

2025.7.31

産学協働プログラム「持続可能な社会を支える都市・インフラ学」

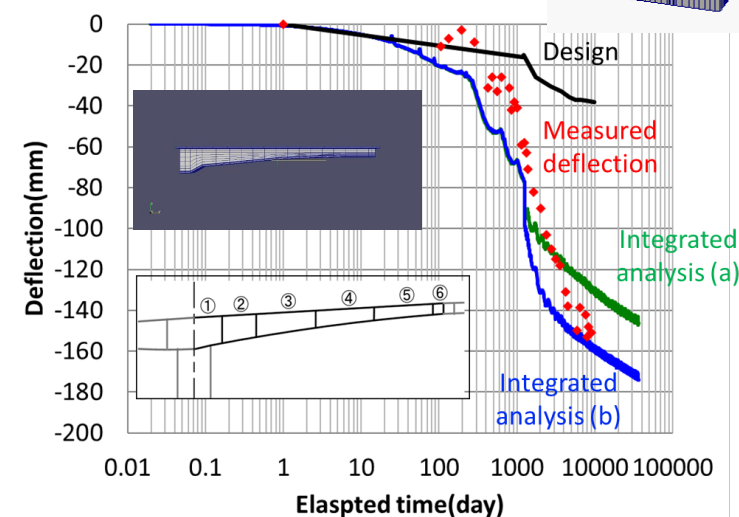
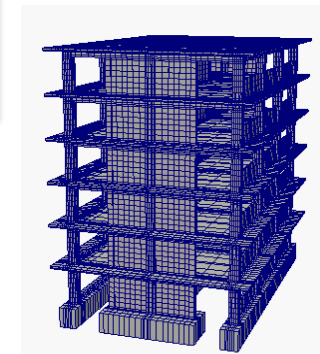
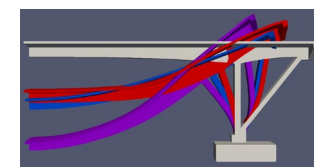
循環経済 × 都市・インフラ

環境・社会理工学院 土木・環境工学系
教授 千々和 伸浩

自己紹介

環境・社会理工学院 土木・環境工学系 千々和伸浩
主たる研究分野：コンクリート工学

- 鋼材が腐食したコンクリート構造物の残存構造性能
- 気象作用がコンクリート構造物の長期性能に与える影響 (たわみ、収縮・クリープ)
- 鉄筋コンクリート構造物および鋼コンクリート複合構造物の疲労耐久性・対衝撃性能に関する検討
- 下水道コンクリートの劣化機構の解明
- リサイクル可能な繊維補強コンクリートの開発
- セメントに代わる新素材の開発
- 電波を透過するコンクリートの開発
- 自治体のインフラマネジメント



