

— 趣 旨 —

この梗概集は、公益社団法人全国解体工事業団体連合会が実施する令和5年度の解体工事業に係る研究助成金制度を活用した研究者の当該研究報告書に基づいて作成されたものである

— 目 次 —

No.	研 究 テ ー マ	
	研究代表者	所 属
1	・解体工事における BIM を活用した積算と工事計画の立案	
	松 本 卓 也	三同建設株式会社 工事統括部グループ長
2	共同研究	
	・階上解体工法における床版サポートの実験と解析	
	青 木 孝 義	建築構造技術研究所(名古屋市立大学大学院) 所長
	・階上解体におけるサポートのひずみ計測と解析	
	伯 耆 原 康 男	湘 KEN WORKS 一級建築士事務所
3	・解体工事現場における非火薬破砕剤適用の実証	
	長 野 正 幸	株式会社カコー 企画開発部課長
4	・解体工事から発生する建設廃棄物の排出量に関する全国調査	
	小 山 明 男	明治大学 理工学部建築学科教授
5	・解体工事の環境性評価に関する研究	
	道 正 泰 弘	名城大学 理工学部環境創造工学科教授
6	・環境負荷低減型解体手法開発のための静的破砕剤の高次利用方法の検討	
	高 橋 駿 人	東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻特任助教



三同建設

解体工事における
BIMを活用した積算と工事計画の立案

三同建設株式会社 松本 卓也

SANDOH CORPORATION



2024/8/8

現状把握と問題点

【積算】

- 1、産業廃棄物の発生量が積算と実数に大きな差異がある
 - ・ 構造・用途・改修の有無等により発生量が異なる
 - ・ 床面積に係数をかける積算方法が主流で、係数が各社で異なる
- 2、仮設の積算根拠が不明確
 - ・ 足場の設置範囲の設定がアバウト
 - ・ 数量根拠資料が残らず、情報共有できない又、仮設設備の要否確認ができない

【コスト】

- 3、コスト重視で、安全対策が考慮されない
 - ・ 施工中の状況がイメージできないことから
安全設備費用の必要性が理解されない

問題点と対策

問題点

- 1、産業廃棄物の発生量が積算と実数に大きな差異がある
- 2、仮設の積算根拠が不明確
- 3、コスト重視で、安全対策が考慮されない

対策

設計図書（意匠図、構造図等）を基にデータ化し、データ上で積算する

手書きの仮設図ではなくデータ化し、データ上で積算する

解体中の3D図面を作成し危険箇所を見える化する

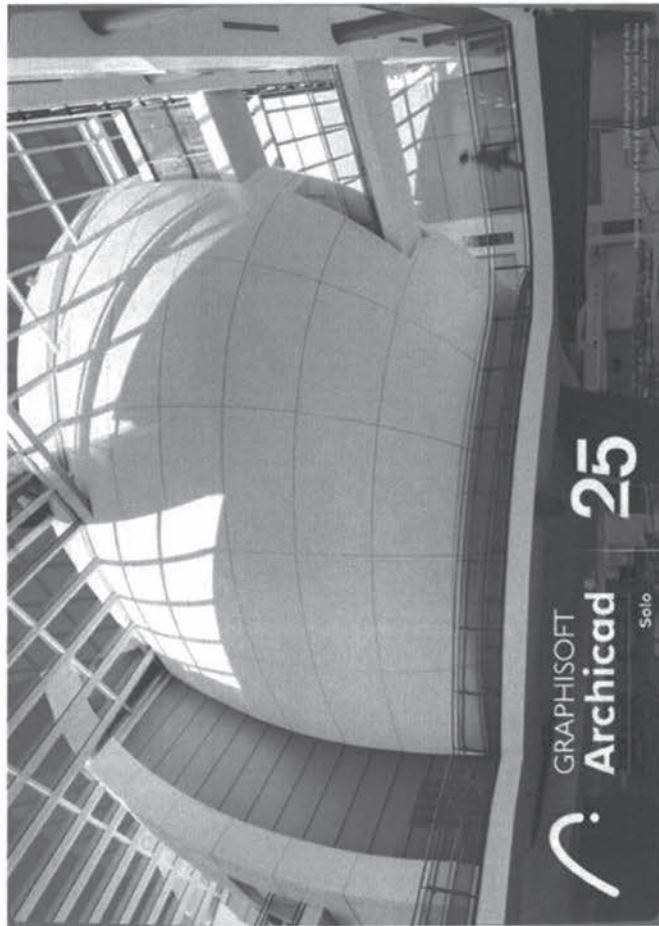
ことにより顧客の理解を得る

B I M モ デ ル を 活 用

使用ソフトの紹介

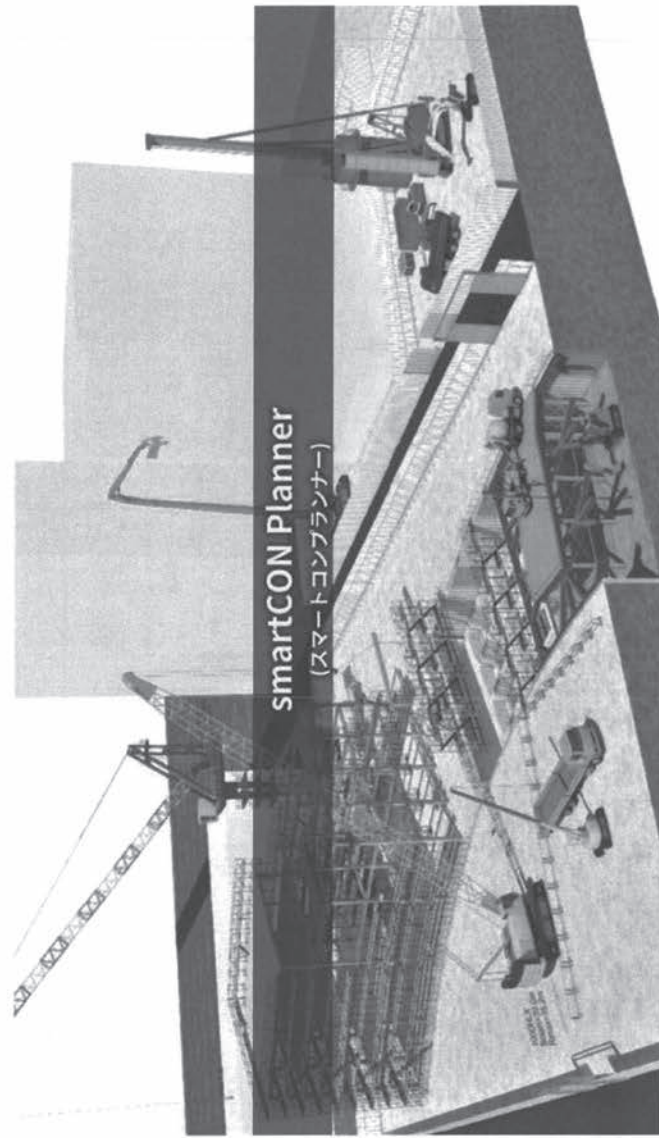


躯体モデル作成ソフト



Archicad solo 2025

仮設モデル作成ソフト



smartCON Planner

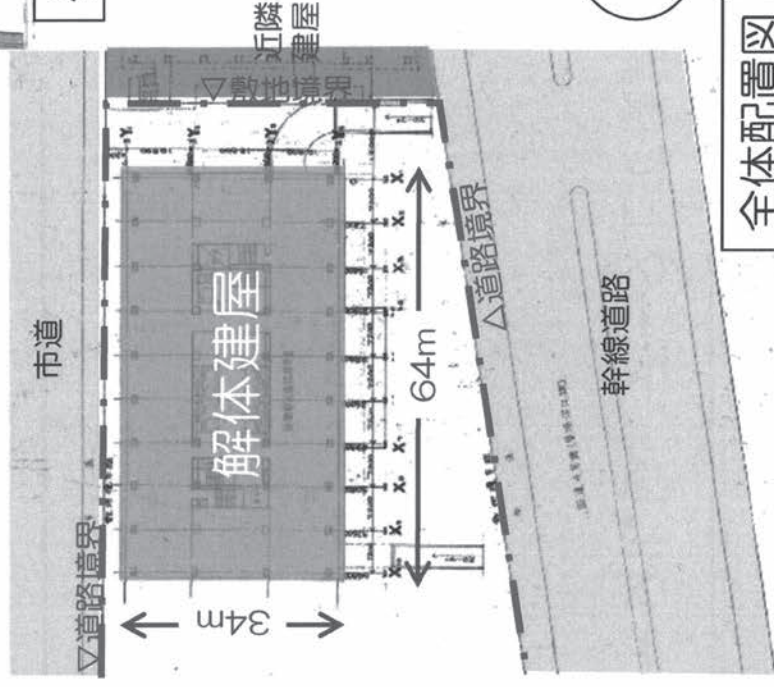
モデル現場

建物概要

- 工事名 : 某建物解体工事
- 場所 : 大阪府内
- 構造 : 地下RRC造、地上SRC造
地上外壁PC版
- 規模 : 地上14階、塔屋2階、地下4階建
- 延面積 : 16,158.23㎡
- 最高高さ : 60m (屋上53m)
- 請負形態 : 一次下請け
- 工法 : 地上3階まで階上解体
地上2～地下2階を地上解体
- 立地 : 北面→市道、南面→幹線道路
東面→近隣建屋、西面→空地
南面、西面は敷地に余裕あり



外観写真



全体配置図



対策の課題と取り組み方針

設計図書（意匠図、構造図等）を基にデータ化し、データ上で積算

設計図書の収集が必須

当案件では設計図書が揃っており、モデル化が可能と判断
内装材は、詳細が不明瞭なため、モデル化が不可能と判断



構造体・RC間仕切り・RC階段に限定して躯体をモデル化
コンクリートガララの積算について取り組む
（発生材の中でもコンクリートガララの占める割合が大きい）

対策の課題と取り組み方針

仮設図を作成、データとして記録しデータ上で積算



建物規模・構造・周辺状況等を現地調査で
確認し、適切な解体工法選定が必要



工法に合致した足場計画。



- 塔屋解体は、屋上に重機を揚重し、西面から解体着手
→ 西面は足場なし
- 階上解体は、通常通り中抜き解体、外壁解体の順
→ 四周に足場設置
- 地上解体（1F・2F）は、西面から解体着手
→ 西面のみ足場先行解体

