配筋を二重にした。図-5 に衝突体を示す。衝突体には上下 8 個のベアリングローラーが付随しており、載荷装置のレールに沿って移動し、試験体中央部に衝突させることが可能である。衝突体の重量は 104.95kg, 衝突体長さ $\ell=800\text{mm}$ であり、先端形状は円形で、貫通破壊に対して最も危険側となる平坦形状⁸⁾とした。衝突体先端は直径 100mm の鋼製 (S45C) で構成されている。また、図-6 に示すように衝突体直径と同径で質量 6.18kg の鋼製円柱 ($\phi 100\text{mm} \times h100\text{mm}$) をロードセルとして、試験体と衝突体の間に設置し、衝撃荷重を測定した。ロードセルの剛性は $2.03 \times 10^5 \text{MPa}$ である。

衝突体の速度は、高速度ビデオカメラ (2000fps) およびレーザー式速度計の 2 システムから独立して計測した。

サンプリング周波数 2kHz のビデオ映像の映像解析により衝突直前の速度を算出した (V_1)。また、載荷装置のレールに設置されたレーザー式速度センサを用いて速度を算出した (V_2)。表-1 を見ると、 V_2 のほうが V_1 より大きい傾向があるが、これはレールによる摩擦力によって衝突体の速度が下がったためと考えられる。そのため、実験結果の解析では V_1 を衝突速度として用いた。

なお、別途測定したロードセルとして用いている鋼材部分の歪み計測結果及びコンクリート表面の歪みゲージから弾性波の反射による衝突体の 2 度打ちの兆候は認められていない。

表-1 試験体の実験変数と破壊性状

試験体	実験変数				破壊性状
	壁厚 (mm) 鉄筋比	$f_c^{※1}$ (MPa)	$V_1^{※2}$ (m/s)	$V_2^{※3}$ (m/s)	
S29a	80 mm CD5@150	28.8	2.61	2.79	表面破壊
S29b			5.43	5.34	表面破壊
S29c			6.18	6.20	貫通破壊
S29d			6.44	6.65	貫通破壊
S51a	double (0.33%)	51.4	2.68	2.87	表面破壊
S51b			5.45	5.44	表面破壊
S51c			6.91	7.02	貫通破壊
S51d			8.47	8.57	貫通破壊
L29a	120 mm CD5@100	28.8	5.14	5.29	表面破壊
L29b			5.81	5.86	表面破壊
L29c			6.77	6.94	裏面剥離
L29d			9.80	10.05	貫通破壊
L51a	double (0.33%)	51.4	5.79	5.87	表面破壊
L51b			7.76	7.76	裏面剥離
L51c			8.50	8.50	裏面剥離
L51d			9.33	9.29	貫通破壊

※1 f_c :コンクリートの圧縮強度

※2 V_1 :ビデオカメラにより計測された速度

※3 V_2 :レーザー変位計により計測された速度

表-2 コンクリートの力学的特性

コンクリート種類	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 ^{※1} (GPa)	割裂引張強度 (MPa)
普通強度	28.8	22.4	2.44
高強度	51.4	30.6	3.44