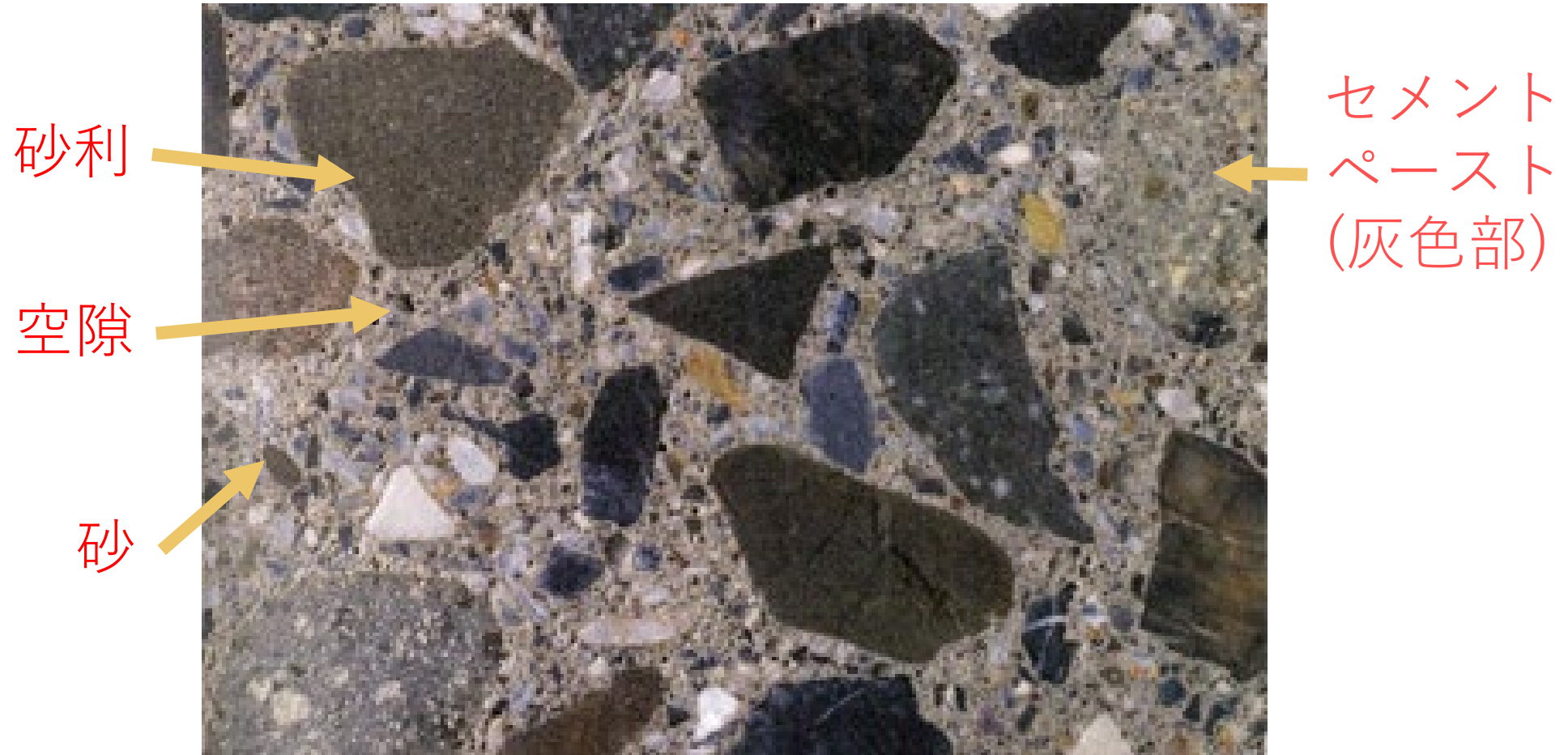
都市インフラから排出される廃棄物

- グローバル経済市場での競争を生き抜くため、現代都市は常に新たなインフラを必要とする。その結果、インフラの解体と更新が繰り返される。
- 現代の都市インフラを構成する主要な材料はコンクリートと鋼材。特に使用されるコンクリートの量は鋼材よりも圧倒的に多い。



コンクリートを構成するもの

コンクリート = 砂と砂利をセメントペースト(糊)で固めた物



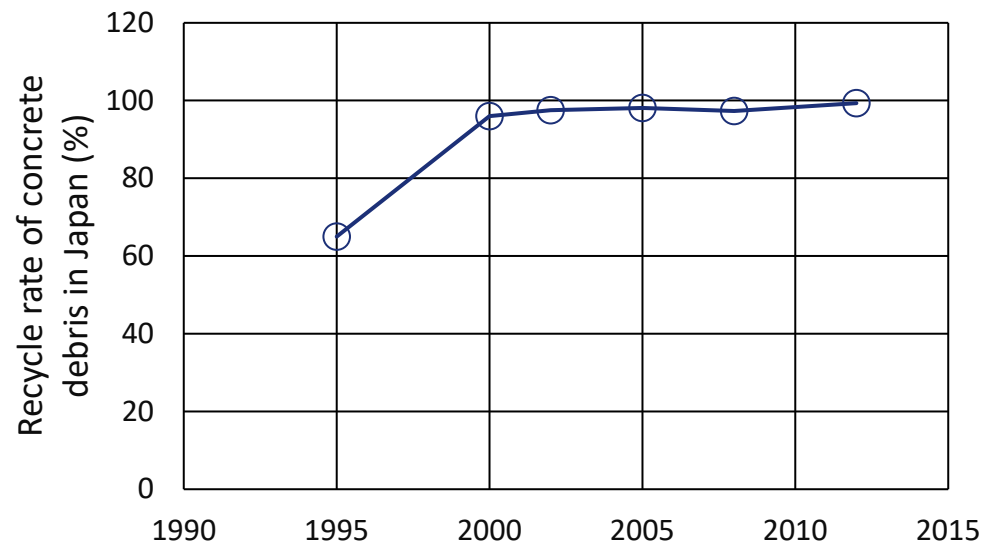
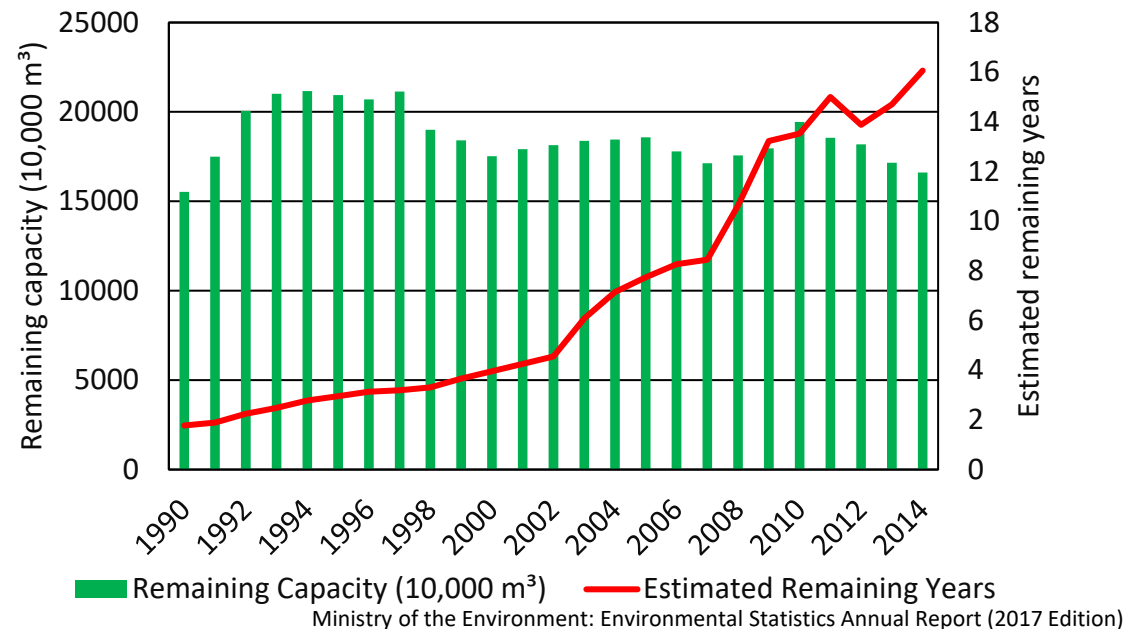
主な建設材料の特性値(目安)