対策の課題と取り組み方針

解体中の3D図面を作成し危険箇所を
見える化するにより顧客の理解を得る

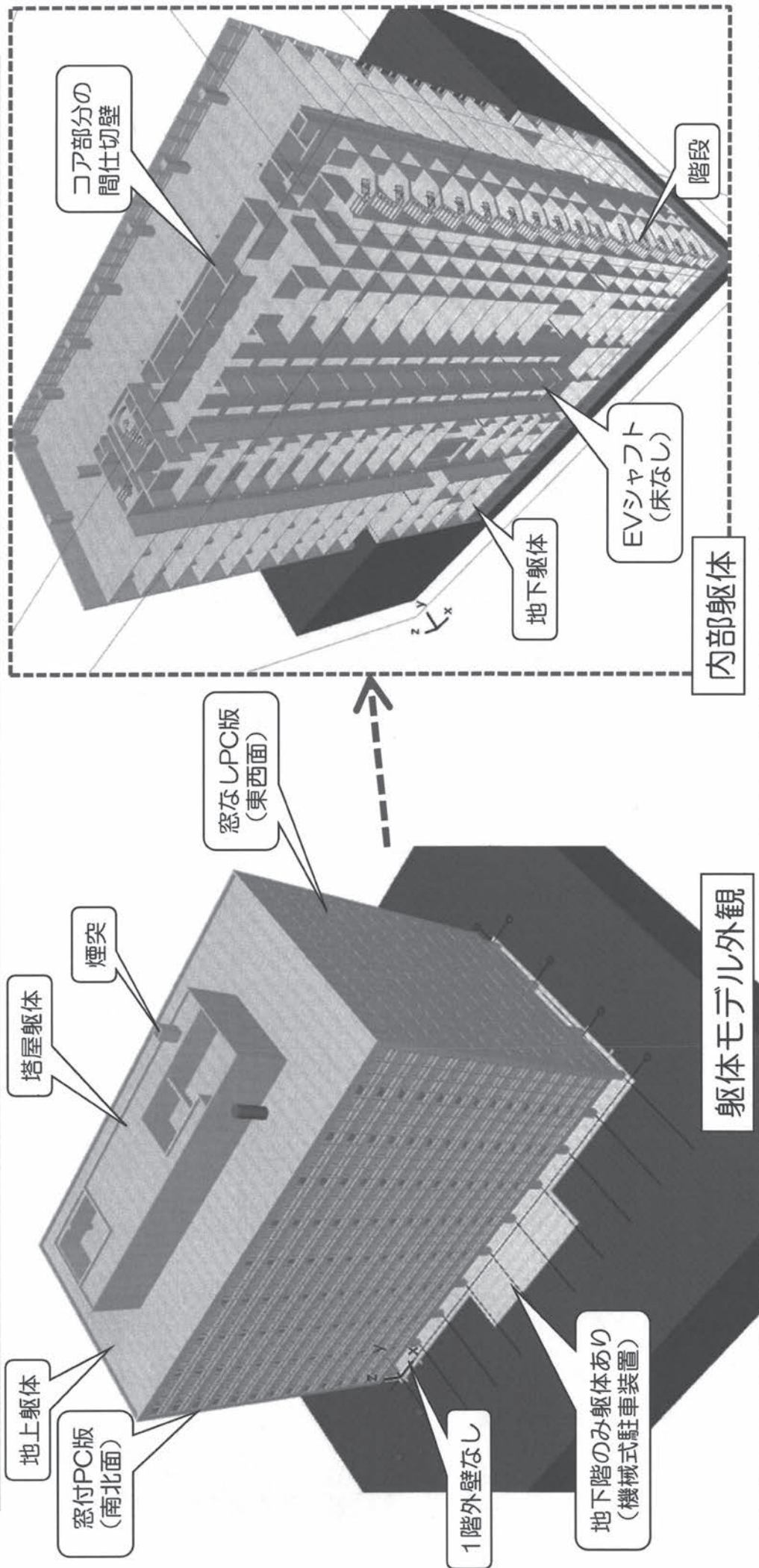


躯体モデル、仮設モデルに安全設備・重機・
車両等を配置し、できるだけ具体的に表現する

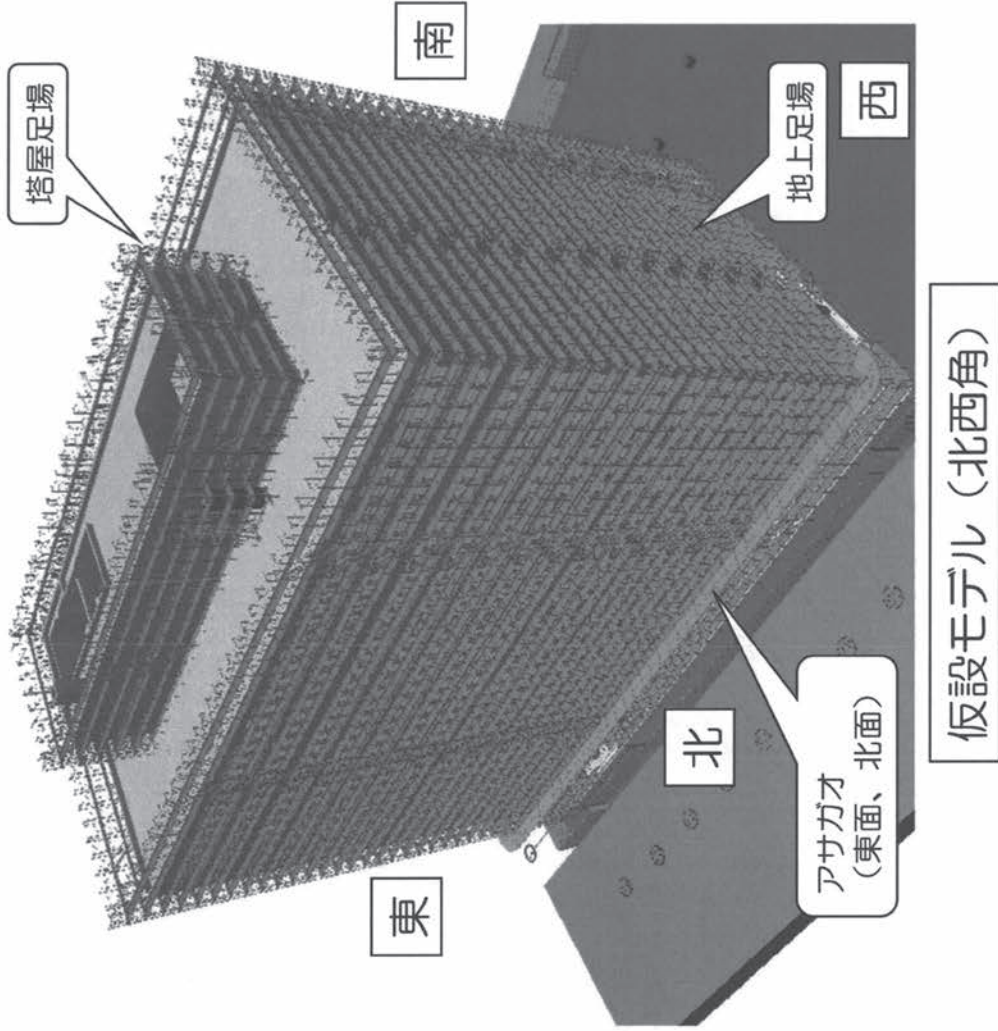
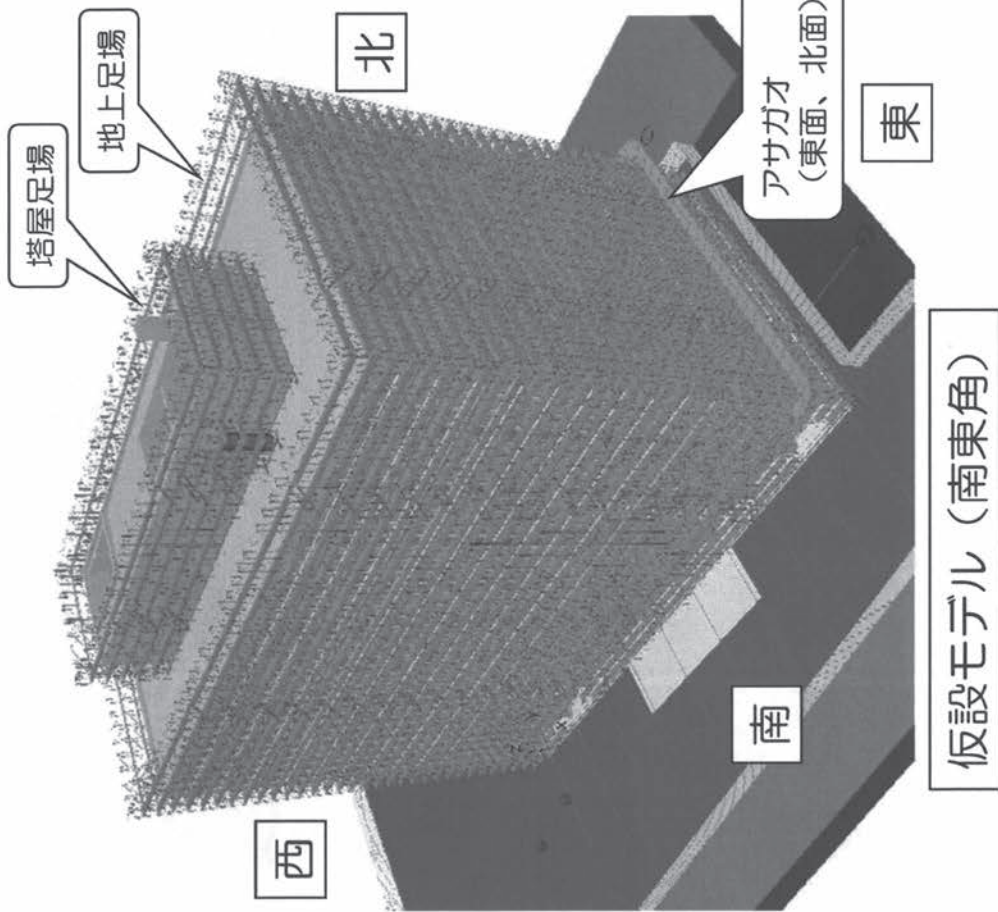


解体ステップを作成し、段階毎での状況をモデル化

躯体モデル作成



仮設モデル作成



積算数量と搬出数量の比較



作業期間	施工箇所	スラブ吐出量 (t)	ダンク搬出量 (t)	数量
令和4年5月10日	令和4年5月30日 設置		78	839.42
令和4年6月1日	令和4年6月20日 14・13 中抜き解体	398.08	177	1,766.24
	14 壁削し解体			0.00
令和4年6月21日	令和4年6月27日 12 中抜き解体	141.81	123	1,359.29
令和4年6月28日	令和4年7月1日 13 壁削し解体	159.73	75	834.95
令和4年7月2日	令和4年7月9日 11 中抜き解体	185.22	99	1,101.36
令和4年7月11日	令和4年7月13日 12 壁削し解体	89.47	80	822.15
令和4年7月14日	令和4年7月20日 10 中抜き解体	201.72	142	1,545.12
令和4年7月21日	令和4年7月25日 11 壁削し解体	120.76	78	851.16
令和4年7月26日	令和4年7月30日 9 中抜き解体	182.58	135	1,484.92
令和4年8月1日	令和4年8月3日 10 壁削し解体	115.57	68	753.70
令和4年8月4日	令和4年8月10日 8 中抜き解体	277.19	192	2,146.27
令和4年8月16日	令和4年8月18日 9 壁削し解体	87.36	63	660.31
令和4年8月19日	令和4年8月24日 7 中抜き解体	195.16	155	1,758.86
令和4年8月25日	令和4年8月27日 8 壁削し解体	149.35	56	603.70
令和4年8月29日	令和4年9月6日 6 中抜き解体	170.30	177	1,803.83
令和4年9月7日	令和4年9月9日 7 壁削し解体	131.67	66	678.52
令和4年9月10日	令和4年9月17日 5 中抜き解体	181.54	187	1,953.24
令和4年9月20日	令和4年9月24日 6 壁削し解体	96.59	81	776.44
令和4年9月26日	令和4年9月30日 4 中抜き解体	199.95	135	1,332.85
令和4年10月1日	令和4年10月4日 5 壁削し解体	122.14	66	669.47
令和4年10月5日	令和4年10月11日 3 中抜き解体	167.45	144	1,415.32
令和4年10月12日	令和4年10月15日 4 壁削し解体	211.13	84	821.81
令和4年10月18日	令和4年10月20日 3 壁削し解体	123.90	66	638.19
令和4年10月21日	令和4年11月5日 2・1 中抜き解体			2,127.80
令和4年11月6日	令和4年11月19日 2・1 壁削し解体			4,896.96
令和4年11月21日	令和4年11月30日 B1 地下解体	116.68	2	2872.91
令和4年12月1日	令和4年12月20日 B1 地下解体	245.42	410	4,359.31
令和4年12月21日	B1 地下解体			0.00
		4,806.10	3,925	40,876.10

合計数量

躯体モデル積算=41,848.96t
 実際に搬出した数量=40,876.10t
 誤差=972.86t
 (全体数量の約2.3%)



許容内の誤差

コンクリートガラ搬出数量表

足場積算

A	B	C	D
ゾーン名	足場内周 (落下養生長さ)	足場面積	アサガオ
01F足場	0	1276.62	<未定義>
02F足場	205458	765.97	<未定義>
03F足場	205458	765.97	109738
04F足場	205458	765.97	<未定義>
05F足場	205458	765.97	<未定義>
06F足場	205458	765.97	<未定義>
07F足場	205458	765.97	<未定義>
08F足場	205458	765.97	<未定義>
09F足場	205458	765.97	<未定義>
10F足場	205458	765.97	<未定義>
11F足場	205458	765.97	<未定義>
12F足場	205458	765.97	<未定義>
13F足場	205458	765.97	<未定義>
14F足場	205458	765.97	<未定義>
P1F足場	0	447.72	<未定義>
P2F足場	117054	447.72	<未定義>
PRF足場	0	416.63	<未定義>
RF足場	0	920.23	<未定義>
RF鉄骨階段足場	5488	116.87	<未定義>
RF鉄骨階段足場	5488	116.87	<未定義>
	2,798,984.0 mm	13,700.27 m ²	109,738.0 mm

アサガオ総延長

落下養生総延長

足場合計面積

仮設モデルから算出した足場積算表

足場面積
1276.62
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
765.97
447.72
447.72
416.63
920.23
116.87
116.87
13,700.27 m ²

足場合計面積

足場合計面積

積算数量と実施数量の比較

	北		東		南		西	
	段数	スパン	段数	スパン	段数	スパン	段数	スパン
18/12スパン	33	38	33	38	33	38	33	38
15/12スパン								
12/12スパン			33	2			33	2
09/12スパン			33	1			33	1
06/12スパン								
18シート	5	29	5	8	5	24	5	1
15シート								
12シート			5	1			5	1
09シート								
06シート								
小計		4413.88		2201.61		4365.00		2091.19
合計		13041.68 m ²						

建屋本体

塔屋

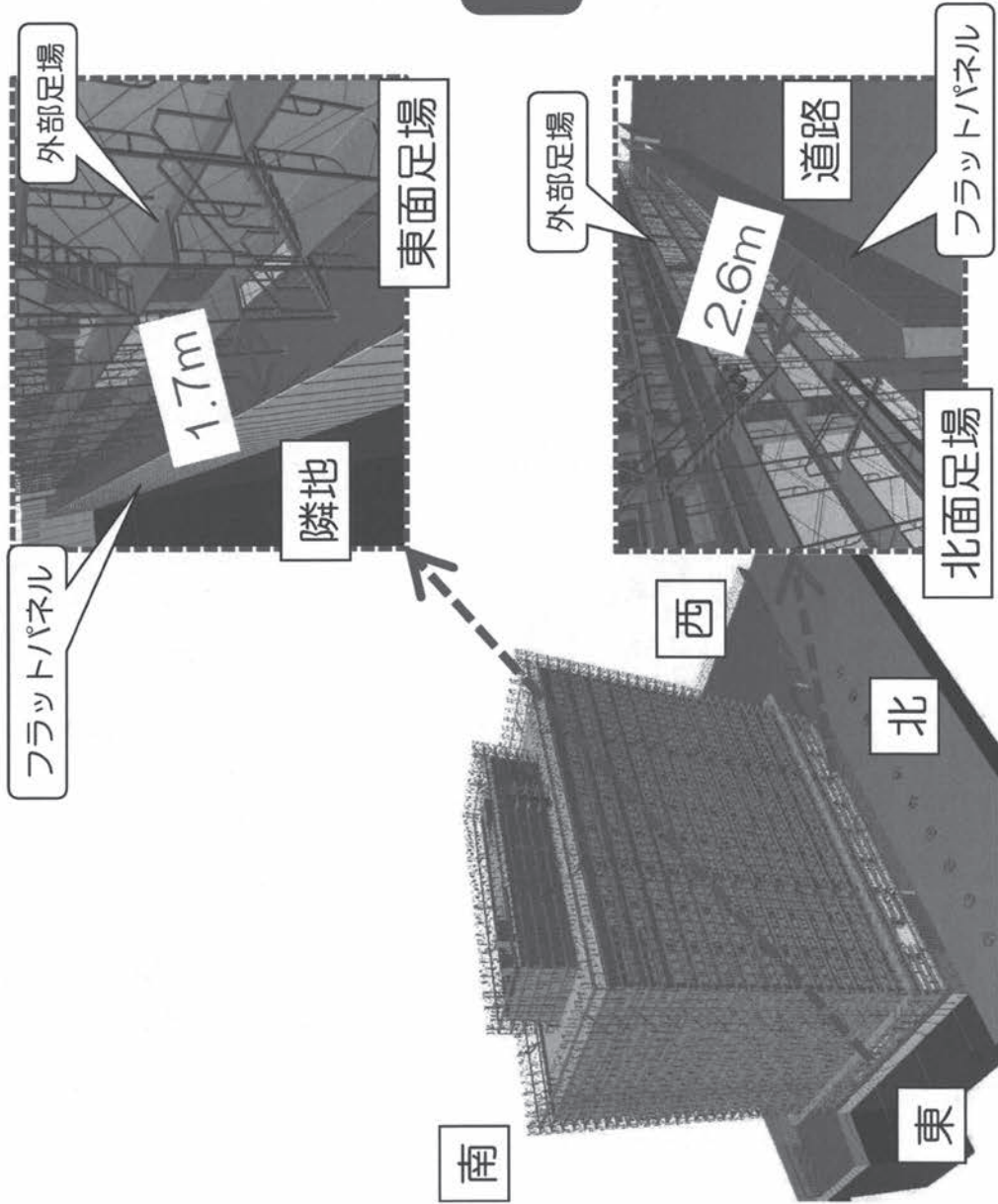
足場設置数量

仮設モデル面積=13,700.27m²
 施工面積=13,041.68m²
 誤差=685.59m²
 (全体数量の約4.8%)



許容内ではあるが、
誤差が大きい

立案① (懸念事項)

