一般社団法人 リペア会 第42回定例会（九州支部）

コンクリート構造物の動的耐荷性能を考える
～劣化や補強の影響を中心に～

Date: 2026.11.10

玉井 宏樹

九州大学大学院　工学研究院　社会基盤部門
構造解析学研究室　准教授

1

本日の内容

1．自己紹介

2．研究内容について
- 1) これまでの主な研究内容
- 2) 防災に資する研究
- 3) インフラ維持管理に資する研究

3．“劣化”および“補強”に関する研究事例
- 1) ASR劣化したコンクリートの動的耐荷性能
- 2) 鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能
- 3) いくつかの耐衝撃補強方法

4．おわりに

2

本日の内容

1．自己紹介

2．研究内容について
- 1) これまでの主な研究内容
- 2) 防災に資する研究
- 3) インフラ維持管理に資する研究

3．“劣化”および“補強”に関する研究事例
- 1) ASR劣化したコンクリートの動的耐荷性能
- 2) 鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能
- 3) いくつかの耐衝撃補強方法

4．おわりに

3

自己紹介と個人経歴（学歴・職歴）



- ◆ 誕生月：昭和56年3月生まれ
- ◆ 出身地：鹿児島県指宿市
- ◆ 専門：構造工学，コンクリート工学，衝撃工学



年	月	学歴・職歴（各別にまとめて書く）
		学　　歴
平成 11 年	3	私立志學館高等部（鹿児島県）　卒業
平成 11 年	4	九州大学工学部地球環境工学科　入学
平成 15 年	3	九州大学工学部地球環境工学科（建設都市工学コース）　卒業
平成 15 年	4	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　修士課程　入学
平成 17 年	3	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　修士課程　修了
平成 17 年	4	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　博士後期課程　入学
平成 20 年	3	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　博士後期課程　修了
		職　　歴
平成 20 年	4	学校法人 福岡大学 助教（工学部社会デザイン工学科）　採用
平成 23 年	3	学校法人 福岡大学 助教（工学部社会デザイン工学科）　退職
平成 23 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院建設デザイン部門）採用
平成 24 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院社会基盤部門）配置換
令和 1 年	9	米国 University of California, Davis 校にて在外研究（令和 2 年 8 月まで）
令和 5 年	4	国立大学法人 九州大学 准教授　就任
		現在に至る．

4

構造解析学研究室

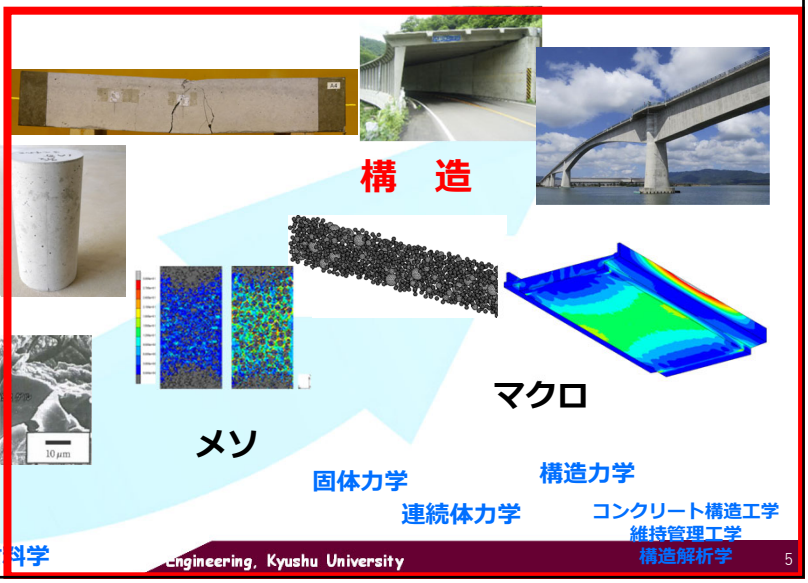


教授
元 理事
元 副学長

専門
構造工学
衝撃工学

園田 佳巨

「力学」を駆使し，構造工学的観点で安心で安全な社会基盤を構築する



5

研究歴　～研究期間～

年	月	学歴・職歴（各別にまとめて書く）
		学　　歴
平成 11 年	3	私立志學館高等部（鹿児島県）　卒業
平成 11 年	4	九州大学工学部地球環境工学科　入学
平成 15 年	3	九州大学工学部地球環境工学科（建設都市工学コース）　卒業
平成 15 年	4	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　修士課程　入学
平成 17 年	3	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　修士課程　修了
平成 17 年	4	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　博士後期課程　入学
平成 20 年	3	九州大学大学院工学府建設システム工学専攻　博士後期課程　修了
		職　　歴
平成 20 年	4	学校法人 福岡大学 助教（工学部社会デザイン工学科）　採用
平成 23 年	3	学校法人 福岡大学 助教（工学部社会デザイン工学科）　退職
平成 23 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院建設デザイン部門）採用
平成 24 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院社会基盤部門）配置換
令和 1 年	9	米国 University of California, Davis 校にて在外研究（令和 2 年 8 月まで）
令和 5 年	4	国立大学法人 九州大学 准教授　就任
		現在に至る．

◆ 研究期間：約20年
：学位取得前：6年
：学位取得後：17年

連続体力学，弾塑性力学，損傷力学
有限要素法や粒子法による数値解析

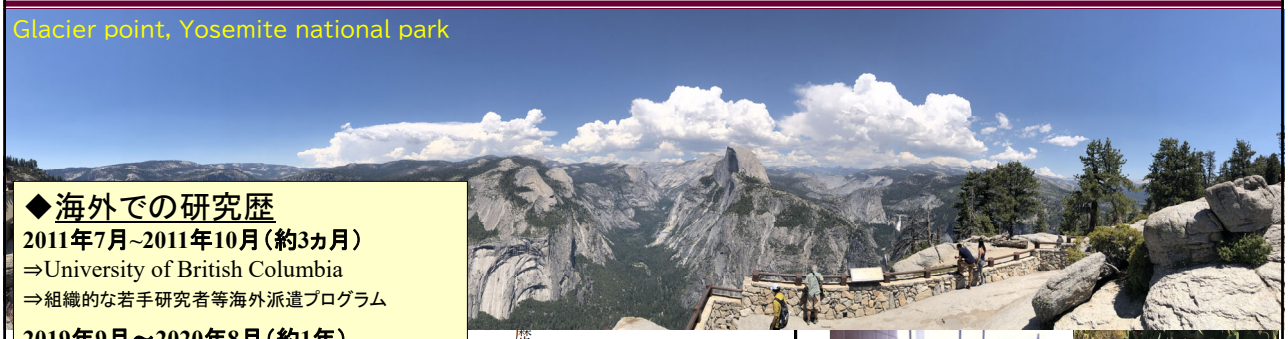
学位記：九州大学 工博甲第1689号
「衝突荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の残存耐力評価に関する研究」

数値解析のみならず，積極的に実験力学メインだが，電気化学や情報分野も

・防災（ハード対策）
・維持管理（非破壊検査，損傷メカニズム解明，残存性能評価）
・各種インフラ（電力，ガス，下水道など）施設の合理的維持管理

6

研究歴　~海外での研究歴~



◆海外での研究歴

2011年7月~2011年10月（約3ヵ月）
⇒University of British Columbia
⇒組織的な若手研究者等海外派遣プログラム

2019年9月～2020年8月（約1年）
⇒University of California, Davis
⇒Progress100若手研究者グローバルリーダー育成型

歴

		社会デザイン工学科）　採用
		社会デザイン工学科）　退職
平成 23 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院建設デザイン部門）採用
平成 24 年	4	国立大学法人 九州大学 助教（大学院工学研究院社会基盤部門）配置換
令和 1 年	9	米国 University of California, Davis 校にて在外研究（令和 2 年 8 月まで）
令和 5 年	4	国立大学法人 九州大学 准教授　就任
		現在に至る．


Nemkumar Banthia教授


John E. Bolander教授

7

本日の内容

1．自己紹介

2．研究内容について
1) これまでの主な研究内容
2) 防災に資する研究
3) インフラ維持管理に資する研究

3．“劣化”および“補強”に関する研究事例
1) ASR劣化したコンクリートの動的耐荷性能
2) 鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能
3) いくつかの耐衝撃補強方法

4．おわりに

8

これまでの主な研究内容

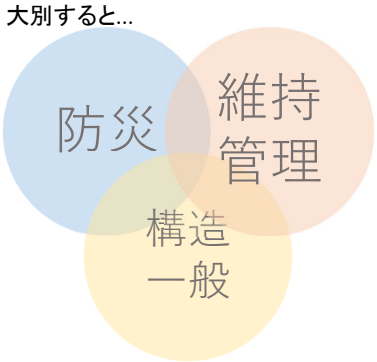
基本方針

力学・材料学・数値解析技術などを駆使し，
構造工学的観点で安心で安全な社会基盤を構築する



研究手法

大別すると…



ターゲットにしている分野

【大分類】

- 各種構造部材の耐衝撃性能の定量評価およびその補強工法の開発に関する研究
- 大規模地震に対する橋梁の耐震性向上策の提案

⇒過大作用（地震・衝撃）を受ける構造部材および構造物の安全性評価とその補強

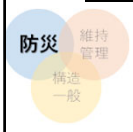
- 劣化により損傷を有するコンクリート材料・構造の破壊とその耐荷性能に関する研究

⇒鉄筋腐食やアルカリシリカ反応（ASR）を対象

- 地方インフラのメンテナンスに関する活動

防災に資する研究　その１

- **各種構造部材の耐衝撃性能の定量評価およびその補強工法の開発に関する研究**



①鉄筋コンクリート構造部材（RC梁，版）の耐衝撃性能の定量評価と補強工法の開発

目的:

自然現象に含まれる衝撃荷重に対するRC梁・版の応答や破壊を定量的に評価し，関連施設の合理的な設計，または，補強工法の開発を実現する





防護（防災）構造物の例

主要荷重

静荷重ではなく，衝撃荷重

⇩

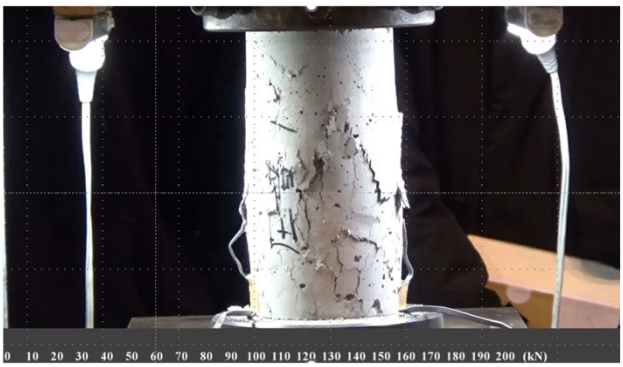
・応答や破壊は複雑化
・解くのも難しい
（空間だけでなく時間も）

⇩

防護構造物の性能照査型
耐衝撃設計法は未確立

防災に資する研究　その１

➢**静的載荷と衝撃載荷とでは，何が違うか？（材料レベル）**



コンクリートの円柱供試体の一軸圧縮試験（ひずみ速度10^{-7}）



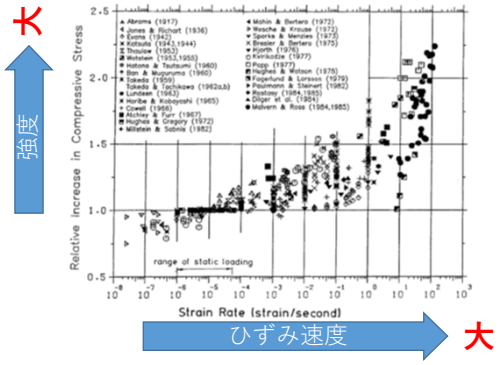
コンクリートの円柱供試体の一軸圧縮試験（ひずみ速度10^{-1}）

⇒破壊性状が異なる

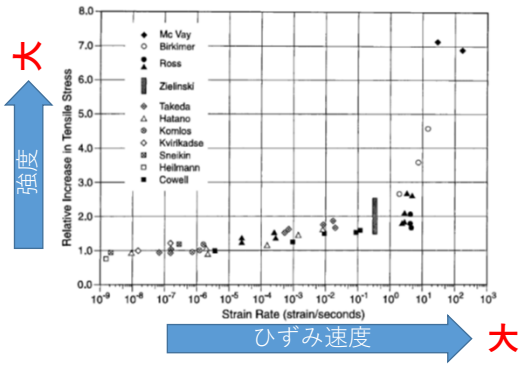
11

防災に資する研究　その１

➢**静的載荷と衝撃載荷とでは，何が違うか？（材料レベル）**



コンクリート圧縮強度へのひずみ速度効果の影響



コンクリート引張強度へのひずみ速度効果の影響

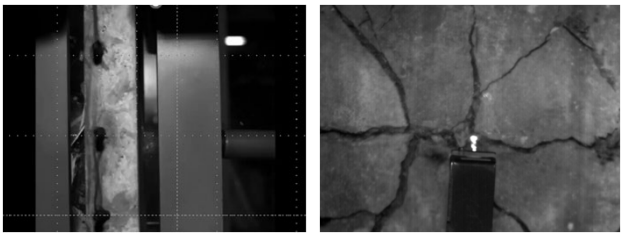
⇒強度が異なる

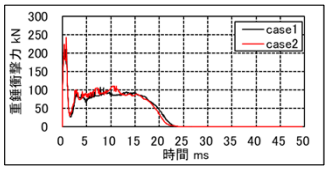
12

防災に資する研究　その１

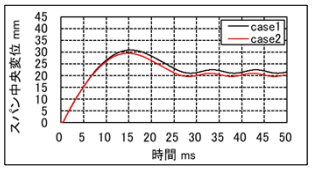
➢**静的載荷と衝撃載荷とでは，何が違うか？（部材レベル）**



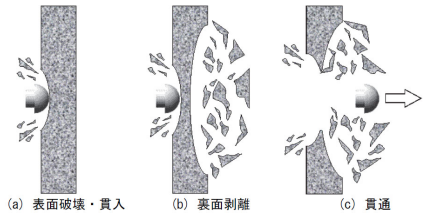




衝撃力波形



変位波形



⇒出力が一つの値ではなく応答である　⇒全体応答だけではなく，局部破壊が。

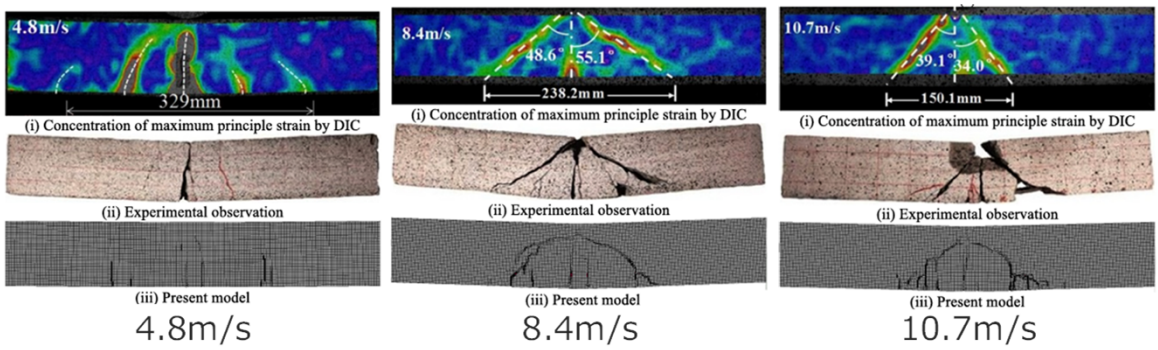
13

防災に資する研究　その１

➢**静的載荷と衝撃載荷とでは，何が違うか？（部材レベル）**

Chengらの研究

Effect of impact velocity on the failure modes of a RC beam, IJIE, 2022 .



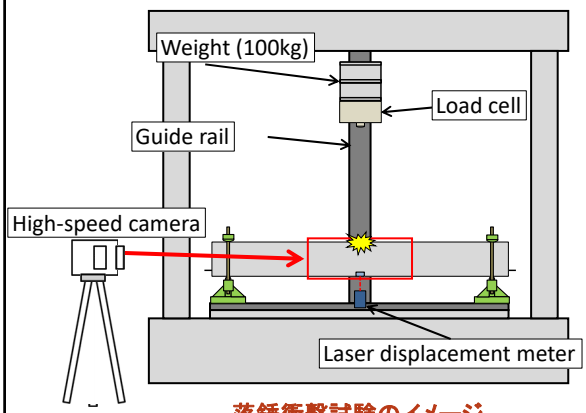
⇒衝突速度が増加すると，加速度・慣性力が局所的に発生し，破壊モードが異なる場合がある

14

防災に資する研究　その１

➢ **静的載荷と衝撃載荷とでは，何が違うか？（部材レベル）**

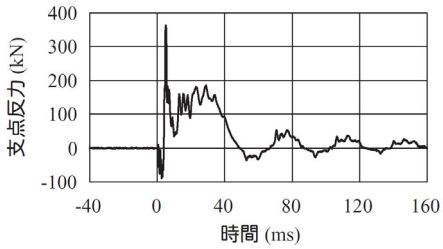
Conterintuitive phenomenon（非直感的現象）が生じる場合がある！



落錘衝撃試験のイメージ

例えば・・・

・衝突直後に負の支点反力が生じる



・最大反力が最大衝撃力を上回る場合がある

など。

15

防災に資する研究　その１

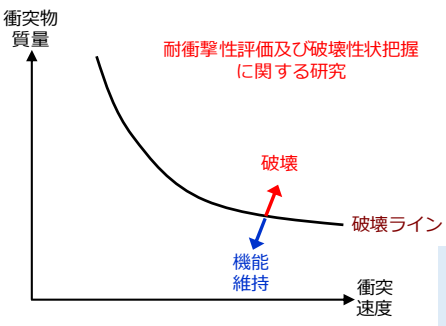
➢ **各種構造部材の耐衝撃性能の定量評価およびその補強工法の開発に関する研究**

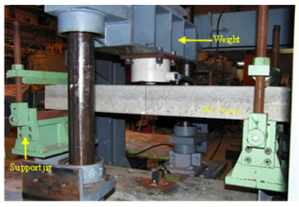
①鉄筋コンクリート構造部材（RC梁，版）の耐衝撃性能の定量評価と補強工法の開発

防災 維持管理 構造一般

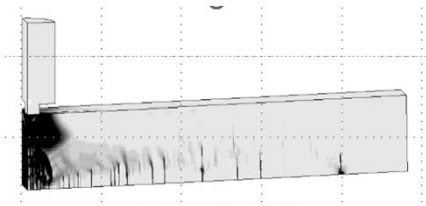
目的:

自然現象に含まれる衝撃荷重に対するRC梁・版の応答や破壊を定量的に評価し，関連施設の合理的な設計，または，補強工法の開発を実現する





RC梁の衝撃実験例



RC梁の衝撃応答（解析例）

成果:

・実験により，RC梁・版の応答や破壊メカニズムを解明

・**連続体損傷力学ベースの損傷解析法の提案**，有用性確認

⇒防護（防災）構造物の性能照査型設計へと繋げる

16

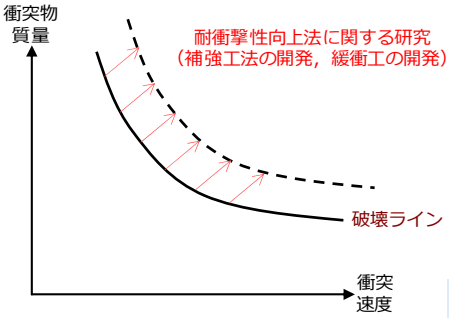
防災に資する研究　その１

➢ **各種構造部材の耐衝撃性能の定量評価およびその補強工法の開発に関する研究**

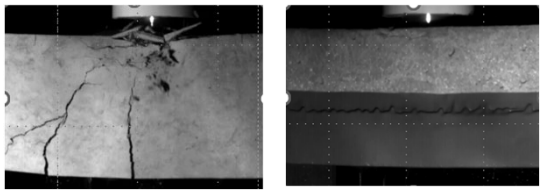
①鉄筋コンクリート構造部材（RC梁，版）の耐衝撃性能の定量評価と補強工法の開発

目的:

自然現象に含まれる衝撃荷重に対するRC梁･版部材の応答や破壊を定量的に評価し，関連施設の合理的な設計，または，補強工法の開発を実現する



･炭素繊維ベースのパネル貼付工法（施工性，耐候性）
･ポリウレア樹脂被覆工法（施工性，耐候性）



成果:

･各工法の耐衝撃補強用途への有効性を確認

⇒既設の防護（防災）構造物の合理的な補強へと繋げる

17

防災に資する研究　その１

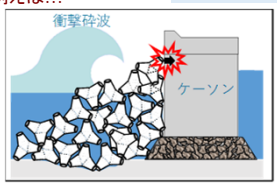
➢ **各種構造部材の耐衝撃性能の定量評価およびその補強工法の開発に関する研究**

②繰り返し衝撃荷重を受けるRC 部材（梁・版）の残存性能評価法の開発

目的:

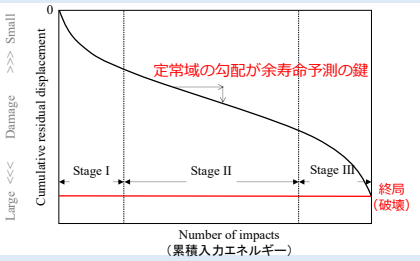
防護構造物も単発の衝撃作用で致命的破壊に至ることは稀で，供用期間中に繰り返し衝撃作用を受けることは明らか。その破壊過程の解明は重要。