※1 ヤング係数は 1/3 割線弾性係数とした。

表-3 鉄筋の力学的特性

種類	呼び径	ヤング係数 (GPa)	降伏強度 ^{※2} (MPa)	引張強度 (MPa)
壁筋	CD5	197	516	568

※2 降伏強度は 0.2% オフセット耐力とした。

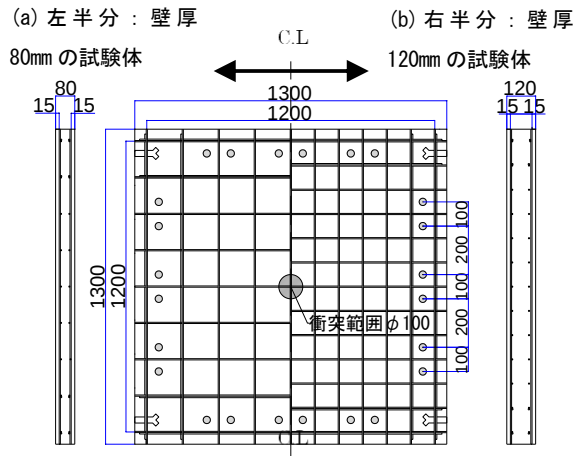


図-3 RC造壁試験体（単位：mm）

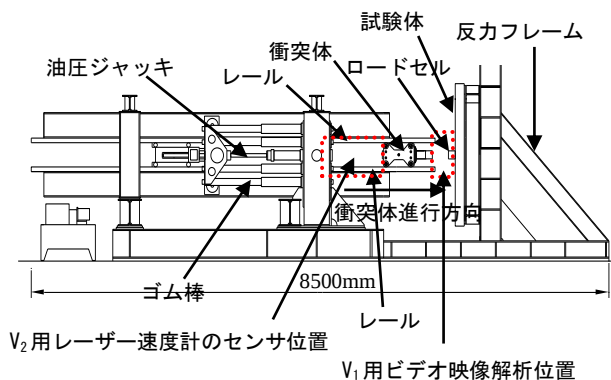


図-4 水平衝撃荷重装置

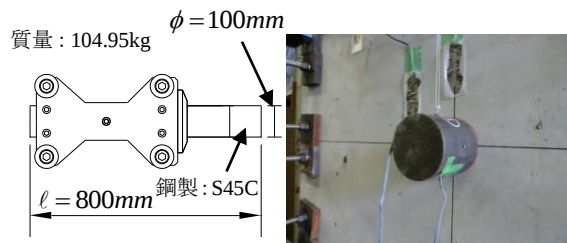


図-5 衝突体

図-6 鋼製ロードセル設置状況

3. 実験結果

3.1 破壊性状の分類

表-4 に、実験によって生じた代表的な破壊状況を示す。表面破壊では、衝突面に貫入や周辺に放射状のひび割れが確認された。裏面剥離では、衝突面に衝突体と同径の円形状に陥没が観察され、試験体によっては、衝突面の壁筋が変形・破断していた。貫通破壊では、衝突面の貫通孔周辺にひび割れはほとんど見られず、衝突面と裏面の両側で破断していた。

衝突速度が特に低い場合では、壁厚(80mm と 120mm)の違いに関わらず、破壊性状は表面破壊となり、差異は確認されなかった。速度の増加に伴って、貫通破壊に至る場合と裏面剥離が生じてから貫通破壊が生じるといった傾向が確認された。

表-4 代表的な破壊状況

試験体名	衝突面	裏面
表面破壊 L29a(5.14m/s)		
裏面剥離 L29c(6.77m/s)		
貫通破壊 L29d(9.80m/s)		

※写真撮影範囲:衝突面:縦 30cm×横 30cm, 裏面:縦 60cm×横 60cm

3.2 壁厚による破壊性状の変化

図-7 に壁厚の違いにおける破壊性状の比較を示す。(a)では、壁厚が厚くなることで壁厚 80mm・衝突速度約 6.0m/s における貫通破壊(×)が壁厚 120mm・衝突速度約 6.0m/s における裏面剥離(△)や表面破壊(□)といった破壊性状に移行する。(b)では、壁厚 80mm・衝突速度約 8.0m/s における貫通破壊(×)が壁厚 120mm・衝突速度約 8.0m/s における裏面剥離(△)に移行する。これらのことから RC 造壁の破壊性状は壁厚による影響を受ける。

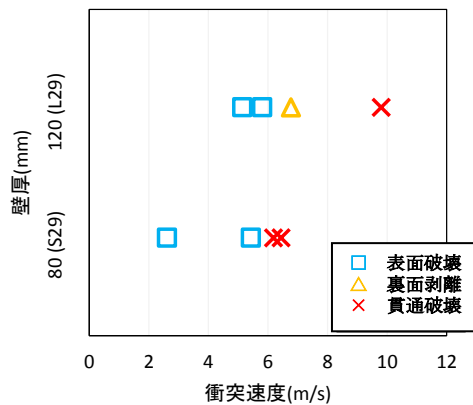
3.3 コンクリート圧縮強度による破壊性状の変化

図-7 (a) (b)においてコンクリート圧縮強度 29MPa と 51MPa の試験体の破壊性状の分布がほとんど重なっている。CRIEPI 式や Chang 式では、コンクリート強度の上昇により貫通(または裏面剥離)限界速度が上昇する計算結果が得られるが、今回の実験では、コンクリート圧縮強度の影響を破壊性状の予測に反映する程のデータが得られなかった。