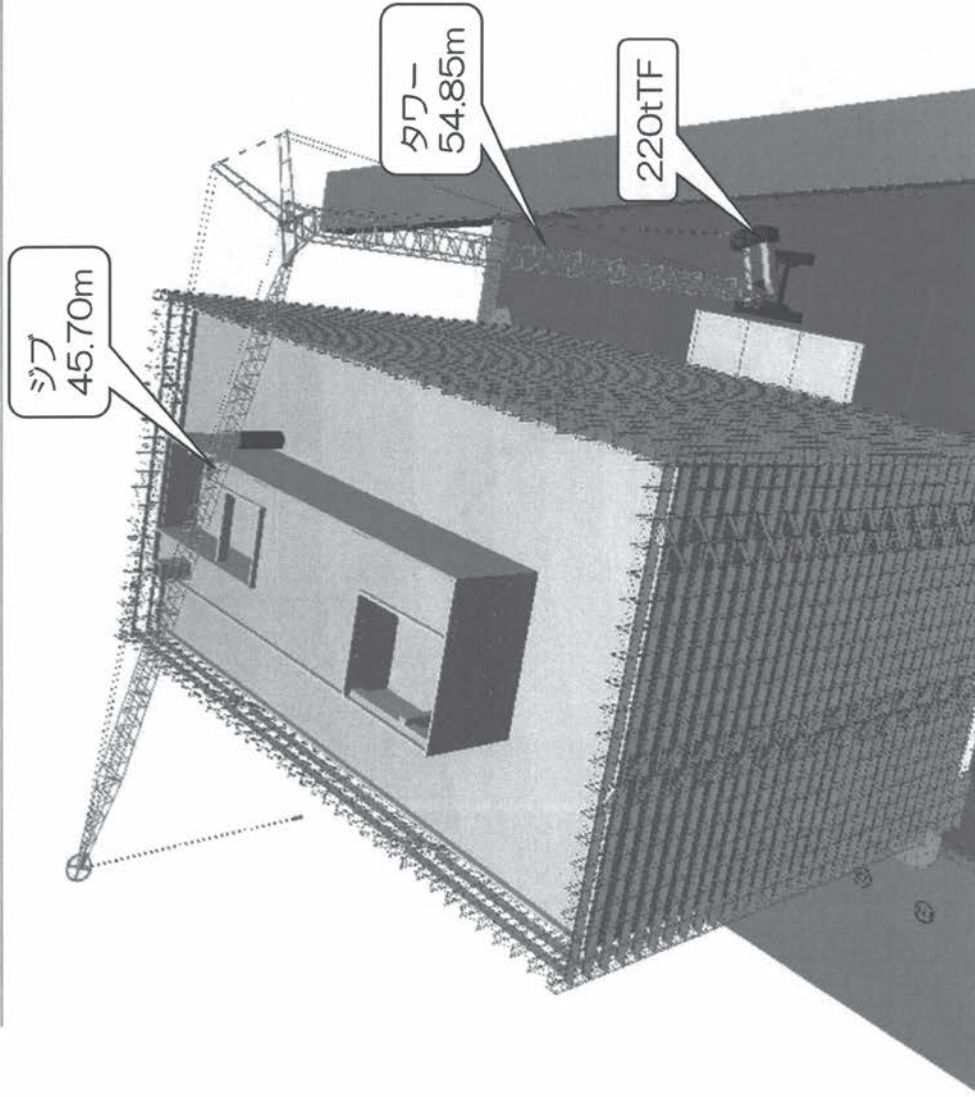


各面の足場と境界の関係性を見える化できた。
東面、北面の足場組立解体作業が危険箇所だと認識できた。



公衆災害防止策が必要

立案①（提案と期待する効果）



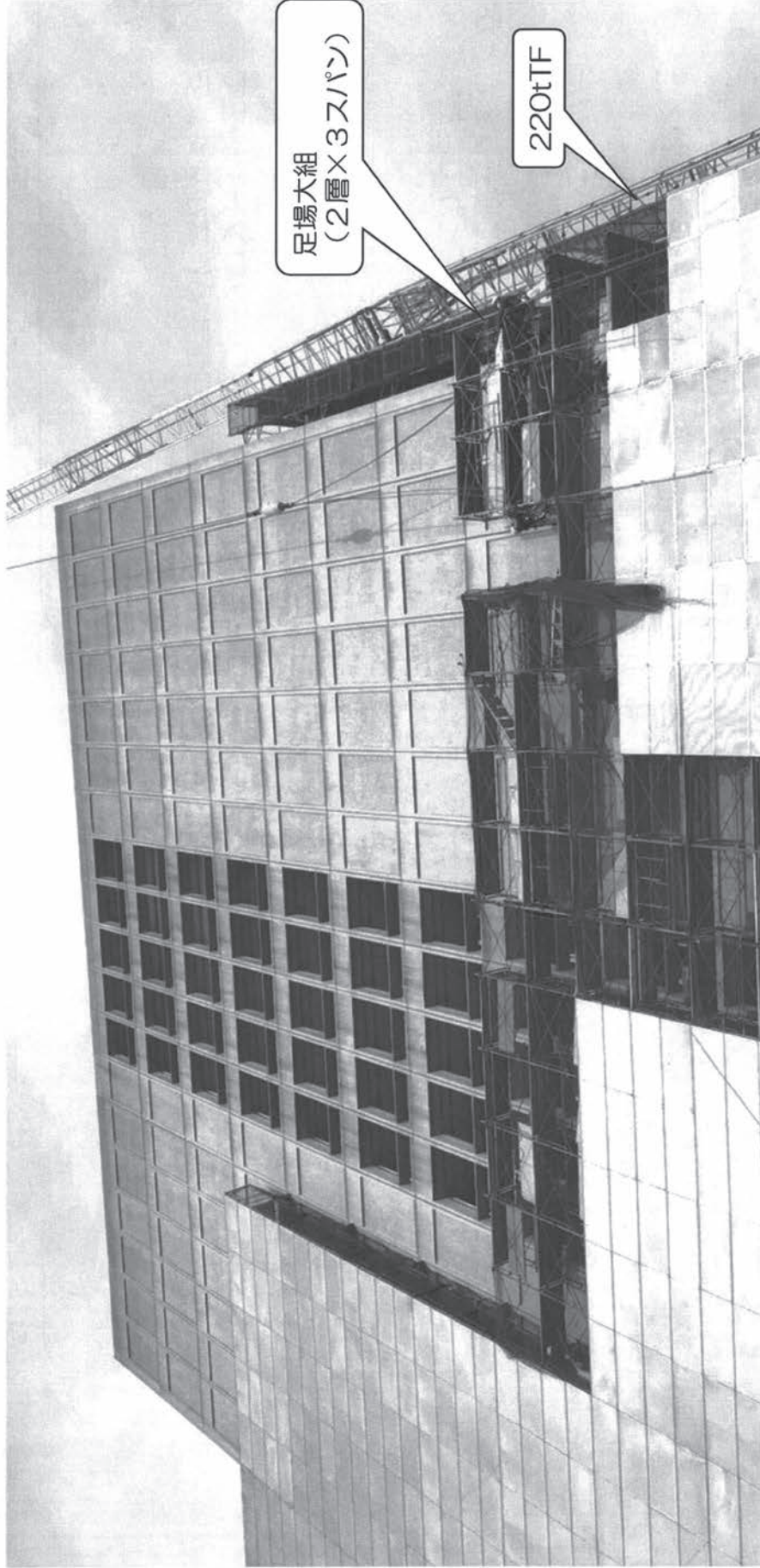
外部足場の組立解体作業中に足場上部で扱う資材の数を低減するために、ユニットによる組立解体ができるように、敷地南面に220tタワーフロントを提案



【期待する効果】

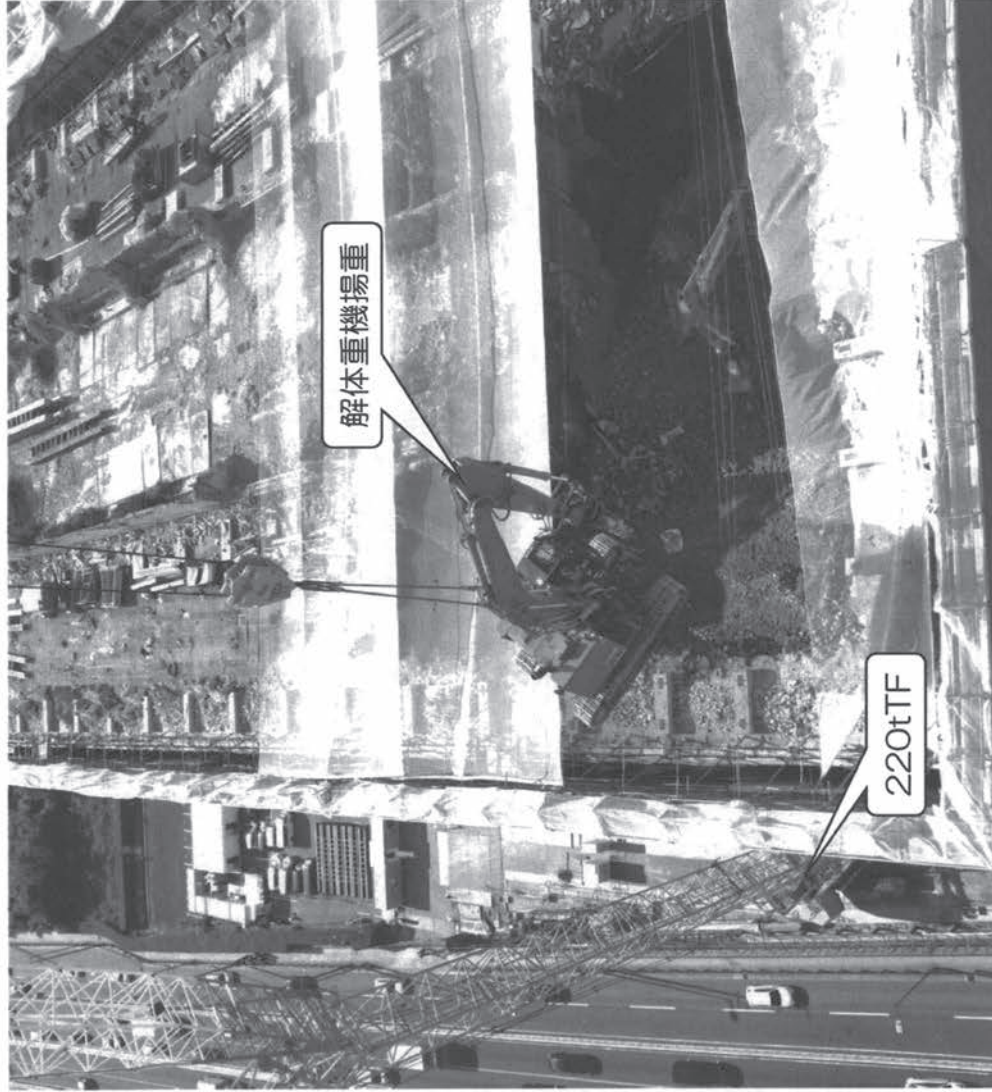
- 組立解体時の境界際での足場材の揚重回数低減
- 足場資材の落下の危険性低減
→安全性向上

立案①（施工）



ユニット組立状況写真

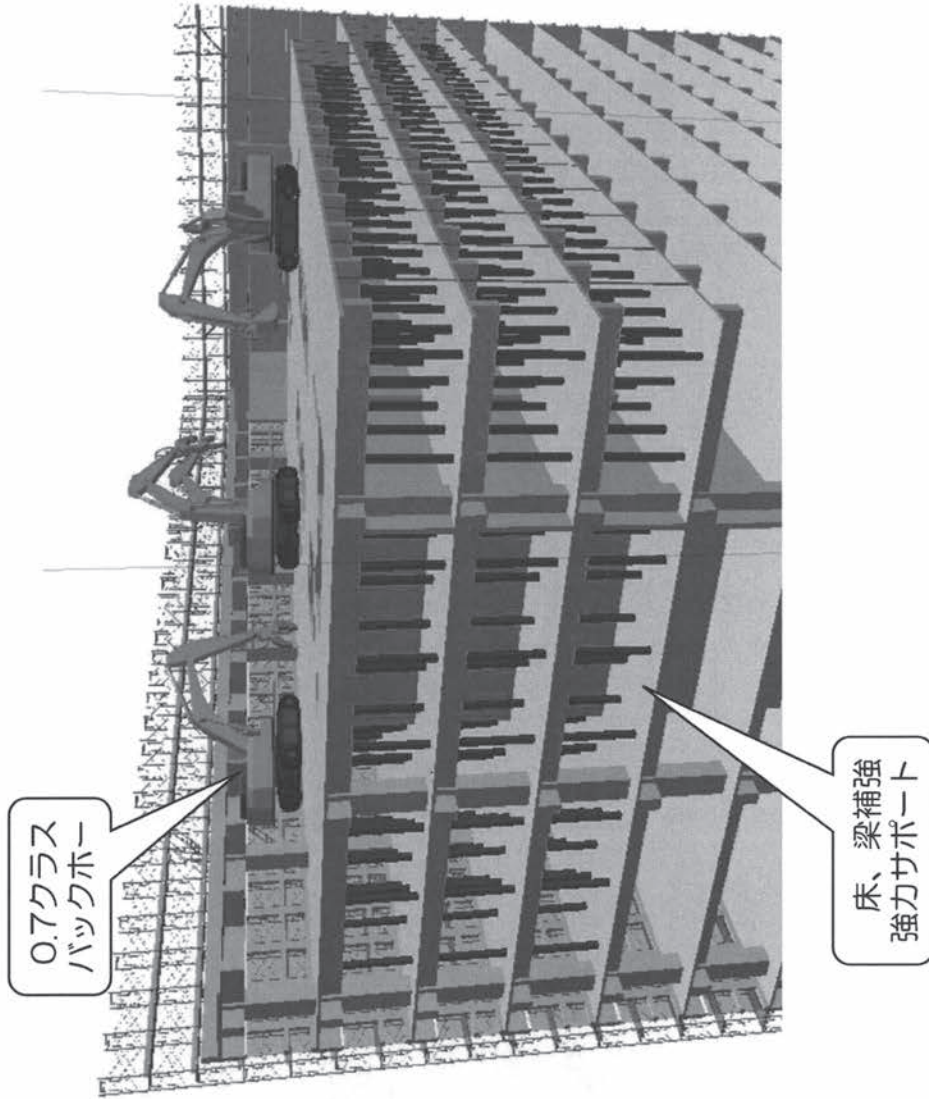
立案①（効果の確認）



【効果の確認】

- 足場をユニットによる組立解体をすることができた
→ 安全性向上
- 大組、大払しをすることで歩掛が伸びた
→ 施工性向上
- 塔屋上の設備機器を早期に撤去することができ、
次工程を前倒しで進めることができた
→ 施工性向上
- 220tタワーフロントを使用して重機揚重作業が
可能であった
→ コスト低減
- 重機降階作業もタワーフロントで施工でき、ガラ
スロープを重機自走する作業がなく、安定した状
態で作業ができた
→ 安全性向上