例えば…



繰り返し衝撃荷重が問題になる事例

多数のRC梁の繰り返し衝撃実験を実施
（1つの供試体に100回を超える回数も）



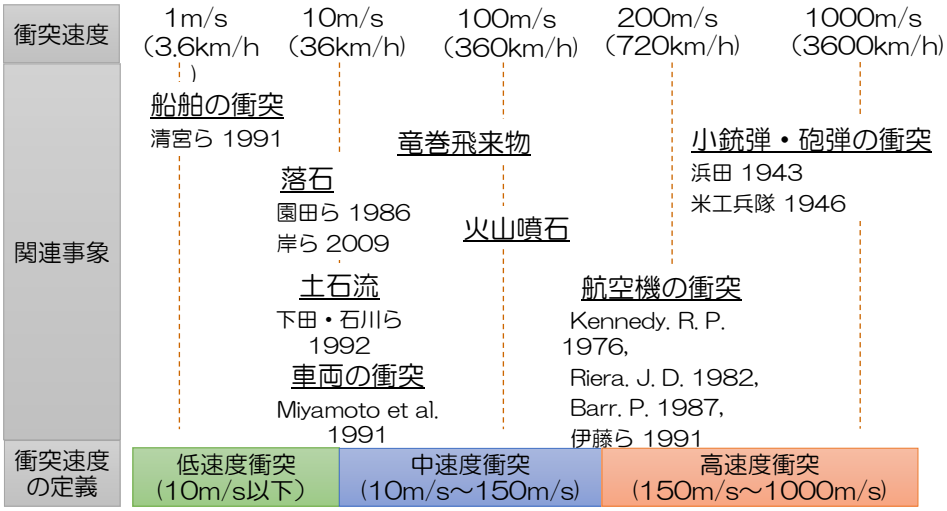
成果:

･累積入力エネルギー（衝突回数）と破壊（累積残留変位）の関係に一定の規則性があることを解明【国内外初】
･RC 梁の配筋や形状に関わらず，**加速（遷移）･定常･加速（進展）の3 ステージから成り，定常域の勾配で破壊に至る累積入力エネルギーを予測可能**

⇒防護構造物の余寿命予測へと繋げる

18

土木分野における構造物の衝撃問題　～速度帯～



19

土木学会構造工学委員会　衝撃問題連絡小委員会（1991年～）



20

防災に資する研究　その２

➢ **大規模地震に対する橋梁の耐震性向上策の提案**

防災　維持管理　構造　一般

目的:

大規模地震時の橋梁全体系の損傷や局所系の損傷について詳細分析し，橋梁全体系としての損傷を低減可能な耐震性向上策の提案

⇒新たな設計思想へと繋げる。その一つが，損傷制御（誘導）設計

・たとえ，想定以上の地震力が作用しても，
・たとえ，断層が動いたとしても，
} 力で抵抗しない

↓

落橋を防ぐために，橋桁や橋脚より先に支承部を先行破壊させる

↓

支承の破壊性状や終局状態の詳細な把握が必要
（今までの設計では全く必要なかったが。。）

防災に資する研究　その２

➢ **大規模地震に対する橋梁の耐震性向上策の提案**

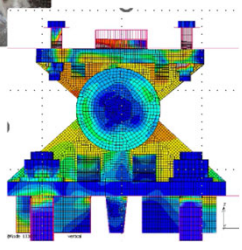
防災　維持管理　構造　一般

目的:

大規模地震時の橋梁全体系の損傷や局所系の損傷について詳細分析し，橋梁全体系としての損傷を低減可能な耐震性向上策の提案



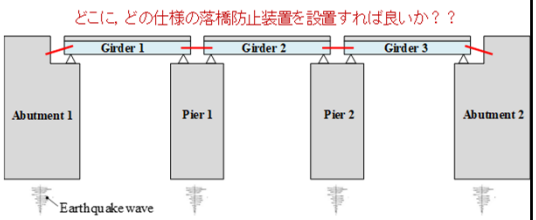
鋼製支承



詳細モデルによる大変形非線形接触解析（FEM）



ケーブル式落橋防止装置



地震応答解析（FEM）と遺伝的アルゴリズム（GA）

成果:

・GAを用いたケーブル式落橋防止装置の最適配置の提案
・地震時の複合荷重下の鋼製支承の終局破壊過程の解明
⇒損傷制御（誘導）設計など新たな設計思想へと繋げる

防災に資する研究　その２

➢ **大規模地震に対する橋梁の耐震性向上策の提案**

防災　維持管理　構造　一般

目的:

大規模地震時の橋梁全体系の損傷や局所系の損傷について詳細分析し，橋梁全体系としての損傷を低減可能な耐震性向上策の提案

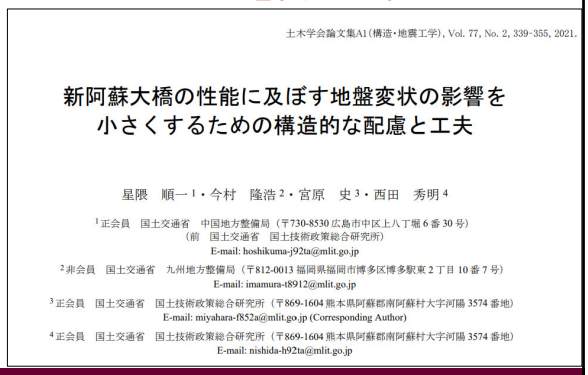
⇒新たな設計思想へと繋げる。その一つが，構造リダンダンシーを高めた設計

・たとえ，PCラーメン橋において，一つの橋脚が鉛直支持を失ったとしても，片持ち状態の桁を他の橋脚が支えることができればよい

↓

そのためには，橋脚の靭性向上は不可欠





土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 77, No. 2, 339-355, 2021.

新阿蘇大橋の性能に及ぼす地盤変状の影響を小さくするための構造的な配慮と工夫

星隈　順一[1]・今村　隆浩[2]・宮原　史[3]・西田　秀明[4]

[1]正会員　国土交通省　中国地方整備局（〒730-8530 広島市中区上八丁堀 6 番 30 号）
（前　国土交通省　国土技術政策総合研究所）
E-mail: hoshikuma-j92ta@mlit.go.jp

[2]非会員　国土交通省　九州地方整備局（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東 2 丁目 10 番 7 号）
E-mail: imamura-t8912@mlit.go.jp

[3]正会員　国土技術政策総合研究所（〒869-1604 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽 3574 番地）
E-mail: miyahara-t852a@mlit.go.jp (Corresponding Author)

[4]正会員　国土交通省　国土技術政策総合研究所（〒869-1604 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽 3574 番地）
E-mail: nishida-h92ta@mlit.go.jp

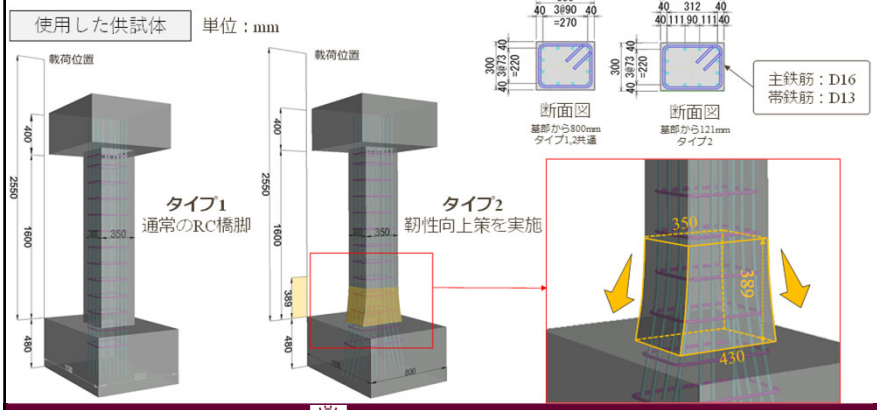
防災に資する研究　その２

➢ **大規模地震に対する橋梁の耐震性向上策の提案**

防災　維持管理　構造　一般

目的:

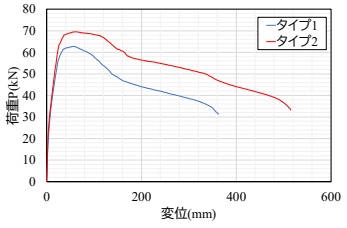
大規模地震時の橋梁全体系の損傷や局所系の損傷について詳細分析し，橋梁全体系としての損傷を低減可能な耐震性向上策の提案



新たな設計思想

↓

新たな橋脚の靭性向上策の開発



インフラ維持管理に資する研究　その１

➢ **劣化により損傷を有するコンクリート材料・構造の破壊とその耐荷性能に関する研究**

①**鋼材腐食**を有する**RC** 部材の破壊性状に及ぼす載荷速度依存性の影響に関する研究

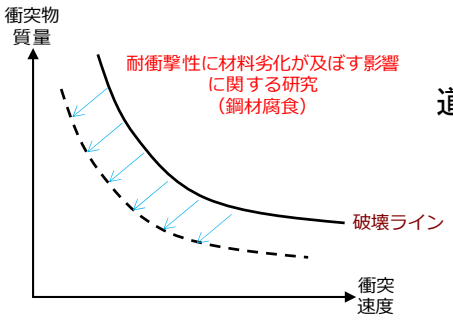
防災　維持管理　構造一般

目的：

静荷重載荷時と衝撃荷重載荷時で鉄筋腐食により劣化したRC部材の破壊は変わるか？また，設計当初の耐衝撃性を有しているのか？の解明



鉄筋腐食の例



道路橋など，静荷重載荷時の耐荷性能については多くの知見

⇩

衝撃荷重載荷時は？？

25

インフラ維持管理に資する研究　その１

➢ **劣化により損傷を有するコンクリート材料・構造の破壊とその耐荷性能に関する研究**

①**鋼材腐食**を有する**RC** 部材の破壊性状に及ぼす載荷速度依存性の影響に関する研究

防災　維持管理　構造一般

目的：

静荷重載荷時と衝撃荷重載荷時で鉄筋腐食により劣化したRC部材の破壊は変わるか？また，設計当初の耐衝撃性を有しているのか？の解明



26

インフラ維持管理に資する研究　その１

➢ **劣化により損傷を有するコンクリート材料・構造の破壊とその耐荷性能に関する研究**

①**鋼材腐食**を有する**RC** 部材の破壊性状に及ぼす載荷速度依存性の影響に関する研究

防災　維持管理　構造一般

目的：

静載荷時と衝撃載荷時で鉄筋腐食により劣化したRC部材の破壊は変わるか？また，設計当初の耐衝撃性を有しているのか？の解明



曲げひび割れの発生（曲げ破壊）
⇒局部破壊は見られない
静荷重載荷時の破壊状況



かぶりコンクリートの剥落
衝撃荷重載荷時の破壊状況

成果：

・同程度の腐食であっても，衝撃載荷時はかぶり剥落も助長され，破壊がより脆性化し，耐荷性能が著しく低下する

⇒防護構造物に関しては道路橋とは差別化した維持管理の必要性

27

インフラ維持管理に資する研究　その２

➢ **劣化により損傷を有するコンクリート材料・構造の破壊とその耐荷性能に関する研究**

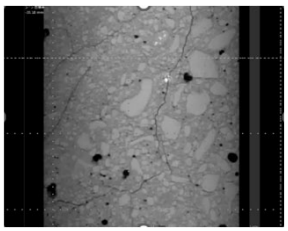
②メゾ及びマクロ観察によるASR 劣化したコンクリートの損傷状態把握に関する研究