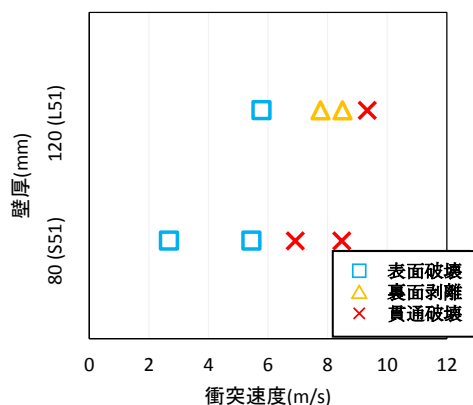
3.4 実験結果を用いた CRIEPI 式および Chang 式の検証

図-8 に、本実験の結果と既往評価式による評価曲線を示す。図-8 における評価式の危険性を数値で示するのが表-5 である。本実験結果の裏面剥離試験体 3 体・貫通破壊試験体 6 体に対し、速度を尺度に比較した。実験速度を予測速度で除した V_{exp}/V_{com} が 1 より小さいと評価

式の予測が危険側となる。予測速度とは、既往評価式である CRIEPI 式・Chang 式、修正式である修正 CRIEPI 式から算出することができる速度である。表-5 では、丸で囲んだ 1 以下の値のみを平均して示した。図-2 では予測精度が高かった CRIEPI 式は裏面剥離(△)の 3 体および貫通破壊(×)の 6 体の全てで危険側の評価となった。CRIEPI 式より安全側の評価となる Chang 式は、CRIEPI 式より予測精度は高いが、津波浮遊物を想定した低速域では CRIEPI 式と同様に危険側の評価を示してしまう。