立案②（懸念事項）



階上解体をする際のスラブ、梁補強が非常に
多くなることを見える化できた



補強概算数量

1フロアあたり：約400本

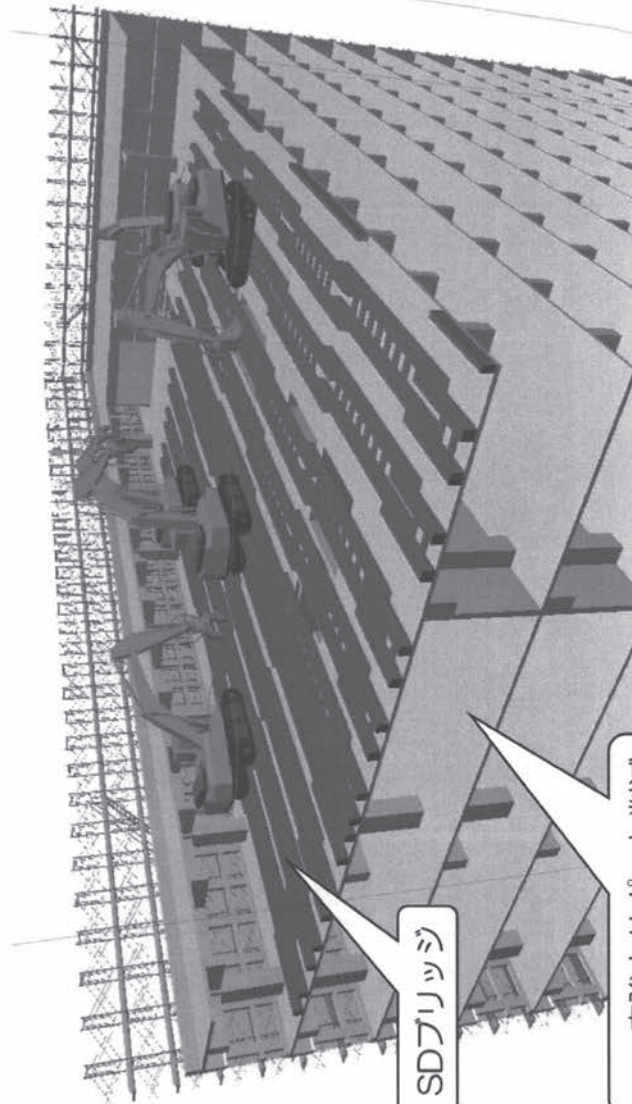
補強層数：3層

400×3=1200本



資材と作業員の低減策が必要

立案②（提案と期待する効果）



ブリッジ工法を提案



【期待する効果】

- 使用する強化サポートの本数低減
→ 施工性向上
- 組立、盛替え、解体手間の低減
→ 施工性向上

SDブリッジ

床強化サポート削減
梁強化サポート大幅低減

立案②（施工）



SDブリッジ

階上解体中写真

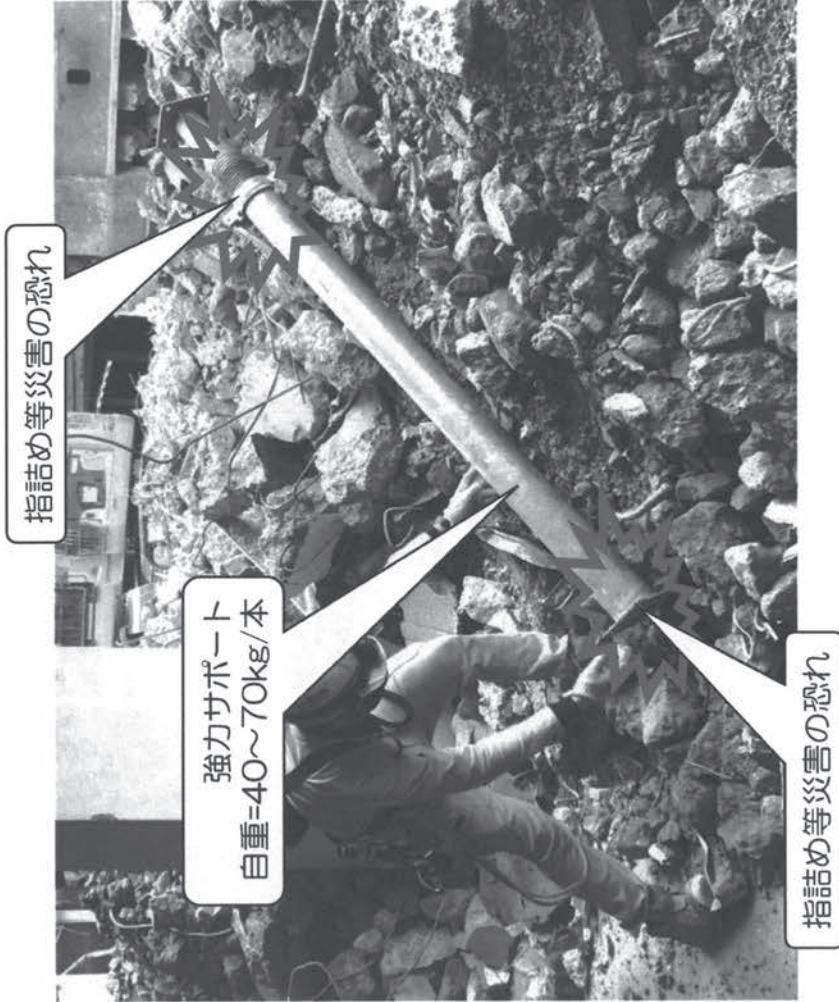


梁断面によっては、
梁下にも補強が不要

スラブ下補強不要

下階補強状況写真

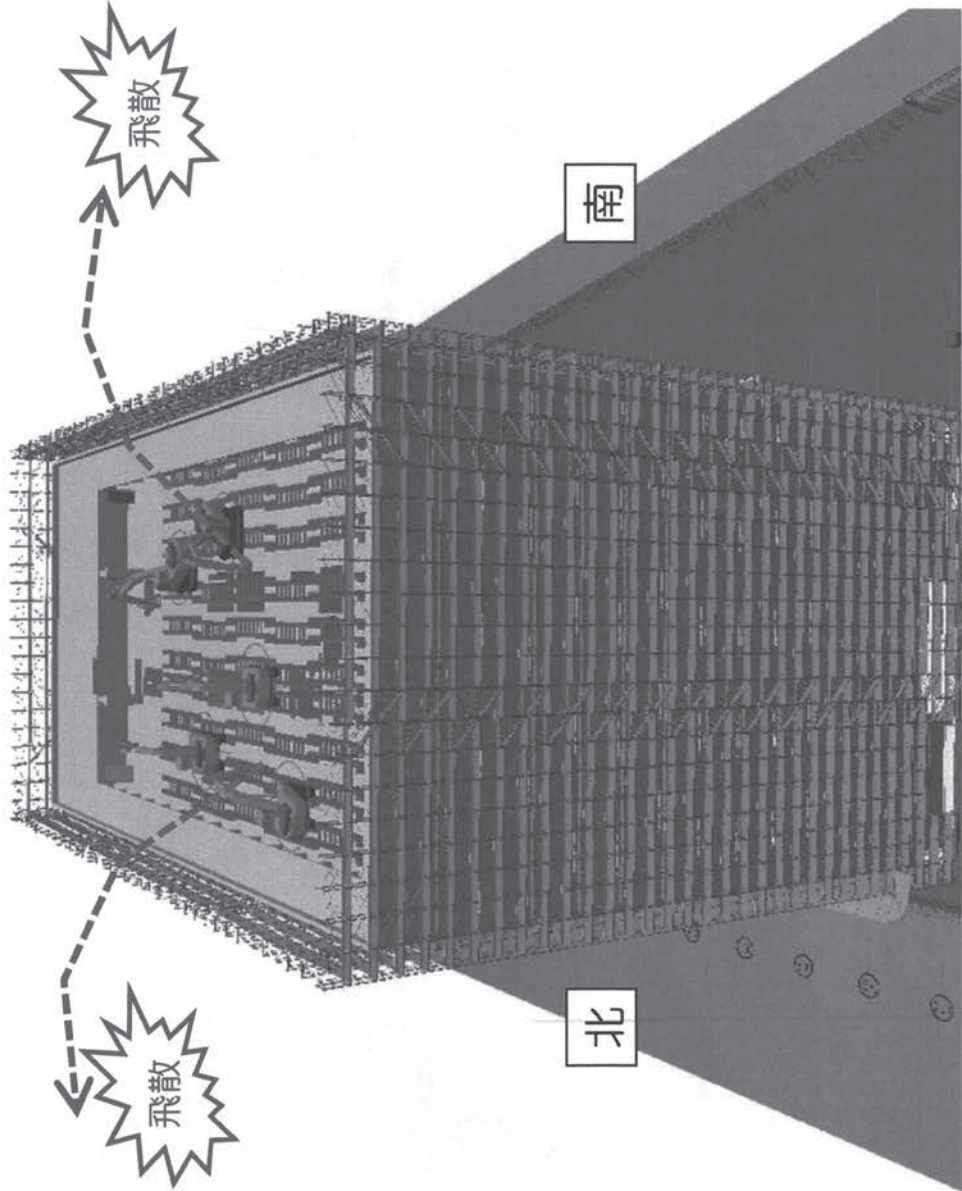
立案②（効果の確認）



【効果の確認】

- 部分的に梁補強も不要となり、強力サポートを大幅に低減できた
→ 施工性向上
- 組立、盛替え、解体の手間を低減できた
→ 施工性向上
- 重量資材を扱う回数を低減でき、災害防止に繋がった
→ 安全性向上

立案③（懸念事項）



- 北面道路、南面幹線道路との関係性
を見える化できた
- 解体材が外部へ飛散することによる
災害の恐れを認識できた



公衆災害防止策が必要

立案③（提案と期待する効果）



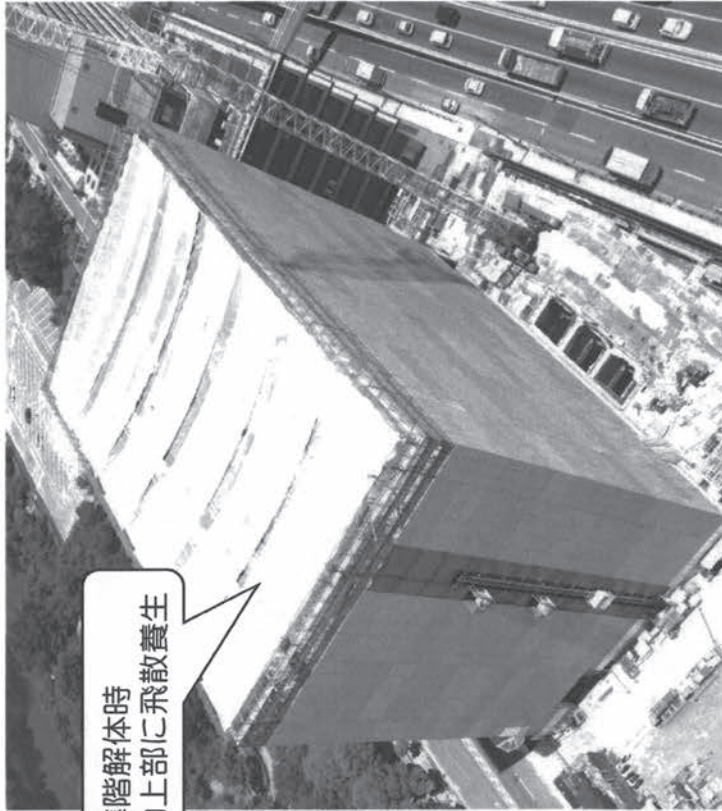
飛散防止策として、足場を利用して
建物上部に覆いを設置することを提案



【期待する効果】

- 解体材の外部飛散防止
→ 安全性向上

立案③（施工）

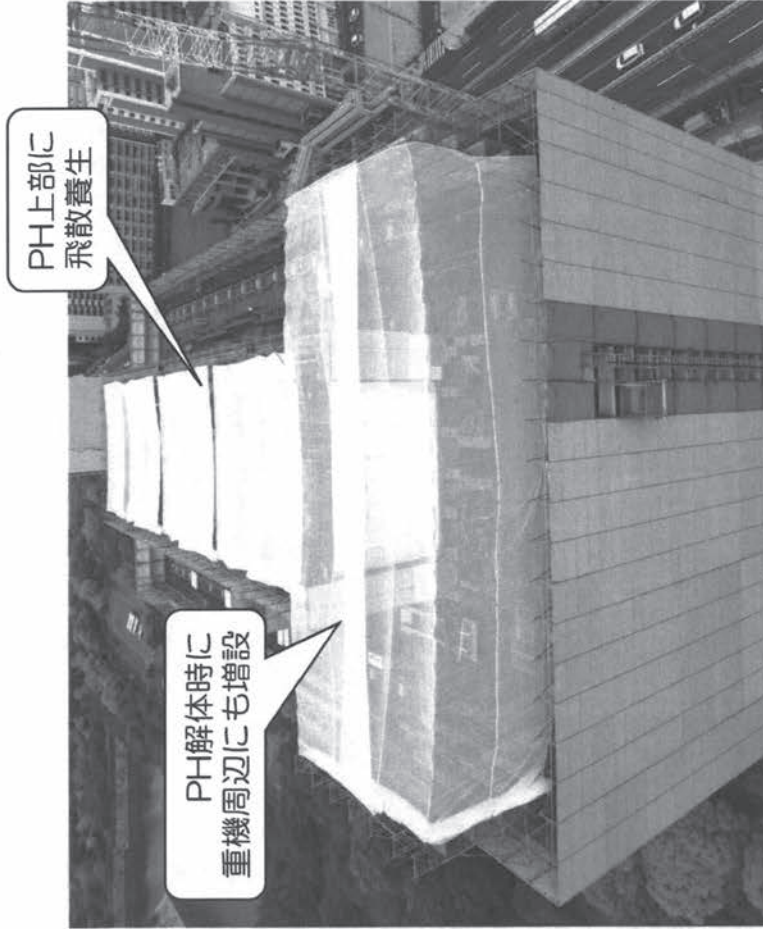


飛散防止外観写真



飛散防止内部写真

立案③（効果の確認）



【効果の確認】

- 解体材が外部に飛散することを防止できた
→安全性向上
- 事前に飛散防止策を検討していただくため、盛替え
手間低減を考慮した飛散防止対策ができ、工程
に影響を与えなかった
→施工性向上
- 塔屋解体時の重機周囲の飛散防止策まで講じる
ことができた
→安全性向上

モデル作成に要した実働日数



項目 \ 日数	2	4	6	8	10	12	14
躯体モデル		↑					
仮設モデル			↑				
ステップ図					↑	↑	↑
積算表			躯体積算 ↑		仮設積算 ↑		

まとめ

- ①コンクリートガラの積算は、精度の高い積算ができたが、仮設の積算は、精度を上げる方策を検討する必要がある
- ②仮設配置をモデル化したため、積算根拠をデータとして残すことができ、情報共有できた
- ③危険な箇所を共通認識し、早い段階で安全対策の必要性について、顧客に理解を得ることができ、コストに反映できた
- ④公衆災害ゼロに繋げることができた

水平展開

- ①積算用躯体モデル作成に時間を要するため、時間を短縮するための対策が必要
- ②設計図書の保管状況によっては、BIMモデルの対応が不可能な場合があるため、従来通り、係数に頼らざるを得ない

令和5年度 公益社団法人全国解体工事業団体連合会
解体工事に係る研究発表会

階上解体工法における床版サポートの実験と解析 階上解体におけるサポートのひずみ計測と解析

2024年8月8日

青木 孝義¹⁾, 張 景耀²⁾, 伯耆原 康男³⁾

- 1) 建築構造技術研究所(名古屋市立大学)
- 2) 建築構造技術研究所(京都大学)
- 3) 湘 KEN WORKS 一級建築士事務所

研究の背景

- ・ 築50年前後の建物がこれからは**建替え**の時期に。
- ・ 特に、敷地が限られている都市中心部の建物の解体は、**階上解体が主流**に。
- ・ サポートの**合理化**はコストダウンに。
- ・ 建物全体の揺れもモデル化によって**見える化**に。
- ・ コンクリート強度の簡易推定。
- ・ SfM技術により解体作業のモデル化によって**見える化**に。
- ・ DX(デジタルトランスフォーメーション)の可能性
- ・ . . .