防災　維持管理　構造一般

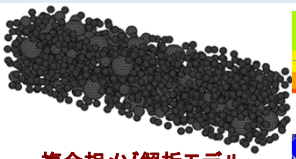
目的：

高解像度観察（X線CT）やメゾスケール解析によるASR劣化に伴うコンクリートのひび割れの定量化，それを考慮したマクロスケールな構造解析の実現

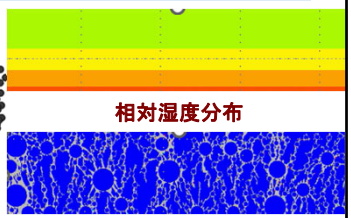
劣化現象と損傷の再現
（ミクロ）
↓
力学挙動・性能の再現
（メゾ）
↓
工学的モデルの構築
（マクロ）
ASR劣化したコンクリートの理解



X線CTによる高精細観察



複合相メゾ解析モデル



相対湿度分布
ひび割れ分布
コンクリートの複合相メゾ解析モデルの構築とFEM解析

成果：

・ASRにより生じるひび割れの再現及び定量評価

⇒マクロスケールな構造解析へと繋げる

28

インフラ維持管理に資する研究　その３

➢ **地方インフラの維持管理に関する研究**

防災 維持管理 構造一般

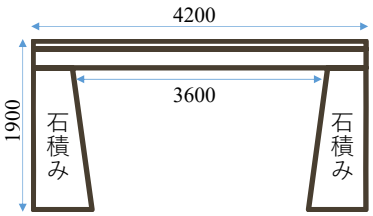
目的:

地方自治体が多く有している道路橋示方書に則していない小規模特殊橋梁の合理的な維持管理について検討する

熊本県玉名市における橋種調査結果

橋種	橋数	割合(%)
RC橋	528	63.3
PC橋	99	11.9
鋼橋	24	2.9
石橋	7	0.8
歩道橋	5	0.6
特殊橋	171	20.5
合計	**834**	**100**





地方自治体の実情

⇒こういう特殊橋が多いが，点検の仕方すらわからない。。

⇒そもそも，この橋は大丈夫かどうかもわからない。。

29

インフラ維持管理に資する研究　その３

➢ **地方インフラの維持管理に関する研究**

防災 維持管理 構造一般

目的:

地方自治体が多く有している道路橋示方書に則していない小規模特殊橋梁の合理的な維持管理について検討する

✓自治体職員による橋梁点検･補修DIY
✓新技術の展開，および検証
✓実橋の残存耐荷性能の解明
✓実橋を用いたモニタリング

自治体職員とともに協議して，支援





30

インフラ維持管理に資する研究　その３

- **地方インフラの維持管理に関する研究**



目的:

地方自治体が多く有している道路橋示方書に則していない小規模特殊橋梁の合理的な維持管理について検討する

・小規模特殊橋梁の残存耐荷性能把握のために実橋で載荷試験

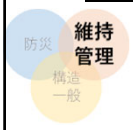




31

インフラ維持管理に資する研究　その３

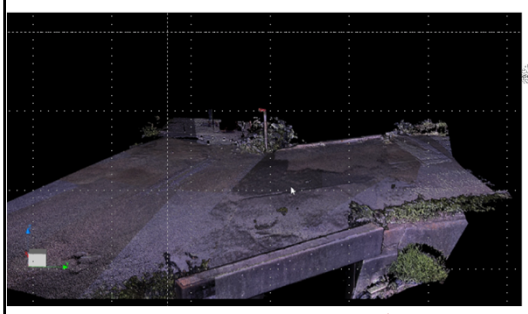
- **地方インフラの維持管理に関する研究**



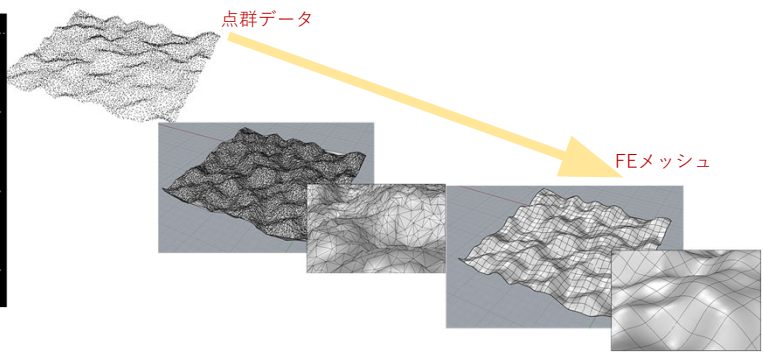
目的:

地方自治体が多く有している道路橋示方書に則していない小規模特殊橋梁の合理的な維持管理について検討する

・小規模特殊橋梁の残存耐荷性能把握のためのFEM解析



3次元測量により抽出した点群データ



32

本日の内容

1．自己紹介

2．研究内容について
- 1) これまでの主な研究内容
- 2) 防災に資する研究
- 3) インフラ維持管理に資する研究

3．“劣化”および“補強”に関する研究事例
- **1) ASR劣化したコンクリートの動的耐荷性能**
- **2) 鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能**
- **3) いくつかの耐衝撃補強方法**

4．おわりに



33

ASR劣化したコンクリートの動的耐荷特性



34

背景

ASRにより生じる微細なひび割れがコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を明らかにし，外部拘束を受けて顕在化したマクロなひび割れが構造部材・構造物の耐荷性能（または破壊性状）に及ぼす影響を明らかにすることは重要である。

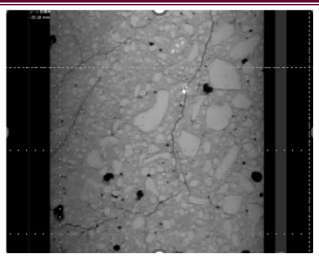
↓

コンクリートの力学的性質に関しては，多くの既往の研究が存在

↓

静的力学特性に主眼

構造物の種類によっては，動的な作用（地震，衝撃）を受ける場合があるため，ASR損傷（ひび割れなど）が動的力学特性に及ぼす影響について明らかにしておく必要がある。



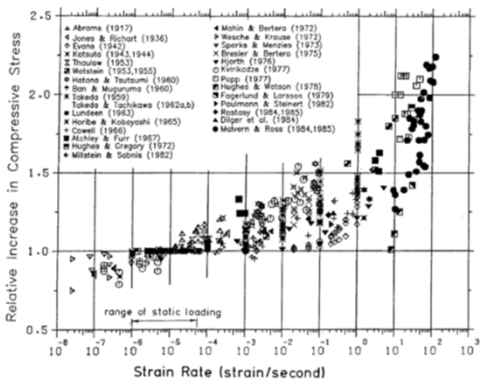
X線CTによる粗骨材周辺のひび割れ（メソ観察）



ASRによる橋台部のひび割れ（マクロ観察）

背景・目的

※一軸圧縮試験，SHPB試験などを利用



圧縮強度のひずみ速度効果

Bischoff, P. H. and Perry, S., (1991). “Compressive behaviour of concrete at high strain rates.” Materials and Structures, 24(6), 425-450.

⇒ 動的強度とひずみ速度の関係がいくつか定式化されており，数値解析の際の動的構成則に利用

ASRによる内部損傷（ひび割れ）を有している場合，この動的力学特性はどのように変化するのか？

⇒これを明らかにすることが目的

促進劣化させた円柱供試体を用いて静的および急速載荷実験を実施

（因子：ASR損傷度合，載荷速度）

⇒ASR損傷したコンクリートの動的力学特性に関する基礎データの収集

実験概要（供試体）

・寸法: Φ100×200mmの円柱供試体

・配合

試験体名 Na_2O_{eq} (kg/m^3)	W/C (%)	単位量（kg/m^3）					混和剤		添加NaCl（g/m^3）	スランプ（cm）	空気量（%）	練上がり温度（℃）
		水	セメント	細骨材	粗骨材		AE減水剤（g/m^3）	AE剤（g/m^3）				
					反応性	石灰石						
1.5（N）	60	180	300	811	285	707	750	9	0.0	8.5	4.0	22.0
4.0（R4.0）									4656.3	11.0	4.0	22.0
5.5（R5.5）									7484.1	12.0	5.5	22.0

※試験体名のNはNon-reactiveを，RはReactiveを示す。

Gmax＝10mmで粗骨材に反応性:非反応性＝3:7となるような混合粗骨材を使用。
非反応性骨材としては石灰石砕石。細骨材も非反応性のものとして，石灰石砕砂。

・試験体名

N:セメント由来のアルカリのみでNaCl試薬を添加しないNa_2O_{eq}量が1.5kg/m^3
R4.0:Na_2O_{eq}量が4.0kg/m^3（NaCl試薬を添加）
R5.5:Na_2O_{eq}量が5.5kg m^3（NaCl試薬を添加）

実験概要（載荷方法など）

高速変形負荷装置(防衛大学校所有)

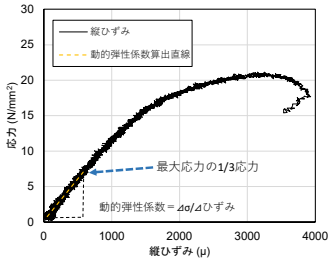
サーボ制御で載荷速度を変化

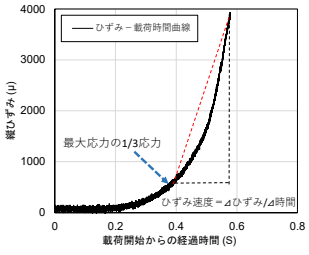
(最大載荷速度(一定)約4m/s, 最大載荷容量1000kN)

計測項目

:荷重(ロードセル)

:縦・横ひずみ(検長60mmポリエステル製ひずみゲージ)