材料	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 [降伏強度] N/mm ²	密度 Kg/cm ³	備考
コンクリート	30	2.5	2.3	7円/kg ≒ 1.5万円/m ³
鋼	275※	430 [275]	7.9	125円/kg ≒ 100万円/m ³
ステンレス	275※	510 [275]	7.9	680円/kg ≒ 550万円/m ³
アルミニウム	260※	215 [260]	2.7	300円/kg ≒ 80万円/m ³
銅		355	8.9	1185円/kg ≒ 1062万円/m ³
木材(杉)	30	100	0.38	300円/kg ≒ 10万円/m ³
ミネラルウォーター			1.0	100円/kg ≒ 10万円/m ³

現在のコンクリート解体材のリサイクル状況

- 1990年代初頭まで、廃棄物処分場は深刻な不足に直面し、不法投棄が増加
- 1992年度から1996年度にかけて、「建設副産物の発生抑制・再利用技術の開発」が実施される。
- 1994年には「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準（案）」が提案され、解体コンクリートをコンクリート用再生骨材、路盤材、埋戻し材として利用するための基準が示された。

→ 現在ではコンクリート解体材の約99%がリサイクルされている。



コンクリートガラから再生された骨材の利用状況

- コンクリート用再生骨材の生産量は、天然骨材（砕石や砂）の生産量のわずか**0.1%**
- 再生骨材全体の中でも約**0.5%**

解体されたコンクリートのほとんどは、路盤材など他の用途の再生資材として再利用

→ リサイクルと叫びつつ、実は「コンクリートからコンクリート」へのオープンループ型のリサイクルどまり

【今後の見通し】
 発生量：首都圏における解体コンクリートの発生量は、2050年までに2015年比で1.5倍に増加。
 利用先：路盤材としての需要は減少傾向。
 →供給が需要を上回る可能性

→路盤材へのリユースに依存するのではなく、より多様なリサイクル用途への転換が必要

年度別生産量 (単位：千トン)					
	(1)コンクリート用砕石・砕砂	(2) 道路用・その他再生骨材	(3) コンクリート用再生骨材	(3)/(1)	(3)/((2)+(3))
2008	110437	18392	378	0.34	2.01
2009	92394	16996	75	0.08	0.44
2010	92186	17858	60	0.07	0.33
2011	93654	18618	75	0.08	0.40
2012	98458	19561	52	0.05	0.27
2013	106065	20213	113	0.11	0.56
2014	102020	20102	93	0.09	0.46
2015	96057	18464	136	0.14	0.73
2016	93809	17964	86	0.09	0.48
2017	95979	17978	120	0.13	0.66

(2019 コンクリートの生産・供給・施工システムの革新 報告書 より)



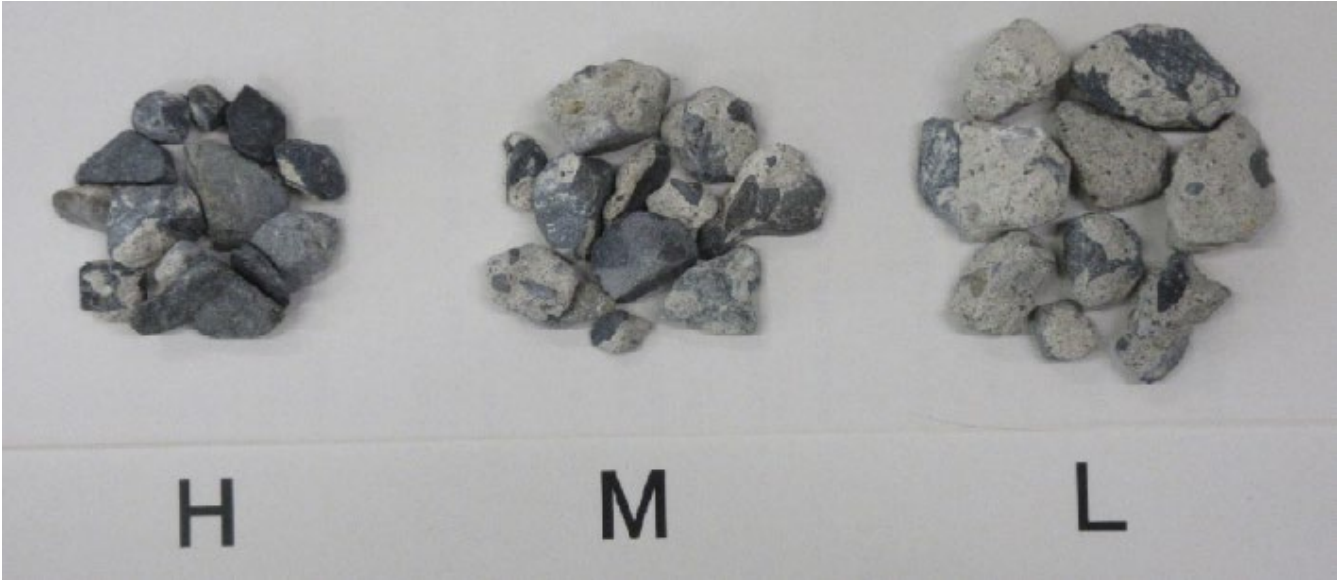
<https://manaka-juki-doboku.co.jp/case/dourohosou/>