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

これまでの研究

解体工における構造物の安全性に関して

- ・ 日本大学生産工学部5号館 (RC造) の**地上解体**工に関連して**振動特性**の変化
- ・ 名古屋市立大学薬学部校舎 (RC造) の**地上解体**における建造物の**振動特性**
- ・ 名古屋市立大学芸術工学部体育館 (S造) の**地上解体**における建造物の**軸力**の変化と**振動特性**
- ・ RC造の**階上解体**における床版サポート (サポートの**軸力**の変化)
- ・ RC造建物の**階上解体 (減築)**における建造物の**振動特性**
- ・ HPシェルの解体工における軸力の変化と振動特性、ドローン、SfM技術の活用、変位計に関する研究を進めてきた。

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

令和5年度の研究

1. 階上解体におけるサポートのひずみ計測と解析
2. 階上解体における床版の振動、サポートの軸力計測
3. 解体建物の形状計測
4. 床版・梁等のサポートの計算整理
5. 解体作業中における構造物の安全性を測定するための装置と変位計の開発
6. コンクリート強度の簡易推定

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

階上解体におけるサポートのひずみ計測と解析

【階上解体工法におけるサポートの位置づけ】

⇒スラブ・梁を支えるサポートを複数層に設置する必要がある

- ① 解体重機がスラブ上で作業を行う
- ② スラブ単独では、耐力が不足する

【階上解体工法におけるサポートの現状】

⇒安全で効率的な、広範性のある工学的な工法の確立が望まれている

- ① サポート設置に関する工学的基準が無い
- ② 施工者の経験的な判断によりサポートを設置している現状である
- ③ 安全の確保が難しい状況であると考えられる

【本研究の主題】

⇒解体工事中にサポートの「ひずみ」計測を実施

⇒ひずみ量から階上解体作業時におけるサポートへの負担を検討する

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

対象建物の概要

検証工事：10階建SRC造共同住宅の階上解体工事

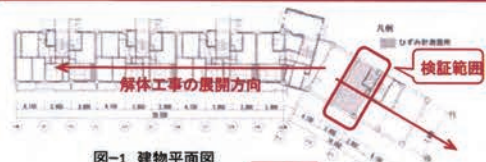


図-1 建物平面図



図-2 建物立面図

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

解体作業の概要

【解体作業の概要】

- ① 工法は階上解体工法
- ② 使用重機は揚重して据置き
- ③ 重機の規格は0.5m²クラスのバックホウ (型番: KOBELCO SK135)
- ④ コンクリート塊を50cm敷き均し ⇒ 図-3に示す (上層階解体で発生したものを使用する)

図-3 作業時重機の状況

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

解体作業荷重の算出とサポートの設置

(1) サポートの設置位置について

図-4 平面図 図-5 断面図

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

解体作業荷重の算出とサポートの設置

(2) 解体作業荷重の算出について

- ① 解体したコンクリート塊の荷重
 = ハッチング範囲の床面積(20.1m²) × 堆積厚さ (t=0.5m) × かさ比重(15KN/m³)
 = 20.1m² × 0.5m × 15KN/m³
 = 150.8KN
- ② 重機重量
 = 155KN
- ③ 衝撃荷重
 155KN × 0.3 = 46.5KN

①+②+③ = 352.3KN

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

実験概要

(1) サポートジャッキによるひずみ計測について

図-6 ひずみゲージ設置状況

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

実験概要

(2) ひずみ量から荷重(軸力)への変換について

$$\sigma = (\epsilon_a - \epsilon_0) \times E$$

$$P = \sigma \times A \times 10^{-3}$$

ここに
 ϵ_a : 計測値(ひずみ値)
 ϵ_0 : 初期値(荷重の掛かっている時のひずみ値)
 E : 弾性係数(2.05 × 10⁵ N/mm²)
 σ : 応力(N/mm²)
 P : 荷重(KN)
 A : 断面積(mm²)

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

実験結果及び考察

(1) サポートに掛かる最大荷重について

測定位置	1層目設置サポート (KN)	2層目設置サポート (KN)	3層目設置サポート (KN)
1C1	45.3	15.0	2.0
1C2	29.4	21.1	18.0
1C3	32.7	21.3	25.3
2C1	21.1	18.0	21.3
2C2	25.3	21.3	34.1
2C3	12.1	34.1	12.1
3C1	60.3	15.0	2.0
3C2	15.0	2.0	2.0
3C3	2.0	2.0	2.0

図-7 各測点における最大軸力値

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ

実験結果及び考察

(1) サポートに掛かる最大荷重について



研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 13

実験結果及び考察

① 想定する突き抜け荷重について

$$\sigma_s = \frac{N \times 1000}{t \times \tau} < f_s$$

σ_s : バンデイング応力 (N/mm²)
 N: 突き抜け荷重 (KN)
 f_s : コンクリート許容せん断応力 (N/mm²)
 ($f_s=0.9$ N/mm²) (出典: 鉄筋コンクリート構造
 計算基準・同解説 (日本建築学会))
 t: スラブ厚 (t=120mm)
 τ : せん断抵抗周長 $\tau=4 \times 160 \times t \times \pi$
 サポート端部幅 (mm)=160mm

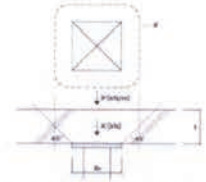


図-9 突き抜け荷重の概念図

・突き抜け荷重は、109.8KNとなり最大荷重60.4KNはそれを下回っていた。
 また、実際の工事においても突き抜けは発生していないことが確認できた。

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 14

実験結果及び考察

(2) 解体作業荷重と1層目サポートの受けた荷重の関係について

表-2 作用荷重とサポート軸力荷重の総和の 最大値との比較

作業床に掛かる荷重合計	352.3KN
サポートの軸力荷重の総和の最大値	178.3KN

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 15

実験結果及び考察

(3) サポートの負担荷重の下層への伝達について

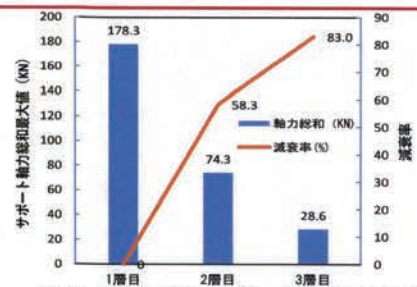


図-10 1層目でサポート軸力の総和が最大になる時点における軸力総和荷重、減衰率

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 16

まとめ

対象とした解体作業においてサポートにかかる荷重の実態ならびに構造安全性を検討した結果は、本実験の範囲では次の通りである。

【結果その1】

サポートに作用した最大荷重と状況について

- ① 全期間において1本のサポートにかかった最大荷重は、60.4KNであった
- ② 使用した強力サポートの許容耐力147.1KNの41%であった
- ③ 上記は突き抜け荷重を下回っており、実際に突き抜けは発生していない

【結果その2】

サポートが負担している推定荷重の割合について

- ① 作業床にかかる推定荷重合計の49%が梁を通して柱及び壁に伝達
- ② 51%を1層目のサポートが負担していた

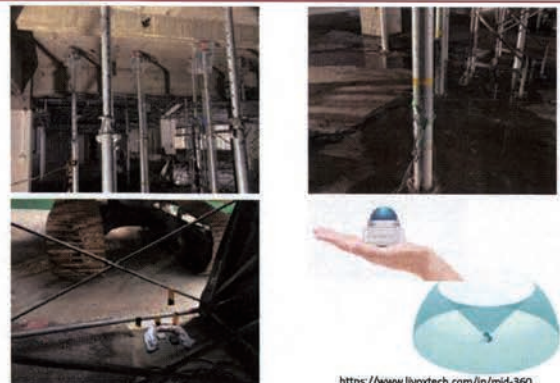
【結果その3】

サポート3層設置の場合の減衰率について

- ① サポートを3層設置した場合、作業階の荷重は、各層で6割程度ずつ梁を通過して柱および壁に伝達され減衰していた

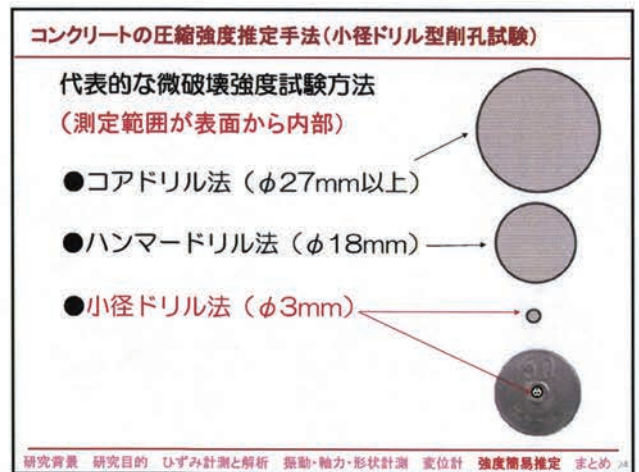
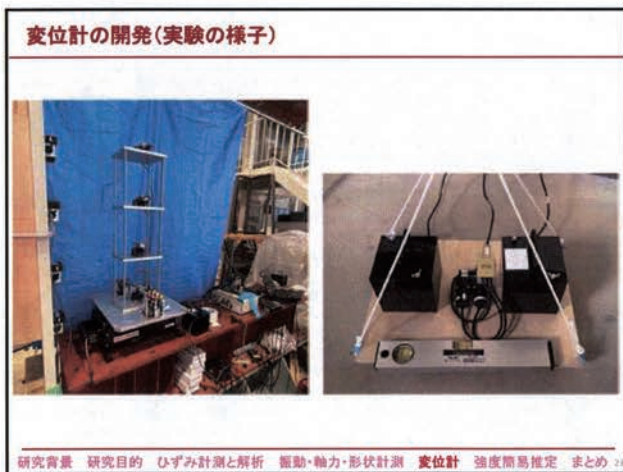
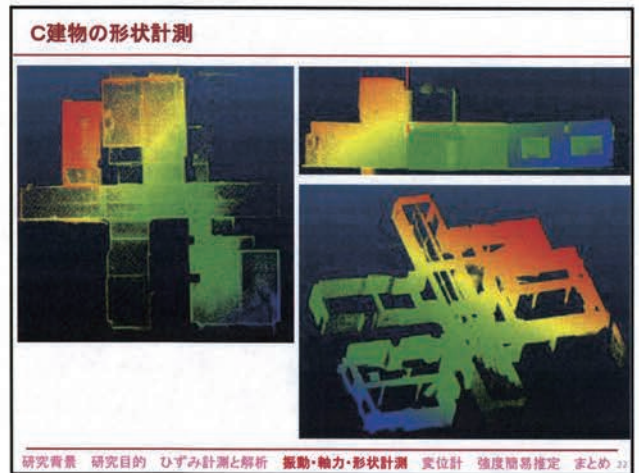
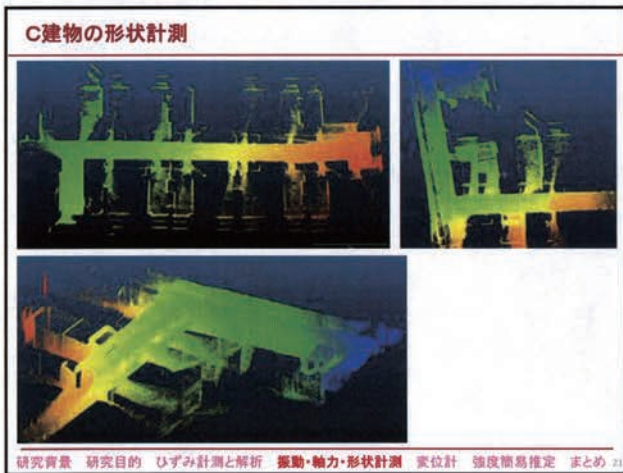
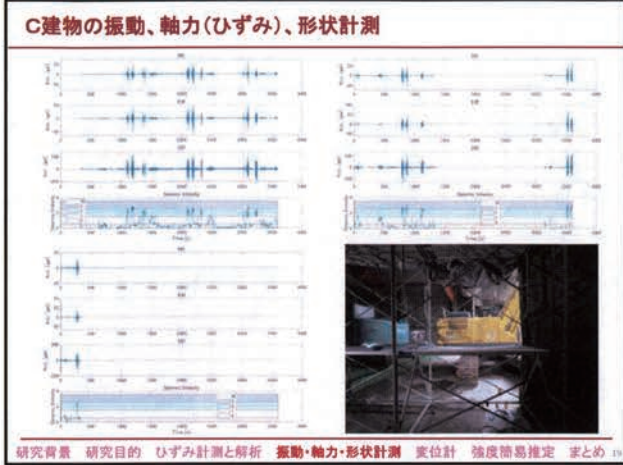
研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 17

C建物の振動、軸力(ひずみ)、形状計測

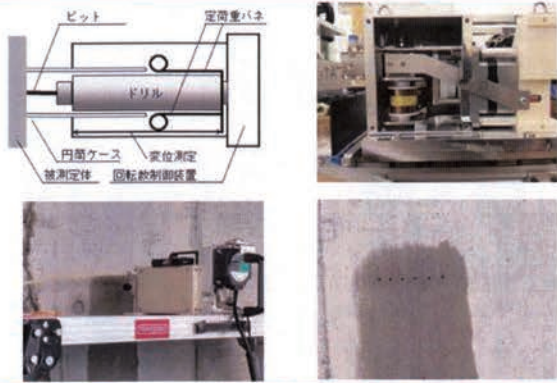


<https://www.livoxtech.com/jp/mid-360>

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 18



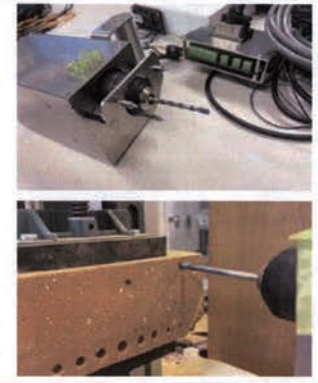
コンクリートの圧縮強度推定手法(小径ドリル型削孔試験)



研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 24

コンクリートの圧縮強度推定手法(小径ドリル型削孔試験)

- ・最大50mmまで削孔可能
- ・～φ10mm
- ・水を使用しない
- ・変位制御
- ・荷重制御
- ・。。。



研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 24

謝辞

本研究の実施にあたっては、

- ・ 研究助成をいただきました、公益社団法人 全国解体工事業団体連合会に感謝申し上げます。

実験にあたっては、

- ・ ご協力いただきました、UR、戸田建設に感謝申し上げます。

研究背景 研究目的 ひずみ計測と解析 振動・軸力・形状計測 変位計 強度簡易推定 まとめ 27

解体工事現場における非火薬破碎剤適用の実証 (非火薬破碎剤を解体工事現場でもっと手軽に利用できるように)

株式会社 カコー

長野 正幸

1. はじめに



火薬類の爆発エネルギーを利用した技術は、わが国でも古くから鉱山や土木分野では広く用いられており、経済的で効率の良い方法である。しかしながら、解体工事においては、火薬の持つ強力な破壊エネルギーを制御することが難しいことに加えて、火薬の煩雑な手続きや厳しい規則が障害となり、普及するには至っていない。

一方、火薬と類似した破碎効果を得るものとして非火薬破碎剤があるが、火薬と同様、解体工事においてはあまり普及していない。そこで、解体工事現場において、非火薬破碎剤を用いた破碎工法の適用性の是非を検討するための施工事例を取得するとともに、作業性、環境性、安全性、経済性について検討した。

2. 非火薬破碎剤

実験にはカヤク・ジャパン（株）製の非火薬破碎剤「ロックラック」を使用した。ロックラックの特性を表-1 に示す。参考として、一般的な火薬である含水爆薬の特性も表中に示した。