算出項目

:圧縮強度, 弾性係数, (平均)ひずみ速度





高速変形負荷装置外観

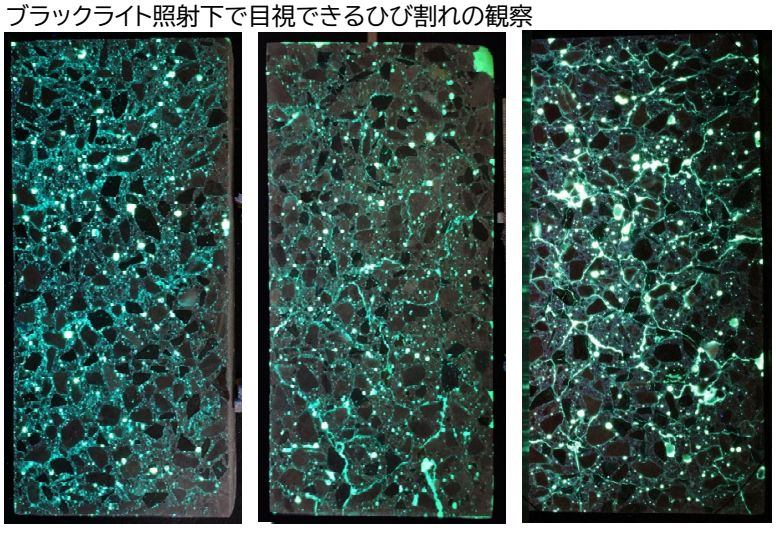
実験結果（ASRによる表面ひび割れの状況）



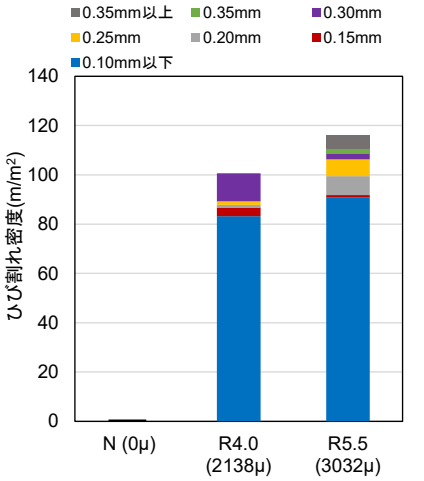
39

実験結果（ASRによる内部ひび割れの状況）

円柱供試体を軸方向に切断し，その切断面に蛍光樹脂を含浸させ，
ブラックライト照射下で目視できるひび割れの観察



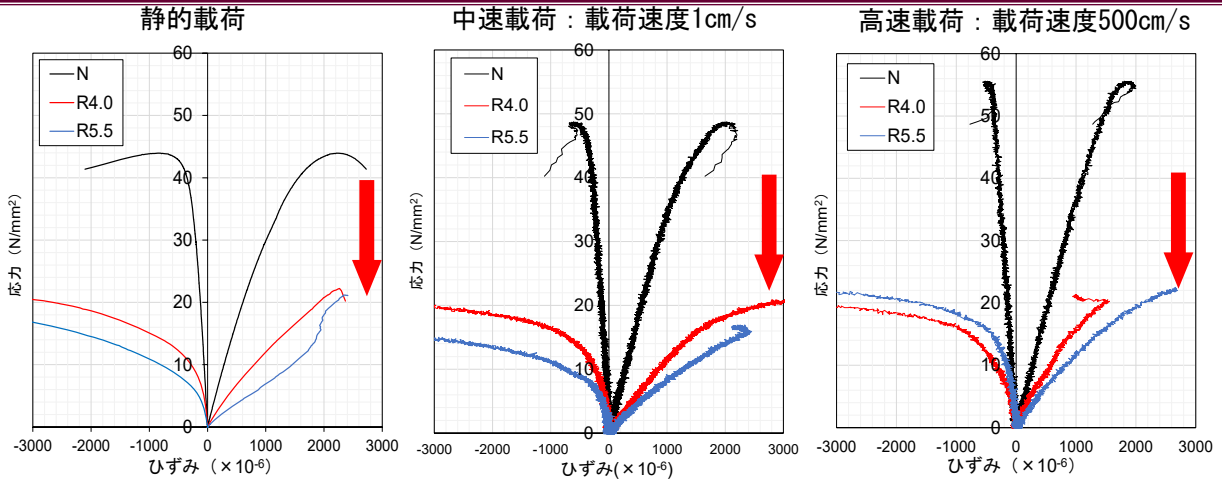
N:0μ　R4.0：2138μ　R5.5：3032μ



ひび割れ密度（単位面積当たりのひび割れ長さ）

40

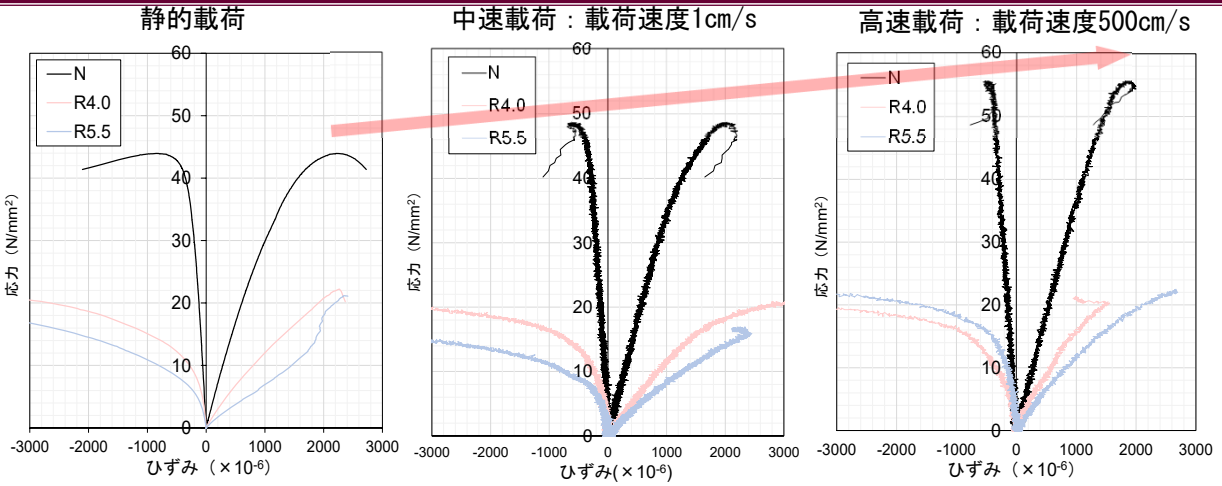
実験結果（静的・急速載荷試験：応力-ひずみ）



すべての載荷速度で，ASR損傷が進むほど圧縮強度および弾性係数が小さい

41

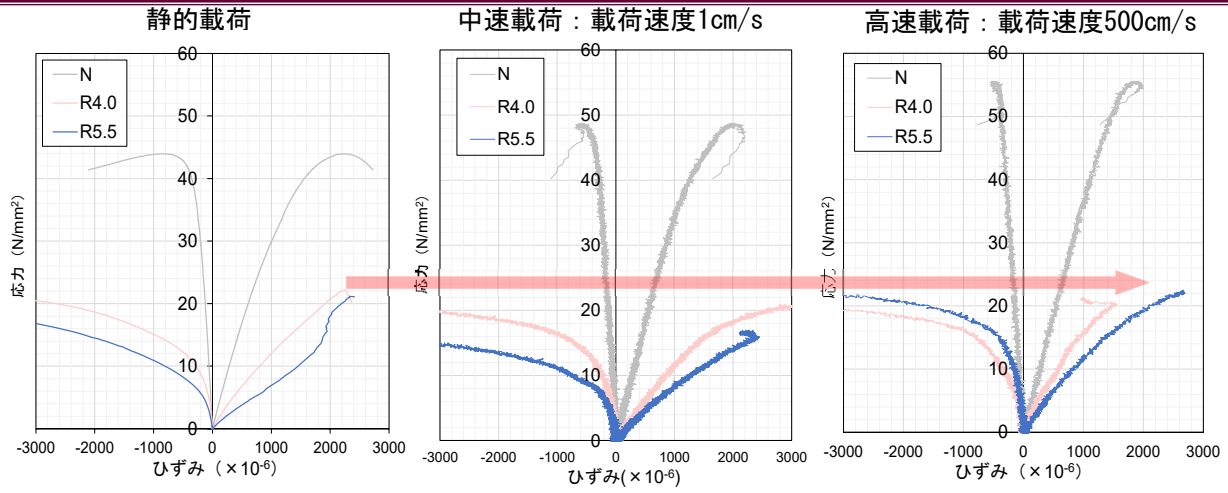
実験結果（静的・急速載荷試験：応力-ひずみ）



載荷速度が大きいほど最大応力が大きく，ひずみ速度効果が明確に表れている

42

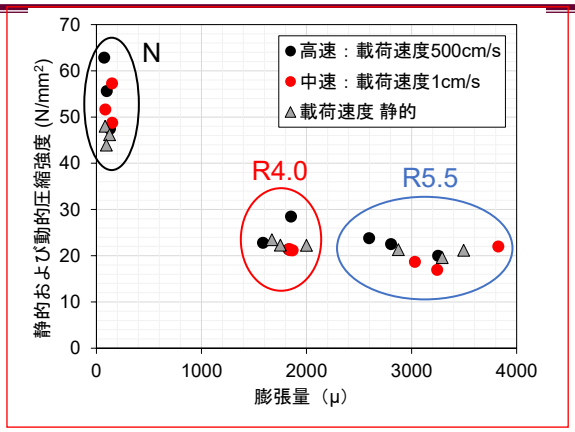
実験結果（静的・急速載荷試験：応力-ひずみ）

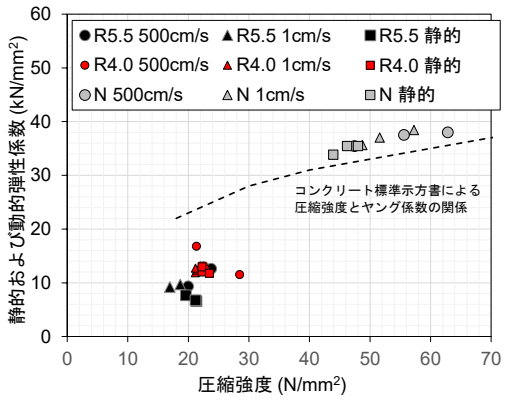


R5.5の高速載荷で若干最大応力が大きくなっているが，Nに比べると顕著ではない

43

実験結果（静的・急速載荷試験：動的圧縮強度・弾性係数）



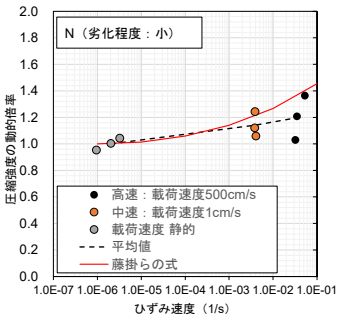


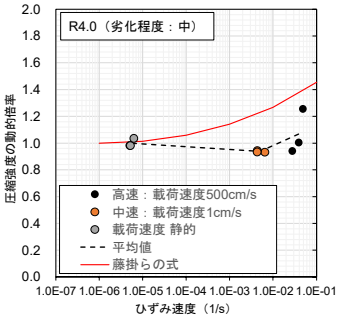
N：載荷速度の上昇による圧縮強度の増加が明確
R5.5：高速載荷でひずみ速度効果はみられるものの，その影響は限定的
中速載荷は静的載荷時と比べ強度はほぼ同じ

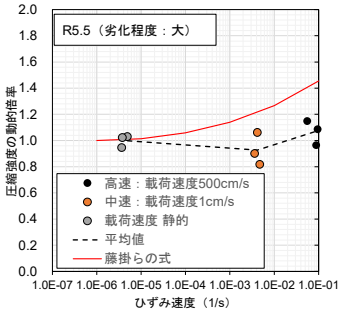
ASR損傷が進展した場合，載荷速度の違いによるひずみ速度効果は鈍化する傾向

44

実験結果（圧縮強度の動的倍率）







N：ひずみ速度の増加とともに圧縮強度動的倍率が増加，ひずみ速度効果が認められる ⇒藤掛らの式と整合（藤掛 et. 2001）

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{f'_{cd}}{f'_c} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}}\right)^{0.006\left[Log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}}\right)\right]^{1.05}}$$