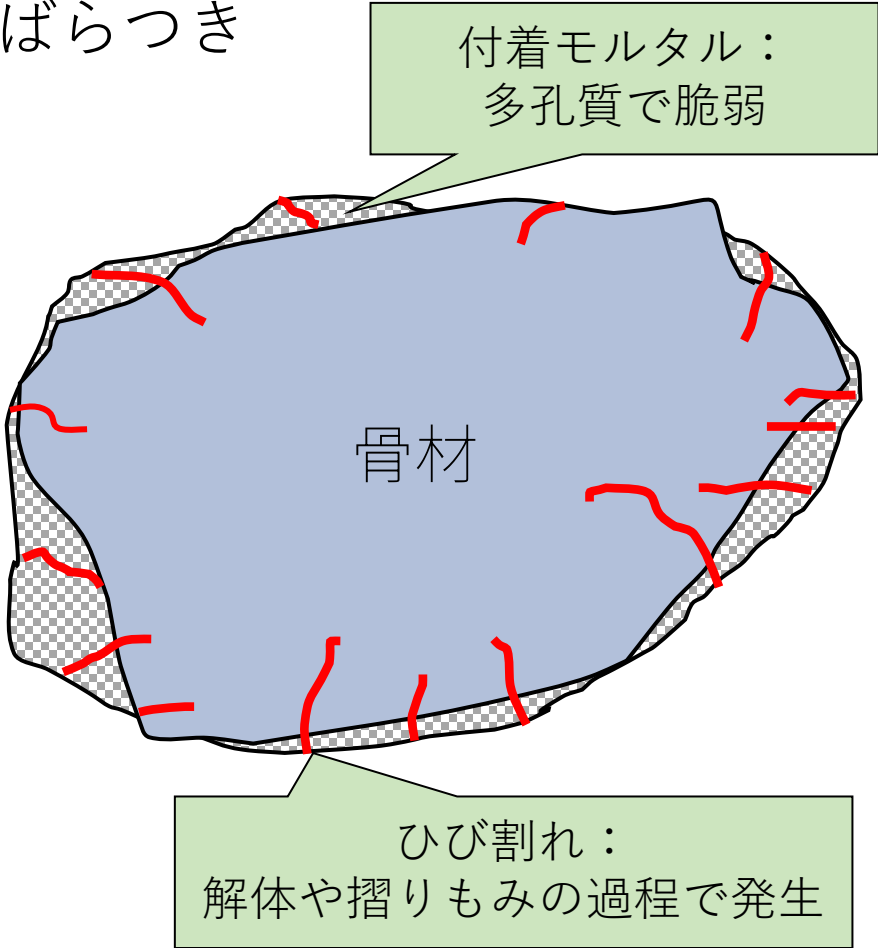
<https://www.civil-engineering.jp/infographic/>

再生骨材コンクリートの課題

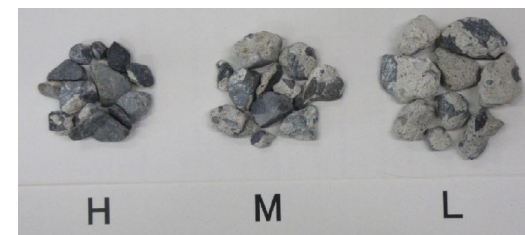
- ①強度が低い（元の骨材の約90～50%程度）
- ②吸水率が高く、乾燥収縮や凍結融解など耐久性の問題が生じやすい
- ③原材料のばらつきによる品質の不安定さ
- ④分別不十分による異物混入地域による供給量のばらつき



<https://www.pwri.go.jp/eng/about/pr/webmag/wm066/seika.html>



日本における再生資材利用の歴史



【1992～1996年】解体コンクリートを再生骨材として利用するための総合研究プロジェクト

【1994年】再生骨材およびそれを用いたコンクリートの品質分類（1種～3種）を含む品質基準案が策定される。ただし高品質な再生骨材の製造はコストが高く、回収率も低く、微粉の過剰生成が課題。

【2016年】JISの制定を経て、新たな品質基準が整備され、用途別に再生骨材の使用が規定される。

コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準における再生骨材コンクリートの標準的な使用範囲
(現場打ちコンクリートの場合)

再生骨材のコンクリートの種類 1種：粗骨材のみ再生材 2種：粗骨材・細骨材ともに再生材		再生骨材Mを用いた コンクリート		再生骨材Lを用いた コンクリート		
		1種	2種	1種	2種	
構造体でない部位		○	○	○	○	
構造体	無筋コンクリート部材	○ 凍結誘拐を受ける場合は 耐凍害品を用いる	-	-	-	
	鉄筋コンクリート部材	乾燥収縮の影響あるいは 塩害の影響を受けにくい部材	△ 凍結誘拐を受ける場合は 耐凍害品を用いるなどの諸制約あり	-	-	-
		乾燥収縮の影響あるいは 塩害の影響を受ける部材	-	-	-	-

(国土交通省通知：コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準より抜粋)

- 東京都はエコマテリアルの活用や持続可能な調達を推進のため、2016年に「資源循環・廃棄物処理計画」を策定。
- もともと東京都では解体廃材発生量が多く、リサイクル施設が多数存在し、政策面での後押しもあることから、再生骨材コンクリートの利用が比較的進んでいる。
- 東京2020オリンピックでは「持続可能性に配慮した計画（サステナビリティ・プラン）」を通じて再生骨材コンクリートの活用が推進され、CO₂排出削減を促す気候変動対策の一環として位置づけられた。

→高品位な再生骨材を製造する際に排出されるCO₂量は、埋立処分の場合の5~6倍にも達するため、環境負荷とのトレードオフが発生。

再生骨材コンクリートの課題(1)

- ①強度が低い（元の骨材の約90～50%程度）
- ②物質移動抵抗性が低く、乾燥収縮も大きい
- ③原材料のばらつきによる品質の不安定さ
- ④分別不十分による異物混入地域による供給量のばらつき