表-1 非火薬破碎剤「ロックラック」、含水爆薬の特性

	非火薬破碎剤「ロックラック」	含水爆薬
外観		
爆発反応の種類	爆燃（衝撃波を伴わない）	爆ごう（衝撃波を伴う）
反応速度、爆速（m/sec）	100～300	5,800～6,000
後ガス	不良	優良
耐水性	なし	優良
火薬類取締法の適用	受けない	受ける

非火薬破碎剤「ロックラック」は、テルミット反応と呼ばれる酸化還元反応を起こし、瞬間的な蒸気の膨張圧によって対象物を破碎する。反応速度は含水爆薬の 1/25 程度であり、含水爆薬に比べると破壊威力は小さく、衝撃波を生じない。非火薬破碎剤の利点として、火薬類取締法の適用を受けないため、貯蔵や消費に掛かる手続きや手間を必要とせず、現場からの突発的な要望にも迅速に対応できる。そのため、解体工事の現場としては扱いやすい商品であると考えられる。

3. 非火薬破砕剤を利用したコンクリート基礎の解体

非火薬破砕剤の施工事例を取得することを目的として、江東区有明地区にある鉄骨造倉庫の解体工事現場（図-1）において、厚さ 600mm のコンクリート基礎の破砕に非火薬破砕剤「ロックラック」を用いた。

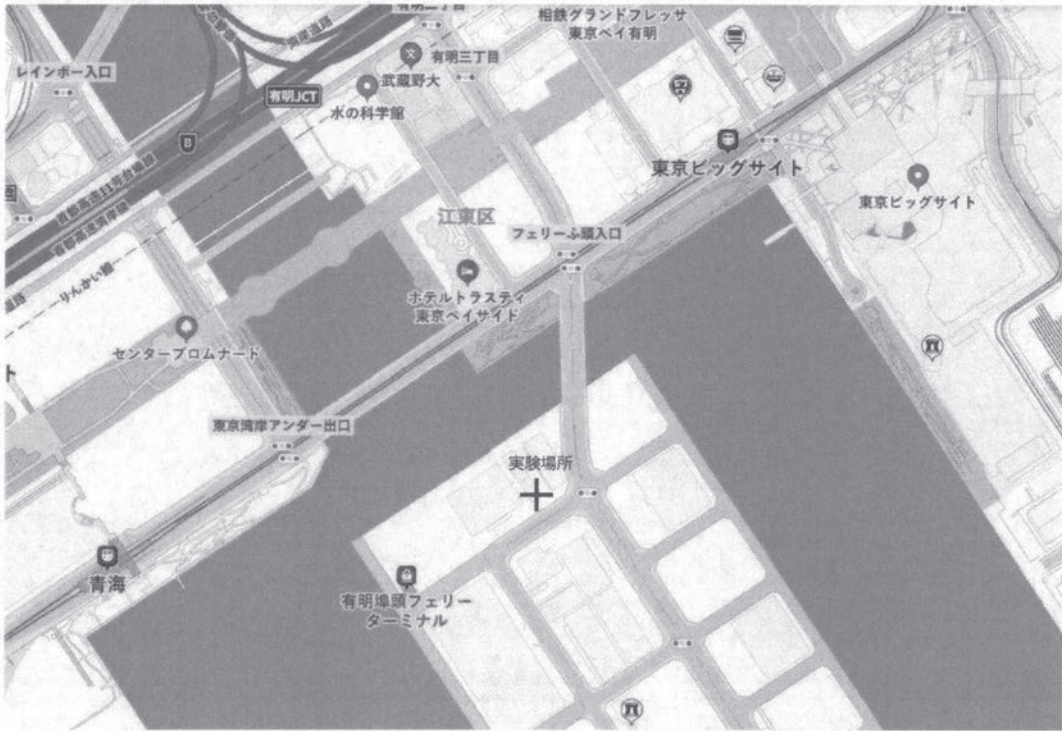
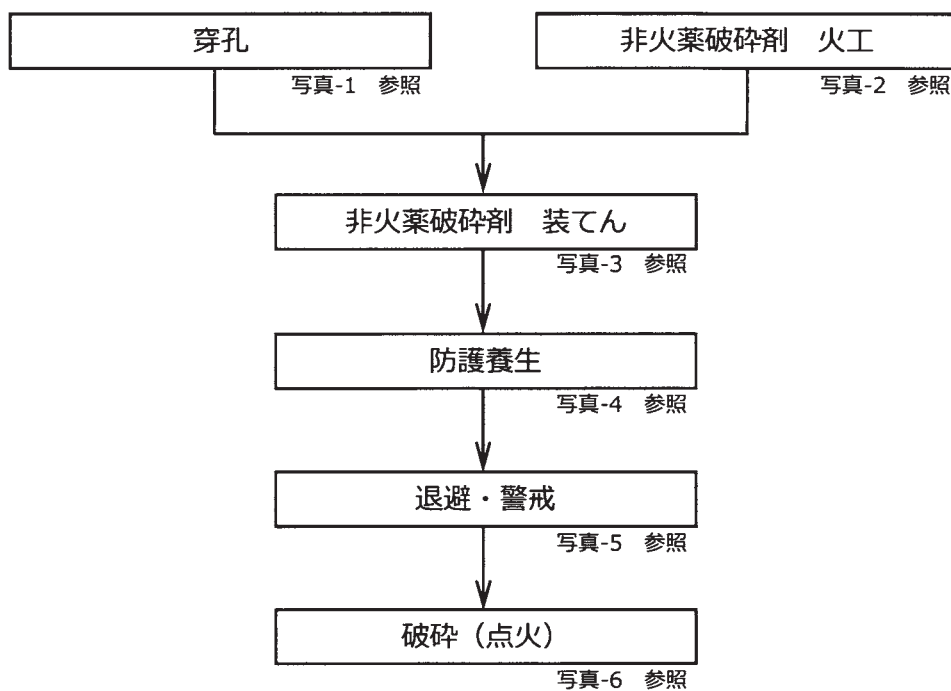


図-1 実証実験場所（イノエンタープライズ有明倉庫解体工事）

非火薬破砕剤を用いた破砕工法の作業手順を以下に示す。



作業の様子を写真-1～6 に示す。



写真-1 穿孔

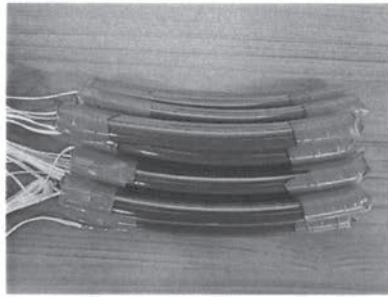


写真-2 非火薬破砕剤 火工
(ビニールチューブへ詰替え)



写真-3 非火薬破砕剤 装てん



写真-4 防護養生



写真-5 退避・警戒

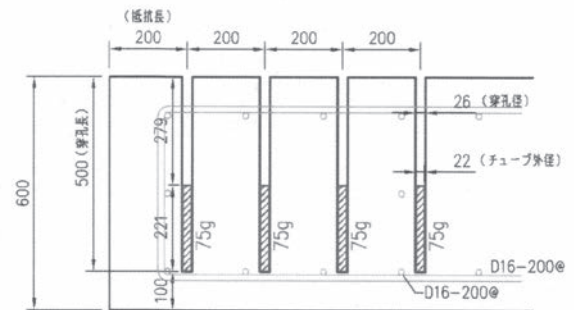


写真-6 破砕 (点火)

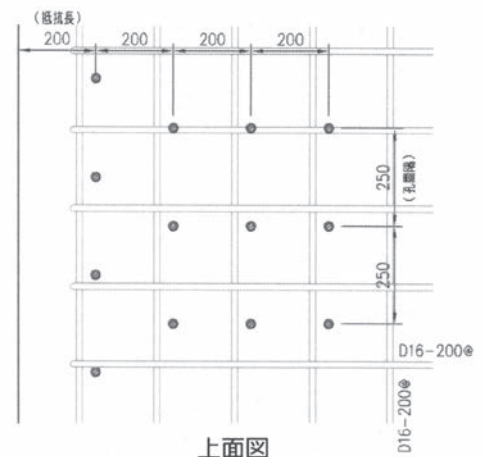
本実験において、最も良好な破砕結果が得られた非火薬破砕剤の装てんパターンを表-2 及び 図-2 に、また、破砕結果を次頁の写真-7～12 に示す。

表-2 非火薬破砕剤の装てんパターン

破砕係数	2.5 kg/m ³
孔数	13 孔
穿孔径	26 mm
孔間隔 (抵抗長)	200 mm
孔間隔	250 mm
穿孔長	500 mm
孔当たりの装てん量	75 g
ビニールチューブの径	外径 22×内径 18mm



断面図



上面図

図-2 非火薬破砕剤の装てんパターン

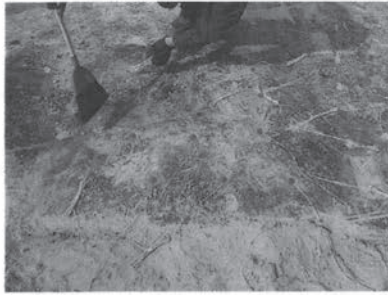


写真-7 孔配置 (13 孔)



写真-8 破碎状況



写真-9 破碎状況



写真-10 破碎状況



写真-11 破碎状況
(側面土砂撤去後)



写真-12 破碎状況
(下面空洞より)

非火薬破碎剤の装てんパターンを検討するに当たり、破碎体積当たりの非火薬破碎剤の装てん量 (kg/m^3)、いわゆる破碎係数が重要なファクターとなる。設定した破碎係数 (kg/m^3) をもとにロックラックの装てん量、孔間隔のバランスを検討したのち、孔中における、ロックラックの長さ、及びタンピング (込め物) の長さのバランスをみながら、ロックラックを詰め替えるビニールチューブの径を選定し、このチューブ径に適するドリルビット径で穿孔した。

表-2、図-2 の破碎係数 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ に設定したパターンで破碎したところ、上面、側面ともに鉄筋かぶり部分のコンクリートは完全に剥離した (写真-8、9)。特に側面側の剥離は激しく、鉄筋の外へ飛び出したコンクリート破砕片もあった (写真-11)。側面の土砂は大きく盛り上がり、破碎威力が強力であったことが伺える (写真-10)。破碎後にはコンクリート基礎の下側が空洞になっていることが判明し、この空洞から下面の破碎状況を調べたところ、下面も鉄筋かぶり部分が完全に剥離し、鉄筋内側のコンクリートも破砕されていることを確認した (写真-12)。

破碎係数を 2.5 から $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ に低く設定したところ、十分な破碎結果が得られなかったことから、今回のコンクリート基礎の破碎には $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の破碎係数が必要であると考えられる。

非火薬破碎剤は、コンクリートを粉々に破碎するまでの威力はなく、やや大柄に破碎される傾向がみられた。この破碎のあと、重機等による二次破碎、ガラ撤去と作業は続いていくが、一次破碎としては十分な破碎結果が得られたと考えている。

この 13 孔の破碎パターンの破碎数量は 0.39m^3 (孔間隔 $0.25\text{m} \times 0.2\text{m} \times$ 高さ $0.6\text{m} \times 13$ 孔) であるが、効率の良い破碎を目指すためには、孔間隔を如何に広げ、これに伴って孔当たりの装てん量を増やすことで、1 回の破碎 (点火) 当たりの破碎数量 (m^3) 増加が見込めるかが重要になってくる。破碎数量アップを目指した破碎パターンの改善は今後の課題としたい。

4. 作業性について

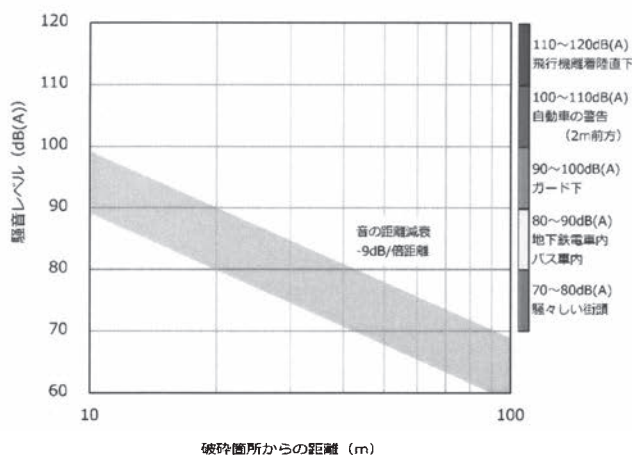
写真-1~6 に作業の様子を示したが、これらの作業の中で、労働負荷が比較的大きいと思われ

るものに電動ハンマドリルによる穿孔作業があげられる(写真-7)。使用した電動ハンマドリル(消費電力 1,100W)の重量は 7kg 程度であり、長さ 500mm の孔を穿孔するのにひと孔 5 分程度の時間を要し、1 回の破碎(点火) 13 孔で 1 時間ちょっとの作業時間を要した。大型機械に頼らないで、コンクリートを人力で破碎するものにハツリ作業があるが、重量 20~30kg のハンドブレーカーを長時間にわたり取り扱うハツリ作業と比べると作業員の労働負荷は遥かに小さく、ハツリ作業員のように極めて強い騒音、振動、粉塵に暴露されることもない。

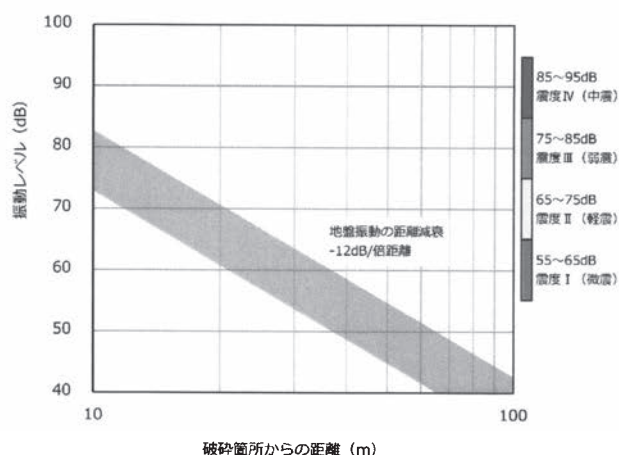
非火薬破碎剤を用いた破碎工法は、労働負荷がとりわけ大きい作業はなく、3K の「キツイ」と呼ばれる作業に該当するようなものではない。本工法は、体力が激しく消耗されるような「キツイ」ものではなく、丁寧で正確な作業が求められる工法であると言える。

5. 環境性－騒音・振動について

非火薬破碎剤を用いた破碎工法は、発破工法と同様に一瞬ではあるが、破碎(点火)時に騒音と振動が発生し、環境問題として配慮しなければならないため、破碎(点火)時における騒音レベル、振動レベルを測定し、その影響の程度について調査した。測定結果をグラフ化したものをグラフ-1、2 に示す。



グラフ-1 騒音レベル測定結果



グラフ-2 振動レベル測定結果

破碎箇所から 10m 程度離れた地点で 100dB(A)に近い音が発生している。これは「自動車の警告(2m 前方)」や「ガード下」の音に相当する大きさである。近隣に物流倉庫が建ち並び、大型トラックの交通量の多い、今回の解体工事現場の周辺環境においては問題になるレベルの音ではないと考えられるが、住宅が建ち並ぶようなエリアでは十分な配慮が必要であると思われる。