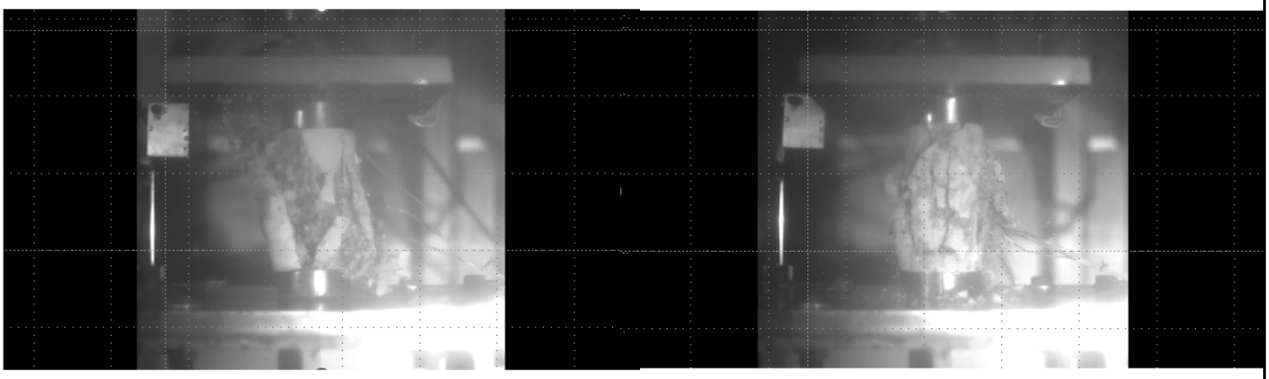
R4.0：ひずみ速度が増加しても圧縮強度の動的倍率にほとんど変化はない

R5.5：高速では若干の圧縮強度動的倍率の増加

⇒ASR損傷が生じた場合，圧縮強度の動的倍率はほぼ変わらない

45

破壊過程の分析



N（健全な供試体） R4.0（ASR劣化した供試体）

1cm/s, 10000fps

⇒ASR損傷が生じた場合，破壊過程（破壊の経時変化）が大きく異なる。

46

結論

促進膨張により，ASR劣化を再現したコンクリートに静的・急速載荷試験を実施し，ASR劣化が動的力学特性に及ぼす影響について検討。その結果，以下のことがわかった。

1. ASR劣化を生じたコンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度効果は健全時のコンクリートと比べると限定的。よって，ASR膨張による内部ひび割れなどの損傷が進展した場合，ひずみ速度効果は鈍化する傾向にある。
2. それは，内部ひび割れなどの損傷が破壊過程（破壊の経時変化）の違いを生み出したことが関係している。

【この成果は実務にどう役立つか？】

・設計を考える上で，健全なコンクリートの動的強度増加率（DIF：Dynamic Increase Factor）をASR劣化コンクリートに適用すると，動的強度を過大評価する可能性がある。

・通常の供用状態における健全性評価と，衝撃的な外力に対する安全性評価を区別する必要性。

47

鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能

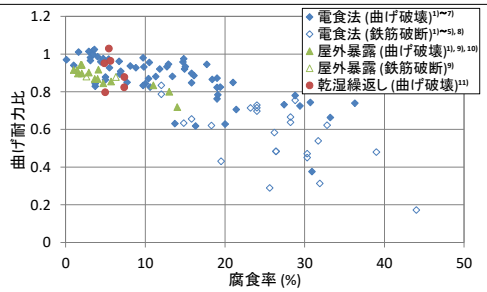
48

背景

塩害等により劣化した既設構造物を適切に維持管理していく上では，現状の劣化・損傷状態を把握し，想定される荷重に対する残存耐荷性能を明らかにすることが重要である。

↓

道路橋の主桁を想定し，RC梁に対して，劣化程度と耐荷性能の関係を明らかにするための様々な研究が実施されてきた。



主鉄筋の腐食率とRC梁の曲げ耐力比の関係（様々な条件下の実験）

⇒既に多くの研究成果が公表されている　⇒静的荷重を対象としている

⇒衝撃荷重が作用した際の耐荷性能については知見がほとんどない

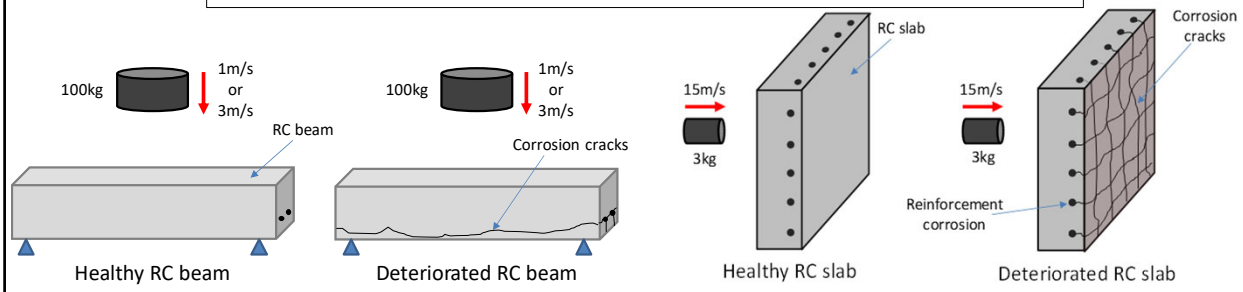
49

目的

鉄筋腐食したRC梁・版に対して，衝撃荷重載荷実験を実施し，耐衝撃性能や破壊性状について明らかにする。

↓

RC梁に対して，落錘衝撃試験（低速衝突，単発及び繰り返し）
RC版に対して，水平衝撃試験（中速衝突，繰り返し）

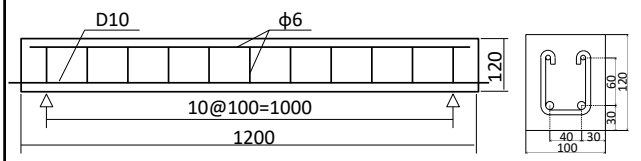


Low-velocity heavy weight impact experiment for RC beam （RC梁への低速度衝突実験）

Mid-velocity light weight impact experiment for RC slab （RC版への中速度衝突実験）

50

RC梁の落錘衝撃試験　～試験体～



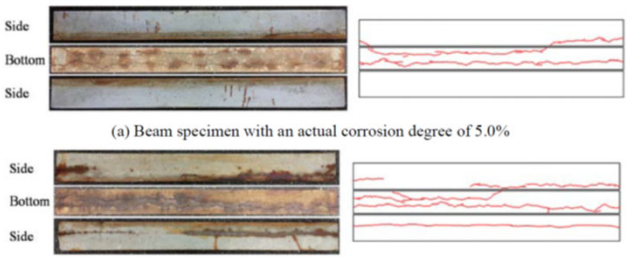
Reinforcement arrangement of RC beam (unit: mm)

静的には曲げ破壊するように設計



Schematic view of electrolytic corrosion method

促進劣化法には電食
目標腐食率は5%，15%



(a) Beam specimen with an actual corrosion degree of 5.0%

(b) Beam specimen with an actual corrosion degree of 12.8%

An example of deterioration state of the beam specimen
(Left: photo of surface properties, Right: crack distribution map)



除錆後の鉄筋の状況(スパン中央部)

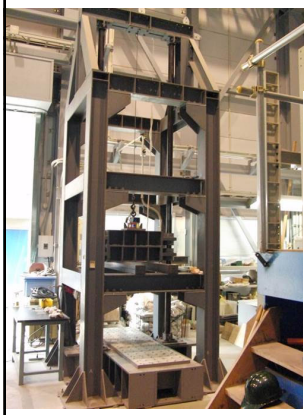


除錆後の鉄筋の状況(スパン中央部)

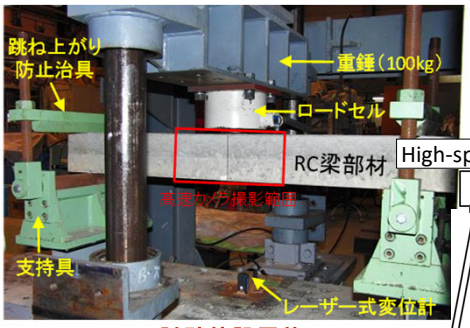
目標腐食率5%：錆汁，底面に軸方向ひび割れ
目標腐食率15%：錆汁，底面・側面に軸方向ひび割れ

51

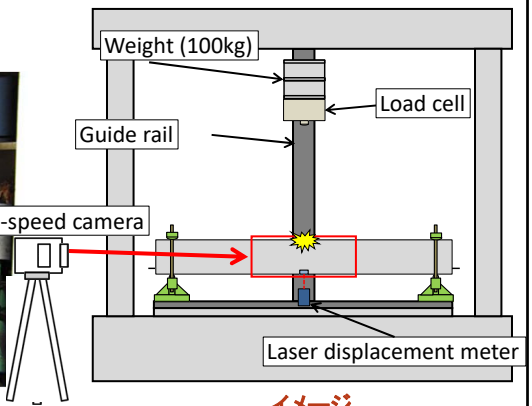
RC梁の落錘衝撃試験　～試験方法～



落錘試験装置



試験体設置状況



イメージ

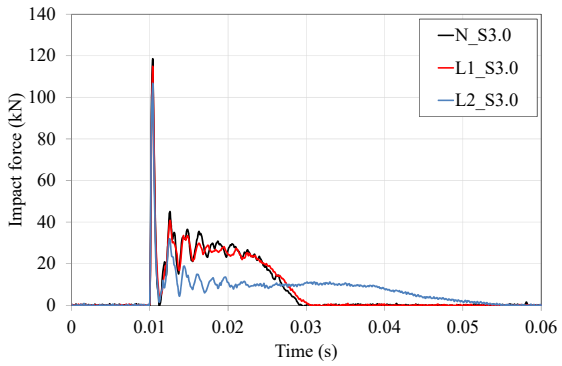
100kgの鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて，試験体に衝突載荷
単発衝突の際は，衝突速度3m/sを設定
繰り返し衝突の際は，衝突速度1m/sを設定

52

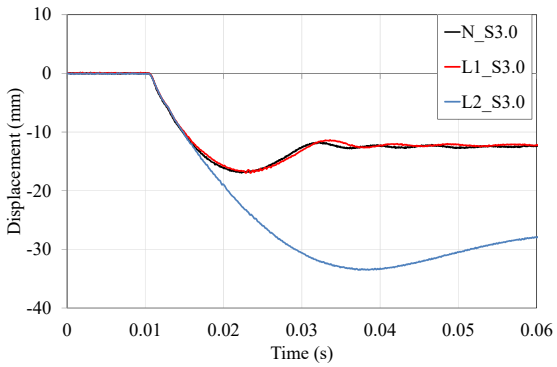
RC梁の落錘衝撃試験　～単発衝突の結果～

In the case of single impact (100kg, 3m/s)

N_S3.0: No corrosion, L1_S3.0: Corrosion degree 5.0%, L2_S3.0: Corrosion degree 15.1%