(a) コンクリート圧縮強度 29MPa

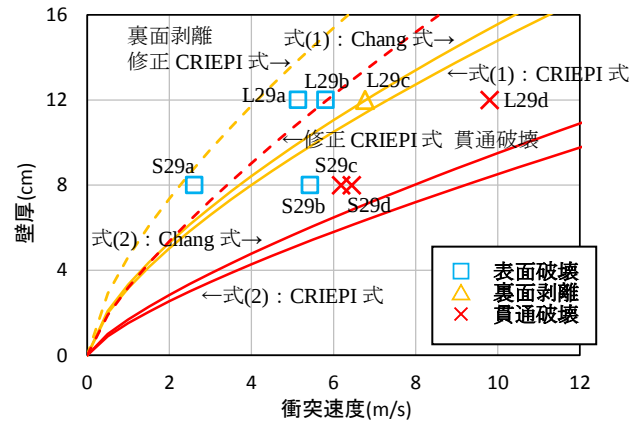


(b) コンクリート圧縮強度 51MPa

図-7 壁厚の違いにおける破壊性状の比較

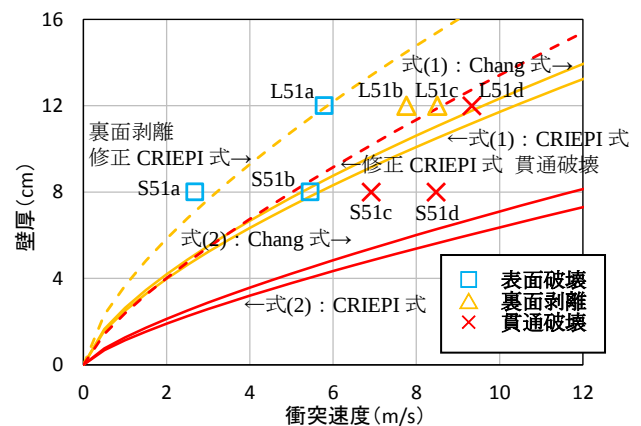
3.5 修正 CRIEPI 式の提案

本研究では、20m/s～50m/s の低速度から中速度領域において比較的精度の良い CRIEPI 式の係数 a_s と a_p を本実験結果に適合するように再修正し、修正 CRIEPI 式として提案する。図-8 に黄点線で裏面剥離に関する修正 CRIEPI 式を、赤点線で貫通破壊に関する修正 CRIEPI 式を示す。全試験体に対し安全側の評価となるように、図-8 (b) の L51a を裏面剥離式が、L51c を貫通破壊式が通過するようにすると、係数 a_s は 10.2×10^{-3} 、係数 a_p は 1.89×10^{-3} となる。この結果、表-5 でも明らかなように 9 体の試験体で危険側の評価がなくなった。



※図に用いた値: $RF_s=1.0$, $RF_p=1.0$, $M=104.95\text{kg}$, $d=100\text{mm}$, $f_c=28.8\text{N/mm}^2$

(a) コンクリート強度 29N/mm² の場合 (S29, L29)



※図に用いた値: $RF_s=1.0$, $RF_p=1.0$, $M=104.95\text{kg}$, $d=100\text{mm}$, $f_c=51.4\text{N/mm}^2$

(b) コンクリート強度 51N/mm² の場合 (S51, L51)

図-8 本実験における実験結果

表-5 Chang 式・CRIEPI 式・修正 CRIEPI 式の危険性評価

(a) 裏面剥離試験体と裏面剥離予測式の比較

試験体	壁厚 t (mm)	衝突体速度 v_{exp} (m/s)	Chang v_{com} (m/s)	CRIEPI v_{com} (m/s)	修正 CRIEPI 式 v_{com} (m/s)
L29c	120	6.77	6.8	7.34	4.14
L51b	120	7.76	9.6	10.37	5.84
L51c	120	8.50	9.6	10.37	5.84
不適合試験体のみの平均			0.85	0.83	3体とも適合

(b) 貫通破壊試験体と貫通破壊予測式の比較

試験体	壁厚 t (mm)	衝突体速度 v_{exp} (m/s)	Chang v_{com} (m/s)	CRIEPI v_{com} (m/s)	修正 CRIEPI 式 v_{com} (m/s)
S29c	80	6.18	7.97	9.22	3.40
S29d	80	6.44	7.97	9.22	3.40
S51c	80	6.91	11.72	13.57	5.86
S51d	80	8.47	11.72	13.57	5.86
L29d	120	9.80	13.68	15.84	5.84
L51d	120	9.33	20.13	23.31	8.62
不適合試験体のみの平均			0.68	0.59	6体とも適合

但し、コンクリート圧縮強度を反映して、図-8 (b)の修正式の2曲線が図-8 (a)では左方向にシフトしており、3.3 章でコンクリート圧縮強度 f_c の影響は少ないと示したことを反映できていない。また、裏面剥離 (Δ) が貫通破壊 (赤点線) の右に位置するなど、あまりに安全側の評価式となっている。そこで表-6 に本実験結果の表面破壊試験体7体・裏面剥離試験体3体がどれ程安全側に過大評価されているのかを示した。表-6 に示す不適合試験体みの平均は、安全率1.00以上の平均値である。

表-6 (a)において、修正 CRIEPI 式を用いた場合、不適合試験体みの平均が1.58と他2式に比べ大きく安全側の評価となった。表-6 (b)においては修正 CRIEPI 式を用いた場合、試験体 L29c で1.16と安全側の評価となった。全試験体を危険側にならないように、評価式の修正をすると、最も危険側にあった試験体に引きずられて評価式の健全性が失われる。3.3 節を反映して、コンクリート圧縮強度 29MPa の強度でも 51MPa の曲線を使用するなどの修正が精度向上に必要となる。