振動に関しては、同じく 10m 程度離れた地点で一瞬ではあるが 80dB ほどの振動が発生している。これは震度Ⅲ(弱震)に相当する揺れであるが、瞬間的な振動であるため、心理的、生理的な影響はほぼないと思われる。木造構造物や鉄筋コンクリート構造物に対しては被害が発生するほどの振動ではない。

大型ブレーカーによる重機解体が連続的に大きな騒音、振動を発生するのに対し、非火薬破碎剤は騒音、振動が一瞬で済むことは、周辺環境に対する大きなメリットになり得ると考えられる。

6. 環境性－CO₂排出量について

環境性については、騒音、振動による周辺への影響のほか、CO₂排出量も調査の対象とした。2020年10月の日本政府による「2020年カーボンニュートラル」宣言を受け、建設業界でも脱炭素化は重要課題となっており、建設業界は各社で様々な取組みを推進している。解体業界も例外でなく、脱炭素化社会の実現に向けて取り組んでいかなければならない。そこで、非火薬破砕剤を用いた破砕工法によるCO₂排出量を調査し、脱炭素化に貢献する工法になり得るか、その可能性について考察してみた。

非火薬破砕剤を用いた破砕工法の場合、CO₂を排出する動力源としては、穿孔作業時に使用する、電動ハンマドリル（穿孔用）とブロワ（孔内清掃用）を稼働させるための電力があげられる。今回の実験では解体工事現場詰所のコンセントから電気を供給していただくことが出来、このコンセントにワットモニターを差し込み、作業に要した積算電気量（単位：kWh）を読み取った。ワットモニターはコンセントに差し込むだけで消費電力（単位：W）や積算電気量（単位：kWh）がチェックできる機器である。ワットモニター使用時の様子を写真-13、14に示す。



写真-13 電動ハンマドリルによる穿孔
ブロワによる孔内清掃



写真-14 ワットモニター

実験中、調査対象とした3回の破砕（点火）の穿孔作業（穿孔長500mm×39孔、約3時間の作業）によって消費した積算電気量をワットモニターで読み取ったところ、合計で1.79kWh、この電力消費で排出したCO₂は0.673kg-CO₂（電気のCO₂排出係数：0.376kg-CO₂/kWh）であった。

仮に、建設機械を稼働させた場合、同量の0.673kg-CO₂のCO₂を排出するには0.26ℓ（軽油のCO₂排出係数：2.58kg-CO₂/ℓ）の軽油を消費することになる。ここで、0.26ℓの軽油で建設機械がどれほどの作業が出来るのか、2例ほど写真-15、16にあげてみた。



写真-15 0.637kg-CO₂排出の作業
30HPクラスのコンプレッサー
6分間のハツリ作業



写真-16 0.637kg-CO₂排出の作業
0.15m³クラスのバックホー
3.7分間のハツリ作業

写真-13、15、16の3つの異なる作業を単純に比較することは出来ないが、6分間や3.7分間の

ハツリ作業がどれほどの作業量もこなすことが出来ないことは容易に予想できる。

建設業では建設機械による CO₂排出量が最も多く、CO₂排出量を効率的に削減するには建設機械の稼働（軽油消費量）を少なくすることが考えられる。非火薬破碎剤を用いた破碎工法は、電動工具で対応可能な工法であり、この工法による一次破碎でコンクリートを如何に効率よく破碎させ、この後に続く二次破碎に要する建設機械の稼働（軽油消費量）をどれだけ削減することが出来るかが、コンクリート解体における CO₂排出量を減らす必要な鍵になってくると思われる。

7. 安全性－飛散物対策について

解体工事は「墜落・転落」、「崩壊・倒壊」等々、様々な型の事故が発生するおそれがあるが、非火薬破碎剤を用いた破碎工法を適用するに当たり、事故発生が最も心配されるのは「飛来落下」の型に分類される、破砕片（ガラ）の飛散物発生による事故であると思われる。今回の実験においては、現場内の作業員の安全はもとより、現場周辺に建ち並ぶ倉庫建物やその敷地内へ危害を及ぼさぬよう、破碎箇所からの破砕片（ガラ）の飛散物発生には細心の注意を払いながら実験を進めなければならなかった。

このため、破碎箇所の防護対策には、5種類もの防護材を用意し、破碎箇所に6重にも被せて（ゴムマット → 防爆シート → 高耐久ポリエステルネット → 防爆シート → ワイヤーマット → 防音シートの順）防護した（写真-17, 18）。なお、防護材は作業員の労働負荷を考慮し、出来るだけ軽量で取り扱いやすい材料を選定した。更にはこれら防護材が点火時の爆風で吹き飛ばされないよう、防護材の上にスクラップの入ったトンバッグを載せ、防護材の裾には土のうを載せた（写真 19）。



写真-17 (3重目)
高耐久ポリエステルネット



写真-18 (5重目) ワイヤーマット



写真-19 トンバッグ、土のう

6重もの防護材、その上にはトンバッグを載せた、やや過剰なまでの防護対策のお陰で、破碎箇所から破砕片（ガラ）が飛散することはなかったが、当然のことながら、防護作業の効率は低下してしまった。

そこで、効率的な防護方法の確立を目指して、この解体工事現場とは別に、採石場跡地を新たな実験現場として、破砕片（ガラ）の飛散が許容される状況のもと、防護対策に関する実験を行った。実験は、出来るだけ簡素化した防護対策で破碎（点火）を行った際における、破砕片（ガラ）の発生状況を調査した。

採石場跡地に残置されたコンクリート基礎（上部のプラントは設備は撤去済み）を破碎対象物とした（写真-20、21）。



写真-20 採石場跡地

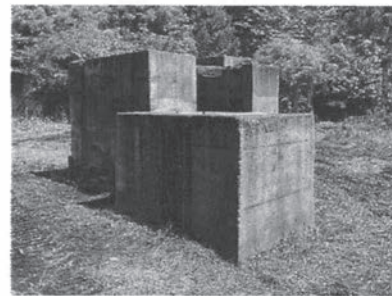


写真-21 コンクリート基礎

非火薬破碎剤の装てんパターンは、防護対策がなければ、破碎片（ガラ）が勢いよく飛散すると予測できるパターンとし、防護材は防爆シートと高耐久ポリエステルネットの2種類のみを使用し、これを防爆シート → 高耐久ポリエステルネット → 防爆シート の順に3重に被せたのみとした（写真-22、23、24）。また、これら防護材が爆風によって捲れるのを防ぐため、アンカーボルトを破碎対象物であるコンクリート基礎に打ち込み、これに3重目に被せた防爆シートの縁にあるハトメを固定した（写真-25、26）。



写真-22 (1重目) 防爆シート



写真-23 (2重目)
高耐久ポリエステルネット



写真-24 (3重目) 防爆シート



写真-25、26 アンカーボルトによる捲れ防止



破碎（点火）の瞬間における防護材の動きを次頁の写真-27、28、29に、破碎片（ガラ）の状況を写真-30、31に示す。激しく飛散しようとする破碎片（ガラ）を、防護材が大きく膨らむことで上手く包み込むカタチとなり、破碎片（ガラ）が防護材の外へ飛び出すことはなかった。防護材の中で大きささまざまな大きさの破碎片（ガラ）が閉じ込められており、小さい破碎片（ガラ）は防爆シートで受け止められることが出来るが、大きな破碎片（ガラ）による局所的、かつ大きな衝撃に対しては高耐久ポリエステルネットで分散させることにより、3重目に被せた防爆シートで受け止めることが出来たと考えられる。また、アンカーボルトもしっかりと効いており、防

護材の裾が捲れ上がることもなかった。



写真-27、28、29 破碎（点火）の瞬間における防護材の動き



写真-30, 31 防護材取り外し後の破碎片（ガラ）の状況

高耐久ポリエステルネットは、東レ・モノフィラメント（株）製で、軽量（ 0.56kg/m^2 ）ながら十分な引張強度（ 290N/mm^2 以上）を持ち、落石対策や河川整備などに活用されているものである。これらの特性に合わせて、破碎（点火）時の衝撃にも著しい変形が生じることなく、繰り返し使用が可能である、と期待できたことから、先の解体工事現場での実験、採石場跡地での実験に新しい防護材として使用した。これらの実験を通して、高耐久ポリエステルネットに破断や著しい変形が生じることがなく、期待どおりの防護性能を有していると考えられ、今後も様々な破碎シーンで強力な防護材として使用できると考えている。

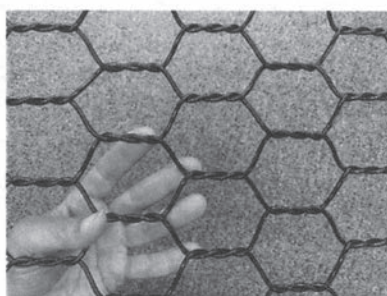


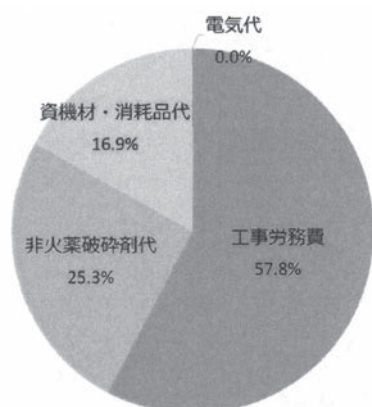
写真-32, 33 高耐久ポリエステルネット（素線線径：3mm）

8. 経済性について

解体工事現場実験に要した費用内訳の項目ごとの比率を次頁のグラフ-3 に示す。内訳の項目は大きく分類し、1) 工事労務費、2) 非火薬破碎剤代、3) 資機材・消耗品代、4) 電気代 とした。

グラフ-3 より、実験に要した費用のうち、工事労務費が最も多く 58%を占めており、非火薬破碎剤を用いた破碎工法は発破工法と同様に、人力に頼る作業が多いこともあり、工事労務費がどうしても多くなってしまいう傾向がある。

一方、建設機械を使用しないため、軽油等の燃料を必要としない。その代わりに、電動工具（電動ハンマードリル、ブロワ）を稼働させるための動力源が電気であり、その電気料金は比率として0.1%にも満たなかった。



項目	内容
1) 工事労務費	・工事労務費
2) 非火薬破碎剤代	・非火薬破碎剤
3) 資機材・消耗品代	・電動ハンマードリル ・ビット ・防護材 ・その他
4) 電気代	・電気使用料

グラフ-3 実験に要した費用内訳

非火薬破碎剤を用いた破碎工法は工事労務費に加えて、非火薬破碎剤の費用、穿孔機材や防護材料等の資機材費も欠くことが出来ず、コストを削減することはなかなか難しいが、施工業者の改善、努力に依るコスト対策として、以下のことを検討していきたい。

- 1) 孔数を少なくすること、孔間隔を広くすること、孔当たりの薬量を増やすこと 等々、破碎パターンを改善する。こうすることで、1回の破碎（点火）当たりの破碎数量をアップさせることでトータルの破碎（点火）回数を減らし、作業効率アップを図りたい。
- 2) 作業の自動化による工事労務費の削減を図る。完全な自動化は難しいが、例えば、穿孔作業や非火薬破碎剤の装てん作業を自動化、あるいは半自動化することで省力化を目指す。

9. まとめ

今回の実験では非火薬破碎剤（ロックラック）を解体工事現場で適用した破碎作業の事例を得た。コンクリートがやや大柄に破碎される傾向があるものの、コンクリートの一次破碎としては十分な破碎効果が得られることを確認した。また、簡素でありながら効果的な防護対策を検討し、脱炭素化に向けて有効な工法になり得ることを確認した。

解体工事において現場周辺の環境や、大型重機の搬入規制、等々の現場条件に合わせて適用することが可能な工法であるが、騒音・振動の環境性、経済性など解決すべき点も残されており、更なる改善、検討を進めていきたい。

< 謝 辞 >

解体工事現場で実験を実施するに当たり、工藤解体株式会社、大豊アーキテクノ株式会社、有限会社今村工業に、また、採石場跡地で実験を実施するに当たり、有限会社大串銃砲火薬店、田沢工業株式会社にご協力をいただきました。非火薬破碎剤に関してカヤク・ジャパン株式会社にも多くの助言をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

解体工事から発生する建設廃棄物の排出量に関する全国調査

明治大学理工学部
小山明男

Key-word: 解体工事, 特定建設資材廃棄物, 廃棄物発生量原単位, 建物用途, 構造種別

1. はじめに

解体工事を受注した解体工事業者は廃棄物の発生見込み量を算出し、各自治体に報告することが義務付けられている¹⁾。これは適正な廃棄物処理費用や運搬費用を見積もる際に極めて重要である。環境面からみても、運搬時のトラックを適切な台数で確保することによるCO₂排出量の削減や、廃棄物の不法投棄の防止等に繋がることが考えられる。

しかしながら、この廃棄物発生見込み量を算出する際に用いる延べ床面積当たりの廃棄物発生量原単位は、同じ建物の解体工事を行う場合でも、解体工事業者により異なる。これは各社が実施した解体工事建物の構造種別や用途あるいは地域が異なるためと考えられる。そこで、本研究では各社が用いている解体工事における廃棄物発生量原単位について、工事を行う建物の構造種別毎と建物の用途毎などによる違いを明確にすることを目的にアンケート調査を実施した。

2. 調査概要

全国の解体工事業者 39 社を対象として、受注している解体工事に関する下記の調査を行った。

2.1 回答企業の属性に関する調査

表 1 に示す項目で各社の属性に関する調査を行った。

2.2 受注している解体工事の種別に関する調査

表 2 に示す項目で各社が受注している解体工事の種別に関する調査を行った。

2.3 特定建設資材廃棄物の廃棄物発生見込み量原単位に関する調査

表 3 に示す項目で各社の取り扱っている廃棄物発生見込み量原単位のうち、特定建設資材廃棄物についての調査を行った。

2.4 特定建設資材廃棄物以外の廃棄物発生見込み量原単位に関する調査

表 4 に示す項目で各社の取り扱っている廃棄物発生見込み量原単位のうち、特定建設資材廃棄物以外の廃棄物についての調査を行った。

3. 調査結果および考察

3.1 回答企業の属性に関する調査結果

図 1 に回答企業の請け負う工事種別に関する調査結果、表 5 に回答企業の所在地の内訳を示す。図 1 より、回答企業の受注している工事のほとんどは民間工事であった。また、表 5 より今回の調査の回答企業の所在地は東日本を中心に分布しているということが分かる。

表 1 回答企業の属性に関する調査の概要

	調査内容
1	企業の資本金の金額
2	解体工事の年間受注額
3	従業員数
4	受注している工事は民間工事が公共工事が

表 2 受注している解体工事の種別に関する調査の概要

	調査内容
1	受注している工事の構造種別
2	受注している工事の主な建物用途
3	解体工事の延床面積の規模について

表 3 特定建設資材廃棄物の廃棄物発生量原単位に関する調査概要

	調査内容
1	構造種別毎の特定建設資材廃棄物の廃棄物発生見込み量原単位
2	建物用途毎に用いる原単位を変更するか
3	用いる原単位を変更する際の建物用途

表 4 特定建設資材廃棄物以外の廃棄物発生量原単位に関する調査概要

	調査内容
1	特定建設資材廃棄物以外の廃棄物発生見込み量を算出しているか
2	廃棄物発生見込み量を算出している廃棄物の種類

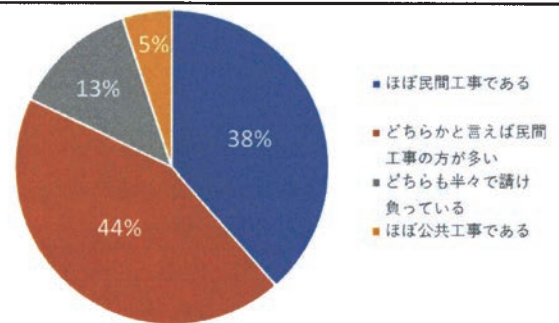


図 1 回答企業の請け負う工事種別

表 5 回答企業の所在地の内訳

地方	企業数
東北	11
関東	15
中部	7
近畿	2
九州	4
合計	39

なお、図には示していないが、資本金と解体工事の受注金額については各項目にバランス良く分布した。従業員数については 30 人以下の企業がほとんどであった。

3.2 特定建設資材廃棄物の発生量見込み原単位の調査結果

図2から図5の箱ひげ図を用いて特定建設資材廃棄物ごとの廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の比較を示す。表6にそれぞれの特定建設資材廃棄物の廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の平均と変動係数の一覧を示す。