衝撃力波形



梁スパン中央の鉛直変位応答

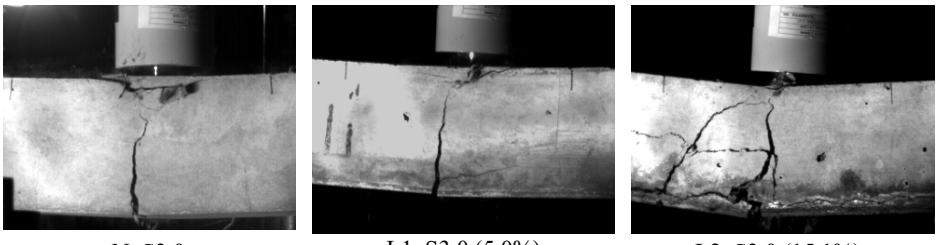
⇒腐食率5%の試験体は健全の試験体と大差はない。
⇒腐食率15.1%の試験体は，直観通り，鉛直変位が大きくなった。

53

RC梁の落錘衝撃試験　～単発衝突の結果～

In the case of single impact (100kg, 3m/s)

N_S3.0: No corrosion, L1_S3.0: Corrosion degree 5.0%, L2_S3.0: Corrosion degree 15.1%



N_S3.0　L1_S3.0 (5.0%)　L2_S3.0 (15.1%)

破壊状況（最大変位発生時）

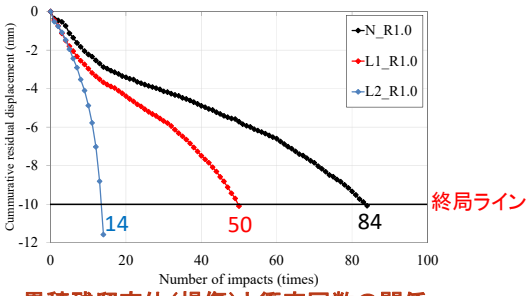
⇒腐食率5%の試験体は健全の試験体と同様，曲げひび割れが発生。
⇒腐食率15.1%の試験体は，腐食ひび割れと曲げひび割れが合流することで，
複雑なひび割れを呈する。かぶり剥落危険性が高まる。

54

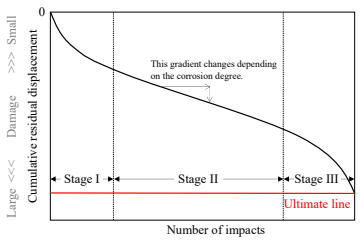
RC梁の落錘衝撃試験　～繰り返し衝突の結果～

In the case of repetitive impact (100kg, 1m/s)

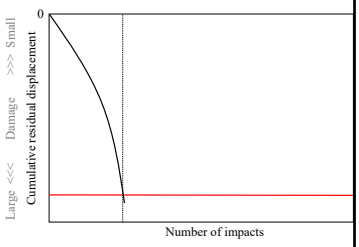
N_R1.0: No corrosion, L1_R1.0: Corrosion degree 5.3%, L2_R1.0: Corrosion degree 12.8%



累積残留変位（損傷）と衝突回数の関係



For sound or low corrosion degree (η<η')

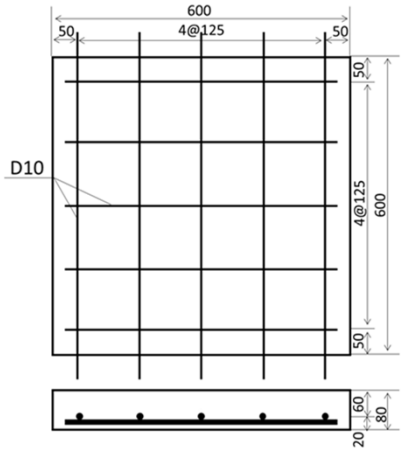


For high corrosion degree (>η')

⇒健全な試験体では，終局までS字曲線
⇒腐食率12．8%の試験体では，S字曲線は示さず，初回の衝撃後，終局破壊に向けて加速的に進展する傾向
腐食の有無で破壊までの推移が大きく異なることが判明

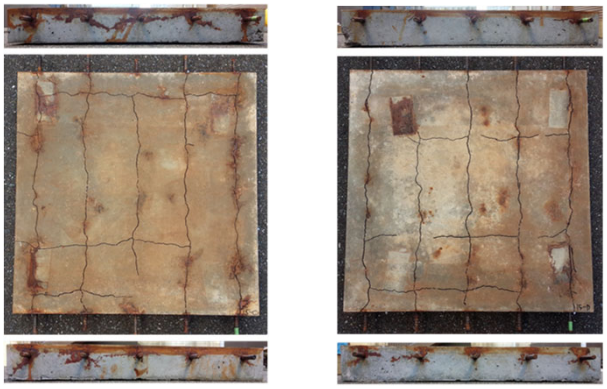
55

RC版の水平衝撃試験　～試験体～



Reinforcement arrangement of RC slab (unit: mm)

促進劣化法には電食
目標腐食率は5%



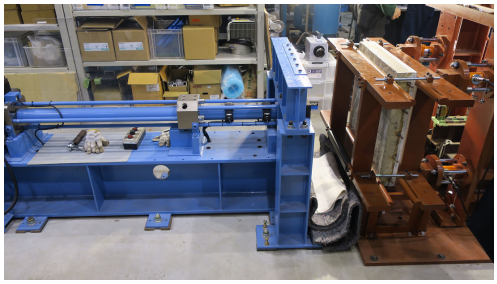
4.9%　　4.1%

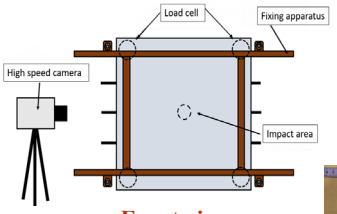
An example of deterioration state of the slab specimen

目標腐食率5%：錆汁，底面に鉄筋に沿った格子状ひび割れ

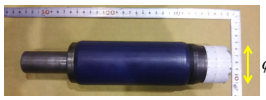
56

RC版の水平衝撃試験　～試験方法～

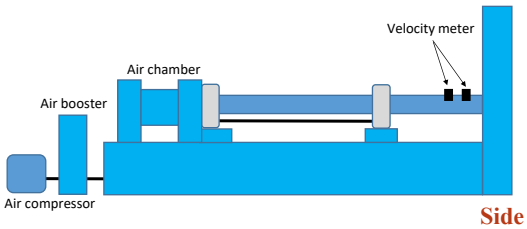


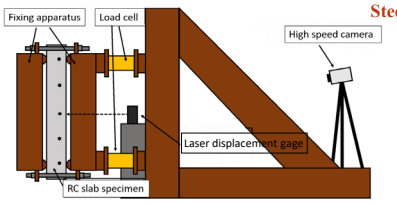


Front view



Steel impactor (3kg, flat nose)　Unit : mm





Side view

空気圧で飛翔体を発射するランチャー方式（設定衝突速度　15m/s）
破壊（裏面剥離）まで繰り返し衝突

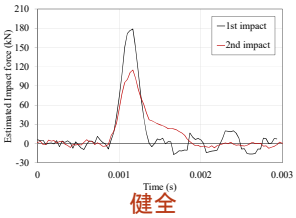
57

RC版の水平衝撃試験　～結果～

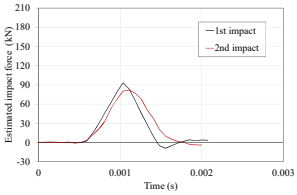
In the case of repetitive impact (3kg, 15m/s)

N_R15.0: No corrosion, L1_R15.0: Corrosion degree 4.9% or 4.1%

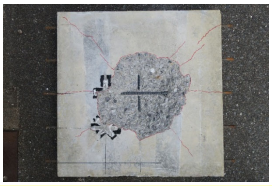
Case name	Number of impacts to failure (times)	Estimated maximum impact force (kN)		Penetration depth (mm)		Fracture pattern
		1st impact	Final impact	1st impact	Final impact	
N_R15.0_1	2	178.83	101.57	1	2	Scabbing
N_R15.0_2	2	183.47	157.92	0	1	Scabbing
L1_R15.0_1	4	93.15	82.02	0	7	Scabbing
L1_R15.0_2	4	83.84	75.35	0	10	Scabbing



健全



腐食有り
2回目までの衝撃力波形

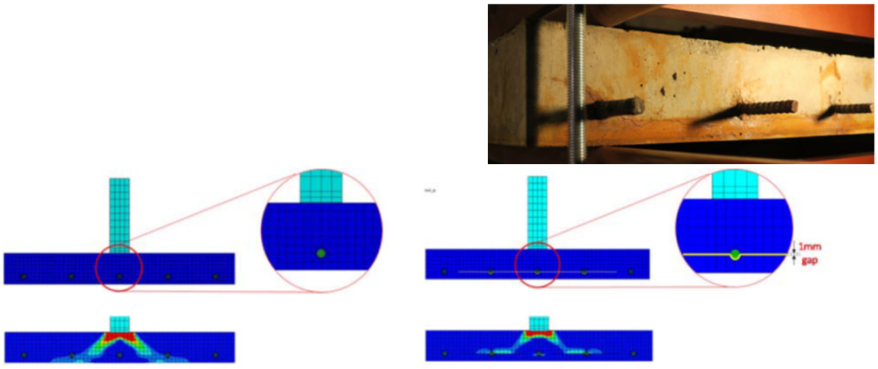




健全試験体では2回目，腐食試験体では4回目で裏面剥離が生じた。腐食した方が“弱くなる（早く破壊する）”という直感に反している？ Conterintuitive phenomenon（非直感的現象）

58

RC版の水平衝撃試験　～結果・分析～



Perfect bond　　Incomplete bond

Effect of bond condition between reinforcement and concrete on pressure distribution

(Upper: Analysis model, Lower: Pressure distribution of impact part cross section about 0.09ms after impact)

腐食試験体には，鉄筋界面の付着破壊や鉄筋に沿ったひび割れが存在。そのひび割れが衝突時の応力（波）のパスを分散させることで，裏面に伝わる応力（波）を低減した可能性

59

結論

鉄筋腐食したRC梁とRC版の衝撃試験を通して，以下のことがわかった。

1. 曲げ破壊型のRC梁に関しては，低速衝突の場合，腐食率に応じて，耐衝撃性能は低下する。腐食率が大きくなると，腐食ひび割れと載荷による曲げひび割れが合流した複雑なひび割れが生じ，破壊が脆性的になる場合がある。
2. 鉄筋腐食したRC版は，鉄筋とコンクリート界面の付着破壊や鉄筋に沿った腐食ひび割れを有しており，それらが，衝突時の応力（波）の伝播パスを分散させることで，裏面へ伝わる応力（波）を低減し，裏面剥離を抑制する場合がある。

【この成果は実務にどう役立つか？】

・道路橋などの一般的な静的荷重が支配的な構造物とは異なり、落石防護施設や防護壁などの衝撃作用を受ける構造物の維持管理・性能照査を区別する必要性。

・合理的な補修・補強をする場合，単に補剛効果や耐久性向上を考えるだけではなく，作用時の応力（波）伝播による影響を適切に理解して，工法選定する必要がある。

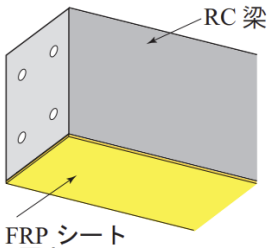
60

いくつかの耐衝撃補強方法

61

FRP（AFRP／CFRP）シート接着工法

主に，落石防護など，低速度衝突を対象に研究されている。c



メリット
- 比較的軽量で，既設RC梁への施工が容易。
- 曲げひび割れの進展や最大変位を抑制。
- CFRPは高剛性、AFRPは比較的大きな変形追従性を期待。
- 補強量や積層数による性能調整が可能。