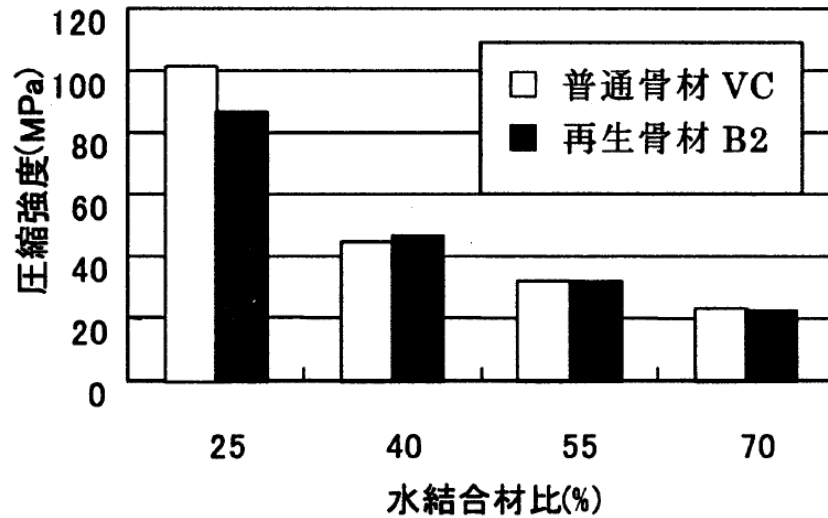
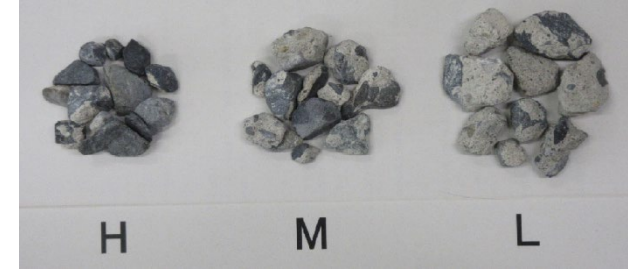


図-15 水結合材比の相違が再生骨材 B2 および普通骨材を用いたコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響
(大即ら, 2001)

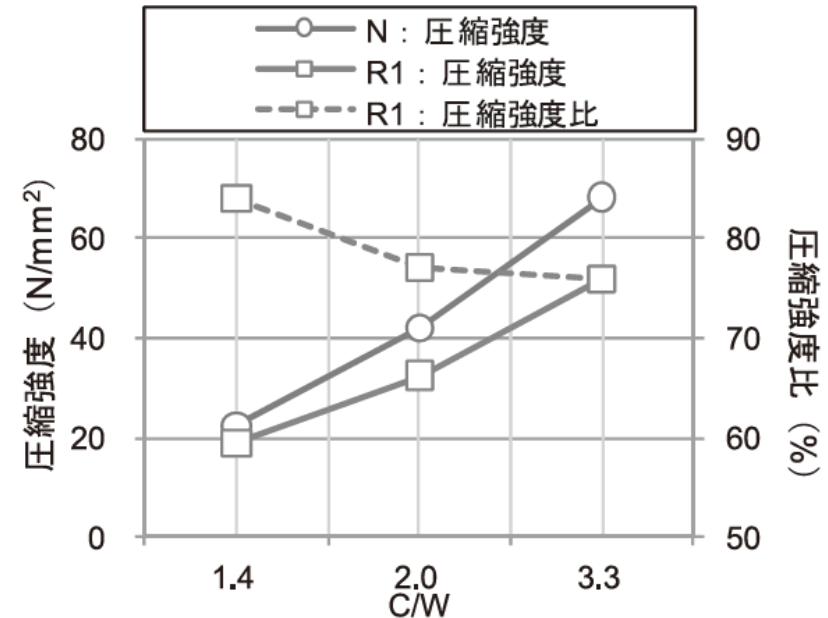


図1 C/W と圧縮強度の関係
(萩原ら, 2011)

※研究報告によって再生骨材の影響程度は様々→解体前の元のコンクリートの品質にも依存するため

再生骨材コンクリートの課題(2)

- ①強度が低い（元の骨材の約90～50%程度）
- ②物質移動抵抗性が低く、乾燥収縮も大きい
- ③原材料のばらつきによる品質の不安定さ
- ④分別不十分による異物混入地域による供給量のばらつき

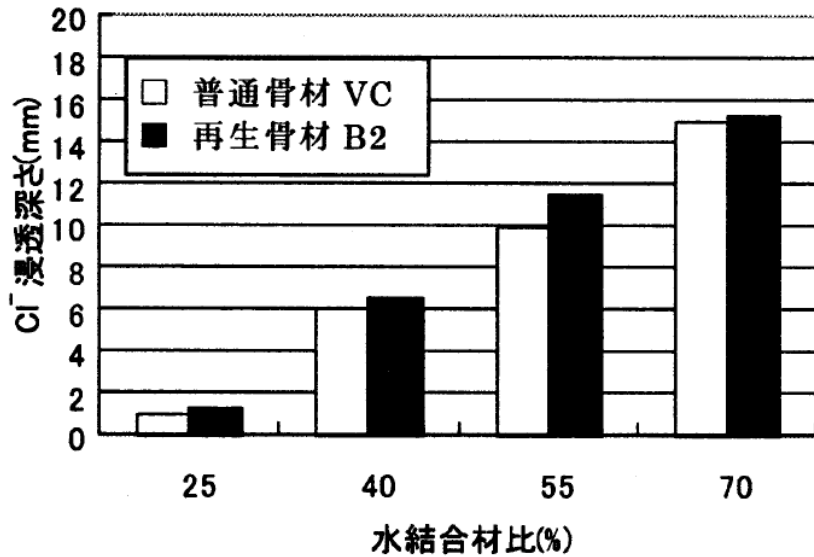
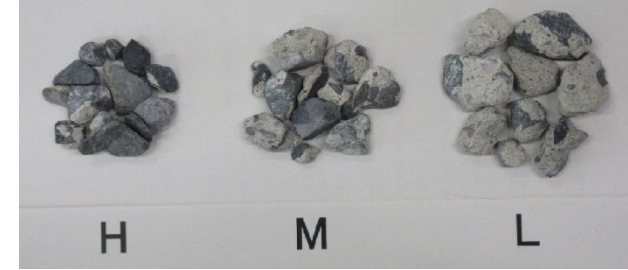