表-6 安全側に関する Chang 式・CRIEPI 式・修正 CRIEPI 式の評価

(a) 表面破壊試験体と裏面剥離予測式の比較								
試験体	壁厚 t (mm)	衝突体速度 v_{exp} (m/s)	Chang		CRIEPI		修正CRIEPI式	
			v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}	v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}	v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}
S29a	80	2.61	3.71	0.70	4.01	0.65	2.26	1.15
S29b		5.43		1.46		1.35		2.40
S51a		2.68	5.24	0.51	5.66	0.47	3.20	0.84
S51b		5.45		1.04		0.96		1.70
L29a	120	5.14	6.80	0.76	7.34	0.70	4.14	1.24
L29b		5.81		0.85		0.79		1.40
L51a		5.79	9.60	0.60	10.37	0.56	5.86	0.99
不適合試験体みの平均				1.25		1.35		1.58

(b) 裏面剥離試験体と貫通破壊予測式の比較								
試験体	壁厚	衝突体速度	Chang		CRIEPI		修正CRIEPI式	
	t (mm)	v_{exp} (m/s)	v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}	v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}	v_{com} (m/s)	v_{exp} / v_{com}
L29c	120	6.77	13.68	0.49	15.84	0.43	5.84	1.16
L51b		7.76	20.13	0.39	23.31	0.33	8.62	0.90
L51c		8.50		0.42		0.36		0.99
不適合試験体みの平均			3体とも適合		3体とも適合		1.16	

4. まとめ

津波浮遊物を想定した水平衝撃荷重に対する RC 造壁の試験体 16 体を用いた実験を行い、以下 2 点の結論を得た。

- 津波浮遊物を想定した衝撃荷重を受ける RC 造壁の破壊性状である裏面剥離と貫通破壊を評価した既往の評価式 CRIEPI 式と Chang 式を用いて、10m/s 以下の低速域における局部損傷（裏面剥離・貫通破壊）評価の検証を行った。その結果、裏面剥離 3 体と貫通破壊 6 体の損傷予測において、両式共にほぼ危険側の評価となった。
- CRIEPI 式を修正して、9 体の試験体で破壊性状予測

が安全側となるような修正 CRIEPI 式を提案した。
過大な安全側の評価となった。

今後は、評価式の改善に対してコンクリート強度や鉄筋の効果について検証し、より精度の高い評価式を提案する。そして、裏面剥離や貫通破壊といった破壊を防ぐために、繊維補強コンクリートや裏面鋼板補強などの耐衝撃性向上に向けた改善方法の提案や補強効果の検討を行う。また、津波浮遊物として多く確認された流木などの柔体が RC 造建物に与える影響も明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究は科学研究費補助金・基盤研究(A)(代表者:田中仁史教授)により行いました。また防衛大学の藤掛教授、アモンテッブ氏、京都大学の田中仁史教授、丸山敬教授、宮川豊章教授や鹿島建設技術研究所の鈴木紀雄氏、渡邊茂雄氏にご協力を頂きました。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- 国土交通省: 津波に対し構造上安全な建築物の設計法等に係る技術的助言(国住指第 2570 号)の別添、東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針, 2011
- 内閣府: 津波避難ビル等に係るガイドライン, 2005
- Kennedy R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design, Vol.37, pp. 183-203, 1976
- A. R. C. Murthy, G. S. Palani, and N. R. Iyer: Impact Analysis of Concrete Struct. Components, Defence Science Journal, Vol. 60, No. 3, pp. 307-319, 2010
- Chang, W. S.: Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers, J of the ST Division of ASCE, Vol.106, No.ST2, pp. 257-271, 1981
- 伊藤千浩,大沼博志,白井孝治: 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp. 201-208, 1995
- 伊藤千浩,大沼博志,白井孝治: 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 電力中央研究所報告 No. U24, 1991
- 三輪幸治,別府万寿博,大野友則: 先端形状が異なる衝突体の水平低速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の局部損傷メカニズムと評価法, 土木学会構造工学論文集 Vol.56A, pp. 1196-1205, 2010 年