デメリット
- 衝撃時にFRPシートとコンクリートの界面剥離の可能性。
- FRPの破断によって急激に補強効果を失う可能性がある。
- 高エネルギー衝撃に対しては補強効果が限定的。
- 接着面の下地処理や施工品質に性能が左右される。

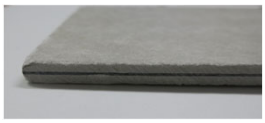


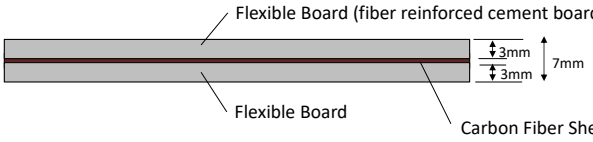
例えば，
瓦井 智貴, 小室 雅人, 岸 徳光, 三上 浩, Sinh Le Huy, 衝撃荷重載荷時における AFRP シート接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式に関する実験的検討, 構造工学論文集 A, 2019, 65A 巻, p. 901-911

62

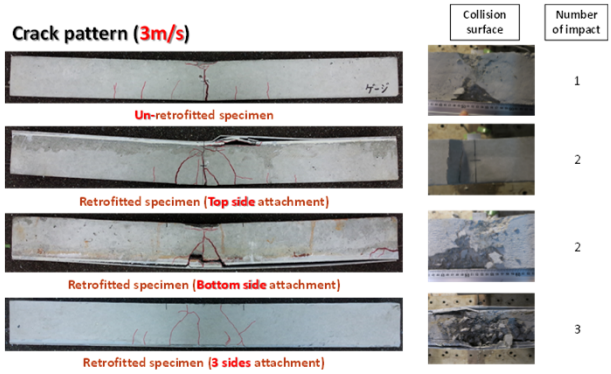
CFCパネル（連続繊維複合材料からなるパネル）工法

低速度衝突による全体応答，高速衝突による局部応答にも適用の研究あり





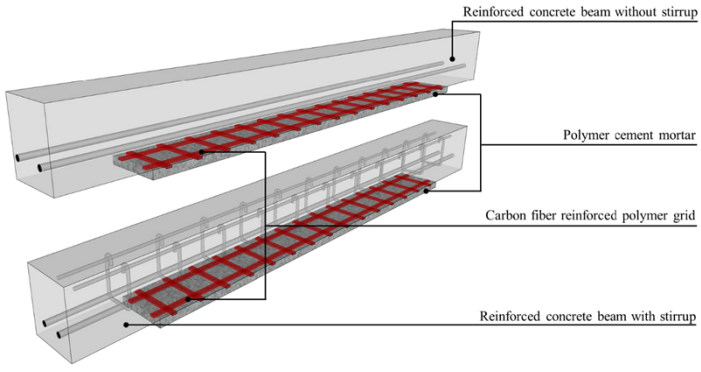
メリット
・パネルによって補強材の形状・厚さを比較的自由に設定できる。また，シートより施工性が良い。
・繰返し衝撃に対する性能改善が期待できる。
・FRPシートとは異なる補強構造を構築できる。
・補強材の剛性や配置を設計変数にできる。
デメリット
・パネルとRC梁の接合部の挙動が重要となる。
・パネル自体の損傷、接着部の剥離、端部の応力集中が課題。
・補強による剛性増加が衝撃応答に及ぼす影響を評価する必要がある。

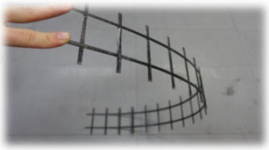


63

CFグリッド＋ポリマーセメントモルタル工法

主に，低速度衝突による全体応答への適用の研究あり





低剛性



高剛性

メリット
- 曲げひび割れの進展や最大変位を抑制。
- 筋断面積による性能調整が可能。
- 筋断面積が大きい場合，せん断破壊への補強にも適用可

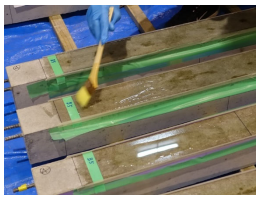
デメリット
- グリッドの破断によって急激に補強効果を失う可能性がある。
- 高エネルギー衝撃に対しては補強効果が限定的。
- PCM接着面の下地処理や施工品質に性能が左右される。

64

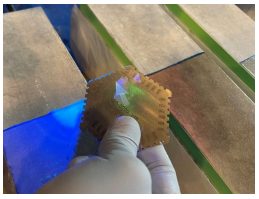
ポリウレア樹脂被覆工法

低速度衝突への適用もあるが，主に，高速衝突による局部破壊後の破壊片の飛散防止に適用した研究あり



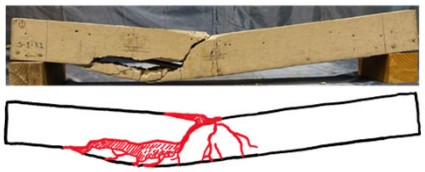


Application of resin with a brush



Thickness Control (0.5 mm)

メリット
・高い伸び性能によって衝撃変形に追従できる。
・コンクリート片（破壊片）の剥落・飛散を抑制できる。
・比較的薄い被覆で施工でき、既設部材への適用性が高い。
・繰返し衝撃に対するエネルギー吸収性能の向上が期待できる。
デメリット
・部材自体の曲げ耐力やせん断耐力を大幅に増加させる工法ではない。
・初回衝撃に対する補強効果が必ずしも大きくない。
・被覆厚さや被覆位置によって効果が変化する。
・樹脂の経年劣化、温度依存性、火災時の性能などを考慮する必要がある。



S-1-RI

本日の内容

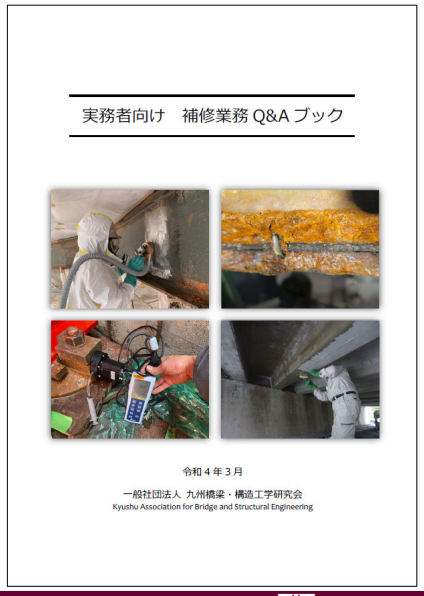
1．自己紹介

2．研究内容について
1) これまでの主な研究内容
2) 防災に資する研究
3) インフラ維持管理に資する研究

3．“劣化”および“補強”に関する研究事例
1) ASR劣化したコンクリートの動的耐荷性能
2) 鉄筋腐食したRC梁・版部材の耐衝撃性能
3) いくつかの耐衝撃補強方法

4．おわりに

KABSE（一般社団法人 九州橋梁・構造工学研究会）



全117件のQ&A

1. 調査編（全 17 件）
2. 積算編（全 17 件）
   - 2.1 調査・補修設計の積算（4 件）
   - 2.2 補修工事の積算（13 件）
3. 設計・施工編（全 83 件）
   - 3.1 共通（3 件）
   - 3.2 鋼部材
     - 3.2.1 部材補修工（10 件）
     - 3.2.2 連結工（6 件）
     - 3.2.3 塗装工（15 件）
   - 3.3 コンクリート部材
     - 3.3.1 ひび割れ補修工（11 件）
     - 3.3.2 断面修復工（8 件）
     - 3.3.3 表面含浸・表面被覆工（9 件）
     - 3.3.4 電気化学的防食工（2 件）
     - 3.3.5 PC グラウト（2 件）
     - 3.3.6 PC 定着部（2 件）
   - 3.4 付属物
     - 3.4.1 橋面防水工（3 件）
     - 3.4.2 伸縮装置取替工（5 件）
     - 3.4.3 支承（7 件）

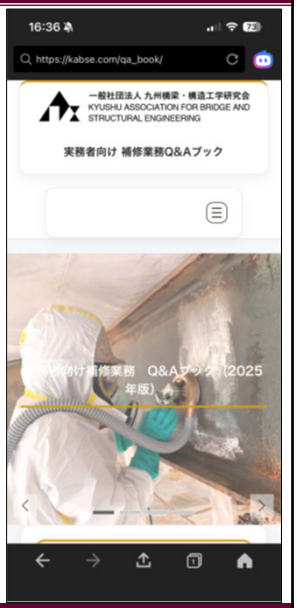
読む側の視点
・一つのQ&Aは見開き2頁に整理する
・参考とすべき資料や文献を記す
・極力，図・表・写真を利用する

67

KABSE（一般社団法人 九州橋梁・構造工学研究会）



KABSE HP：https://kabse.com/



68

KABSE（一般社団法人 九州橋梁・構造工学研究会）

「九州・山口地区における耐候性鋼橋の追跡調査とさび外観評価の検討に関する研究分科会」
講習会
開催案内・参加者募集

耐候性鋼橋の維持管理では，さび外観の評価，異常さびの判定，腐食環境との関係，補修・補強効果の確認など，実務上の判断に迷う場面も少なくありません．「評点 1 と 2 をどのように区分するのか」「層状剥離さびをどのように捉えるのか」「過去の調査記録を現在の点検・診断にどう生かすのか」．本講習会では，こうした課題を考える手掛かりとして，九州・山口地区で実施した約 20 年を隔てた追跡調査の成果を報告します．

一般社団法人 九州橋梁・構造工学研究会（KABSE）では，「九州・山口地区における耐候性鋼橋の調査・研究分科会（2002 年度・2003 年度）」で実施したさび調査を起点として，2022 年度から 2025 年度までの 4 年間に，約 20 年経過後の耐候性鋼橋を対象とした現地追跡調査と分析を行いました．

本講習会では，長期的なさび状態の変化に加え，①さび分類法と異常さびの区分，②追跡調査データベースの構築と腐食特性・環境分析，③外観評点と健全度の比較および補修効果について，分科会で得られた知見を紹介します．耐候性鋼橋の点検・診断・維持管理に携わる皆様にとって，現在直面している課題を整理し，今後の判断を考える一助となれば幸いです．多くの皆様のご参加をお待ちしております．

- 主催　一般社団法人　九州橋梁・構造工学研究会
- 後援　公益社団法人　土木学会西部支部
- 日時　2026 年 12 月 4 日（金）　14:00～17:00
- 会場　九州大学西新プラザ　大会議室 A
  （福岡市早良区西新 2-16-23　https://nishijinplaza.kyushu-u.ac.jp/access.html）
- 方法　ハイブリッド形式（対面・Zoom）
- 定員　対面：70 名　Zoom：100 名

69



70