図-11 水結合材比の相違が再生骨材 B2 および普通骨材 VC を用いたコンクリートの Cl⁻浸透深さに及ぼす影響 (大即ら, 2001)

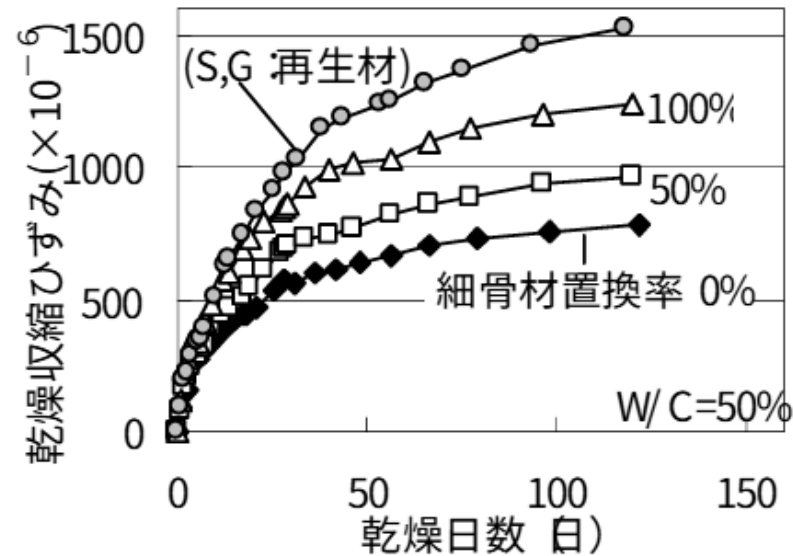


図 4 細骨材置換率の変化による乾燥収縮ひずみの経時変化(G: 碎石)

(松下ら, 2000)

※研究報告によって再生骨材の影響程度は様々→解体前の元のコンクリートの品質にも依存するため

コンクリートのリサイクルを進めるための方向性

1. 品質向上

→物理処理から化学処理や生物を使うアプローチ

2. 使う場所・使い方の見直し

→本当に必要な材料物性を見極め

→材料特性ではなく材料を組み合わせた構造レベルでの問題克服

3. 価値の見直し

→バージン材の見直し

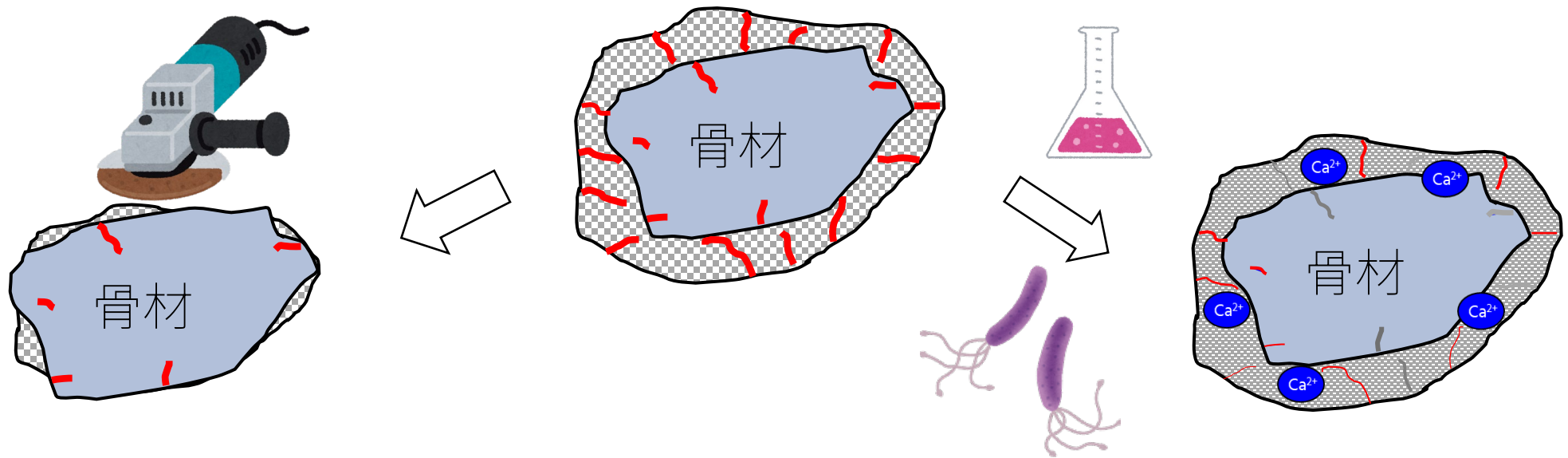
→不要な再生処理の中止

→リサイクル材に対する価値の転換

(1) 品質向上

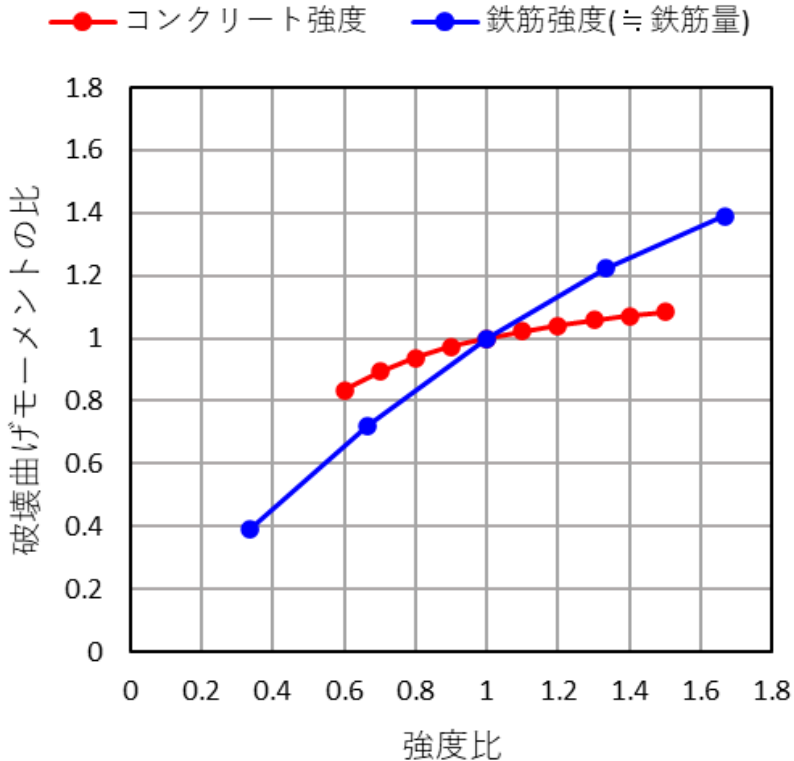
これまでの研究のメインストリーム

- (a) 付着モルタルの効率的除去に関する研究
- (b) 骨材および付着モルタルのひび割れや空隙の充填・改善に関する研究
 → 従来の手法は主に物理的アプローチが中心(加熱摺り揉み法)、近年は化学的手法や生物学的技術の活用が模索されている



(2)使う場所・使い方の見直し

- 再生骨材の「特徴(≠弱点)」
低強度、低剛性、低い物質移動抵抗性



曲げに対する抵抗性について

→コンクリートの材料強度の影響は実は鈍い

=強度が1-2割低下したとしても、構造体の性能にはあまり影響しない。

→RC部材の性能を支配するのは鉄筋の材料強度や量

※RCではそもそも粘り強い性能を実現するため、鉄筋が性能を支配するように設計しているので、実は当たり前の結果でもある。

[試算例] 鉄筋コンクリートはりの曲げ破壊耐力
断面B250mm×H500mm コンクリート強度 30MPa
D25鉄筋(降伏強度345MPa)×3本 を基準としたとき

(2)使う場所・使い方の見直し

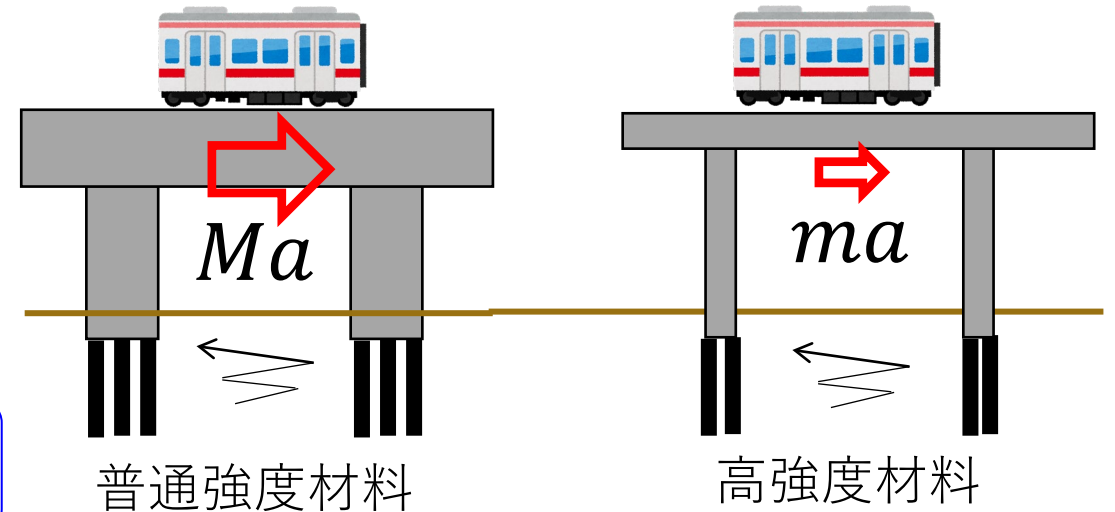
- 再生骨材の「特徴(≠弱点)」
低強度、低剛性、低い物質移動抵抗性

高強度材料を使ったとしても、それで構成される構造部材の性能が高いわけではない。

[高強度材料のメリット]

- 使用する材料を少なく済む
- 同じ機能をより小さな断面で実現可
→軽くなる & 内部空間を広げられる
→下部構造小さく、地震力も低減

日本の柱はほぼ
耐震設計で決まる



高強度材料でしかできない構造はある。

しかし低強度材料を使った場合でも、設計次第で必要十分な性能を与えることは可能。

※鉄道の場合、柱のコンクリートに普段かかっている応力は圧縮強度30MPaに対して、1~2MPa程度でかなり余裕がある。柱を細くして作用圧縮力を高めてもよいが、そうすると鉄筋を増やす必要があってコストが余計上がる。

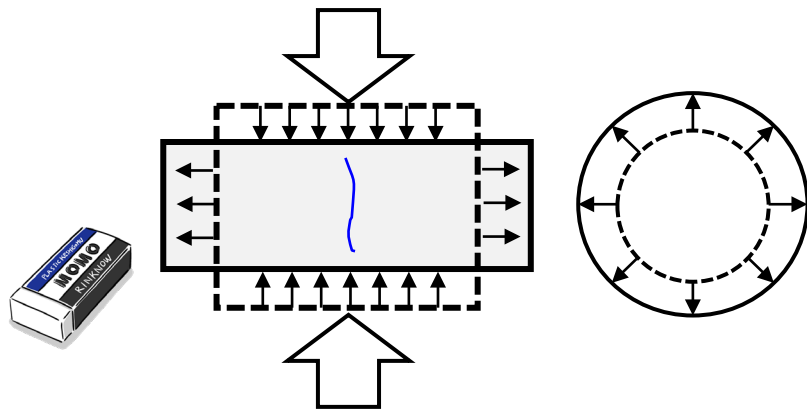
(2)使う場所・使い方の見直し

- 再生骨材の「特徴(≠弱点)」
低強度、低剛性、低い物質移動抵抗性

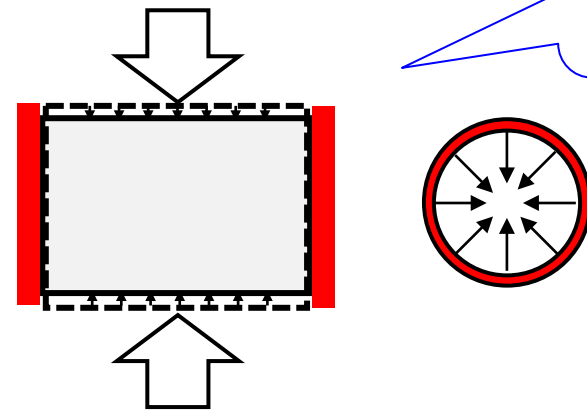
材料を組み合わせることで、材料単体で不足する特性を補完可能

例えば円形CFT柱(コンクリートを充填した鋼管柱)では、外周の鋼管によるコンファインド効果によって見かけのコンクリート強度が向上する。
→材料としての弱点を構造的な効果によって補完することも可能

鋼管でなくとも3Dプリンタ型枠でも可能性あり??



拘束がない場合、上下につぶされると横に伸びる



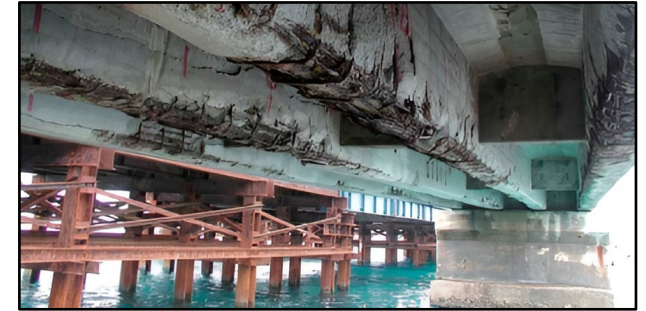
円筒型鋼管で外部拘束を受けると見かけ強度は高まる

(2)使う場所・使い方の見直し

「構造物の限界状態（＝死）」の定義の再考

- 構成部材の破壊や劣化 ≠ 構造物全体の破壊

→実際の構造物の限界設定には余裕がある。傷みをどこまで許容できるかは考え次第。本当の限界を見定める数値シミュレーション手法も開発中。

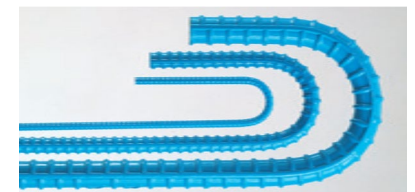


供用中の栈橋

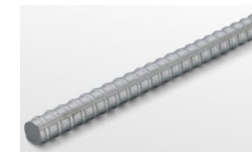
- オフィスや商業施設では、構造物の物理的な劣化ではなく機能の陳腐化が寿命となることが多数。

→構造物の耐久性を高めることは好ましいが、過剰な耐久性を求めているか？実は再生コンクリートで十分？

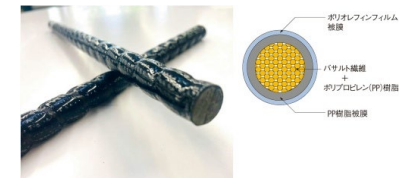
→再生コンクリートだけに頼らず、他の方法を組み合わせて構造物の耐久性を補完する方法もある。



エポキシ塗装鉄筋(www.ps-k.co.jp/)



ステンレス鉄筋
(www.aichi-steel.co.jp)



バサルト筋
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/ncr/18/00221/072300005/>)

(3) 価値の見直し

リサイクル処理費用のため、再生材はバージン材よりも高くなりがち

- バージン材の価格設定を見直す

→鉄筋コンクリート部材の利点の一つはコストの低さ。しかしそれ故に、防錆鉄筋のような耐久性を向上する材料採用によるコスト増を受け入れにくくしている。性能劣化の予測精度や限界の設定にも曖昧さもその一因。

- リサイクル処理を簡素化しコストを下げる

→全ての性能を再生骨材コンクリートだけで満足させるのではなく、構造設計や別材料の組み合わせで不足をカバーできる可能性がある。処理に必要なエネルギーも減らせる。



(3) 価値の見直し

- 「再生コンクリート = 低品質で望ましくない」という先入観から脱却し、「問題ない」あるいは「望ましい、カッコいい」というように意識を変えていく必要がある。
→意識変われば物の価値も変わる。



- (例1) 温泉旅館での浴衣
浴衣はリユース品だが、多くの人が進んで着用する
- (例2) 再生PET繊維
近年では広く受け入れられ、多く使用される状況に。



コンクリートのリサイクルを進めるための方向性

1. 品質向上

→物理処理から化学処理や生物を使うアプローチ

2. 使う場所・使い方の見直し

→本当に必要な材料物性を見極め

→材料特性ではなく材料を組み合わせた構造レベルでの問題克服

3. 価値の見直し

→バージン材の見直し

→不要な再生処理の中止

→リサイクル材に対する価値の転換

取り上げる分野はコンクリートを中心とした循環経済の話題ですが、社会制度やこれからの社会の在り方など様々を横断した議論が必要なテーマです。次世代により良い社会を引き継いでいくためにも、是非議論への参画をお願いします。