コンクリート塊についてはS造以外の構造種別においては各社間のデータの相対的な分散が小さいことが分かった。特にRC造のデータについては、コンクリート塊を多く排出する構造種別のため、各社間でデータの分散が小さくなっていると考えられる。

鉄筋・鉄骨はRC造以外の構造種別において、データの分散が相対的に大きいということが分かった。この結果については、図3をみると1つ明らかに大きな値の原単位を用いている企業があったことが影響している。この値を設定している企業は延べ床面積が5000m²以上の大規模建築物の解体工事を主に請け負っている。そのため、他の企業と比較して用いている原単位が非常に大きくなっていると考えられる。

鉄くずはどの構造種別でもデータの相対的な分散が大きいということが分かった。これは鉄くずという廃棄物の排出量が建具類の量などの細かい廃棄物に大きく左右されることが原因として考えられる。

建設発生木材はRC造以外の構造種別では相対的な散らばりが小さいことが分かった。また、木造とRC造で他社と比較して、大きな値を示しているのは同じ企業である。この企業は解体工事だけでなく、木くずの廃棄物処理業も行っている。そのため、木材の再資源化に力を入れており、このような値となっていると考えられる。

表5 回答企業の各特定建設資材廃棄物廃棄物の廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の平均と変動係数一覧

		木造	S造	RC造	SRC造
コンクリート塊	平均値 (t/m ²)	0.28	0.72	1.12	1.16
	変動係数	0.46	1.67	0.31	0.39
鉄筋・鉄骨	平均値 (t/m ²)	0.03	0.12	0.06	0.17
	変動係数	1.04	1.86	0.50	1.85
鉄くず	平均値 (t/m ²)	0.01	0.07	0.20	0.13
	変動係数	1.74	1.44	1.42	1.64
建設発生木材	平均値 (t/m ²)	0.14	0.04	0.04	0.03
	変動係数	0.65	0.58	1.09	0.57

3.3 建物用途を考慮した場合の廃棄物発生見込み量原単位

図6にRC造の用途として一般的な集合住宅の工事を主に請け負う企業のコンクリート塊の原単位と、前報でも示した全企業のRC造におけるコンク

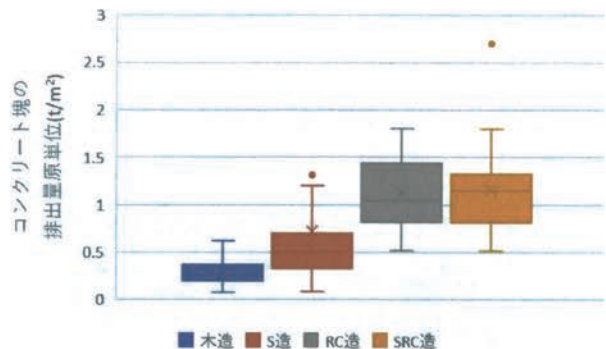


図2 コンクリート塊の廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の比較

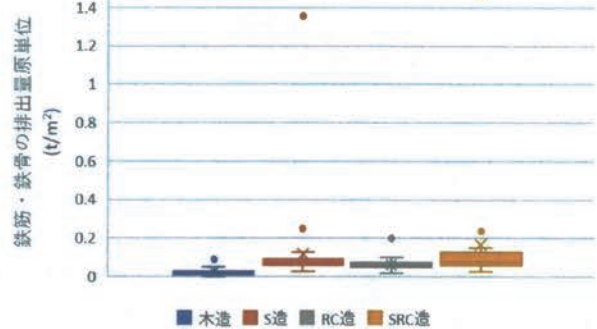


図3 鉄筋・鉄骨の廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の比較

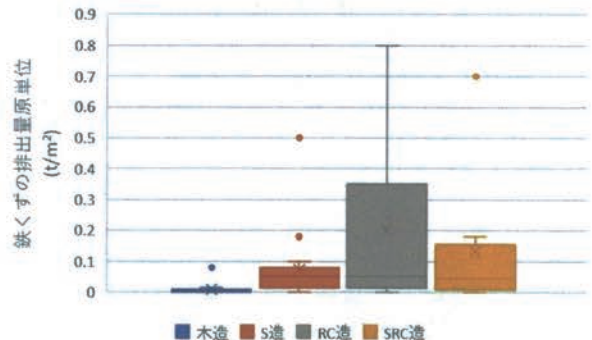


図4 鉄くずの廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の比較

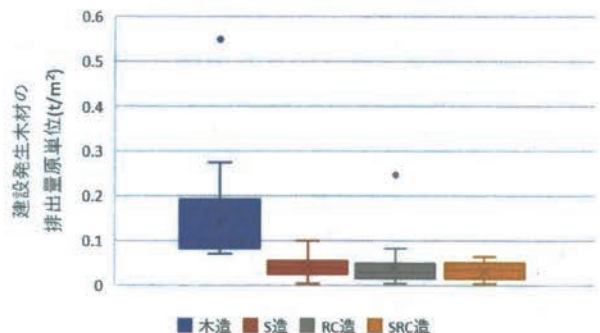


図5 建設発生木材の廃棄物発生見込み量原単位の構造種別毎の比較

リート塊の原単位の比較を示す。図7に木造の用途として一般的な戸建住宅の工事を主に請け負う企業の建設発生木材の原単位と、前報でも示した全企業の木造における建設発生木材の原単位の比較を示す。図6および図7により、それぞれの構造種別において、最も一般的な用途に絞って原単位を算出した場合、データの分散が小さくなることが分かった。

3.4 受注している工事の延床面積を考慮した場合の廃棄物発生量原単位

図8に木造建築物の建設発生木材における、企業が主に請け負う工事の延べ床面積毎の原単位の比較を示す。木造建築物においては、延べ床面積が150m²以下の建物を主に請け負う企業が廃棄物量を小さく見積もっているという結果が得られた。これは図には示していない鉄筋・鉄骨とコンクリート塊についても同様であった。これは木造建築物の主な用途が戸建住宅であることが要因として考えられる。

S造建築物においては、図9に示すようにコンクリート塊においては150m²~5000m²の建物を主に請け負う企業の原単位の分散が小さくなった。しかし、図には示していない鉄筋・鉄骨と建設発生木材については延床面積毎の違いは確認できなかった。

RC造建築物については図には示していないが、鉄筋・鉄骨については1000m²~5000m²の建物を主に請け負う企業の分散が小さくなった。コンクリート塊については違いが見られなかった。これは最も排出が予想される廃棄物であることが要因として考えられる。

3.5 原単位を変更する条件

原単位を変更する条件として、建物用途により、変更すると回答した企業は全39社中20社であった。また、図10に原単位を変更する条件にどのようなものがあるかの回答を示す。これにより、地下の有無は廃棄物発生量に与える影響が大きいと考える企業が多いということが分かった。

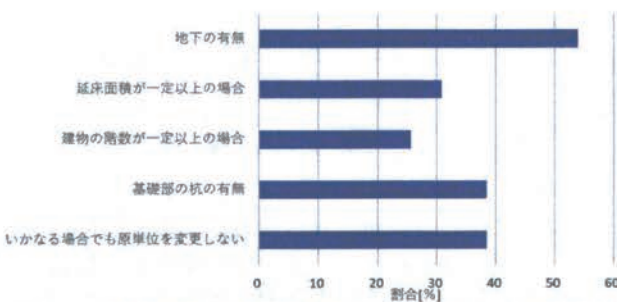


図10 原単位を変更する条件にはどのような条件があるかという設問の回答結果

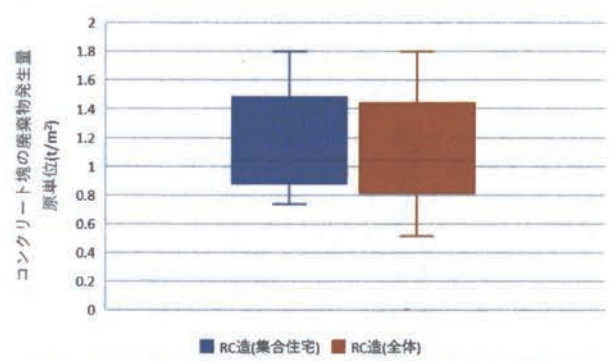


図6 コンクリート塊において、集合住宅を主に請け負う会社のみとRC造建築物全体の原単位の比較

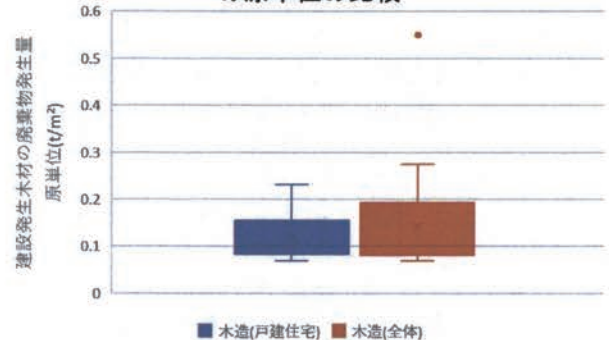


図7 建設発生木材において、戸建住宅を主に請け負う会社のみと木造建築物全体の原単位の比較

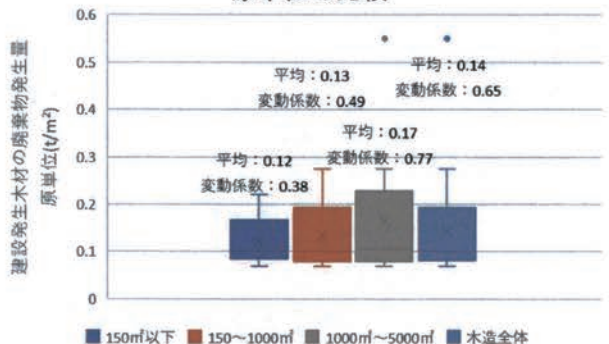


図8 木造建築物の建設発生木材における、企業が主に請け負う工事の延べ床面積毎の原単位の比較

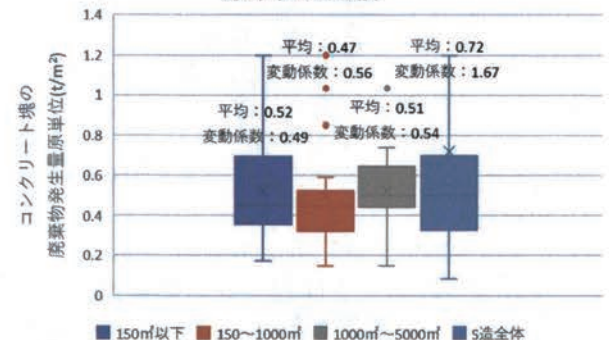


図9 S造建築物のコンクリート塊における、企業が主に請け負う工事の延べ床面積毎の原単位の比較

3.6 特定建設資材廃棄物以外の廃棄物の発生見込み量についての調査結果

特定建設資材廃棄物以外の廃棄物について、廃棄物発生量原単位を所持していると回答した企業は全 39 社中 32 社であった。そして、図 11 に原単位を所持している廃棄物の内訳を示す。石膏ボードや廃プラスチック類など、環境負荷の高い廃棄物については原単位を所持していると回答した企業が多かった。これについては、環境負荷の高い廃棄物は再資源化の可否によって、処分費用が大きく変わってしまうことが原因として考えられる。

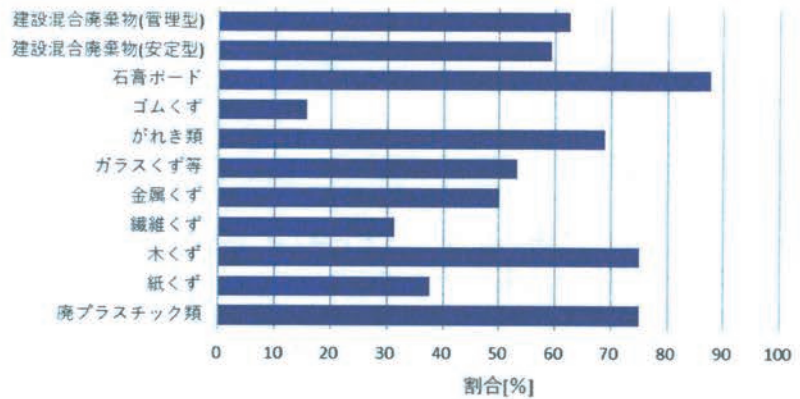


図 11 特定建設資材廃棄物以外の廃棄物について、原単位を算出している企業数の割合

3.7 廃棄物発生見込み量の地域毎の比較

表 6 に木造建築物における廃棄物発生見込み量の企業の地域毎の調査結果を示す。また、図 12 にそのコンクリート塊についての比較を示す。木造建築物については、各廃棄物の廃棄物発生見込み量の平均値に大きな違いは見られなかった。しかし、コンクリート塊と建設発生木材については、関東の分散が他の地方の分散と比較して、大きくなるという結果となった。これについては、地方の方が地域の全建物中の木造建築物の割合が高いために、各社間でデータの分散が小さくなると考えられる。

表 6 木造建築物の廃棄物発生見込み量の地域毎の調査結果

		東北	関東	中部	全体
コンクリート塊	平均値 (t/m ²)	0.28	0.28	0.29	0.28
	変動係数	0.26	0.54	0.32	0.46
	データの数	8	12	9	34
鉄筋・鉄骨	平均値 (t/m ²)	0.03	0.02	0.02	0.02
	変動係数	0.94	0.90	0.87	1.09
	データの数	5	7	6	21
建設発生木材	平均値 (t/m ²)	0.13	0.16	0.13	0.14
	変動係数	0.52	0.81	0.38	0.65
	データの数	8	12	9	34

4. まとめ

本研究をまとめると、大要以下のことがいえる。

- ・コンクリート塊の原単位については、S 造以外の構造種別で相対的な分散が小さい。特に RC 造については、コンクリート塊を多く排出する構造種別のため、各社間のデータの分散が小さくなっていると考えられる。
- ・鉄筋・鉄骨の原単位については他社と比較して、大きな値を取る企業があったため、S 造における廃棄物発生量原単位の変動係数は大きくなった。
- ・建設発生木材の原単位についても、鉄筋・鉄骨の原単位と同様に他社と比較して大きな値を取る企業が、変動係数に影響を与えた。
- ・一般的な建物用途の工事を請け負う企業に絞って原単位を収集することで、よりデータの分散は小さくなると考えられる。
- ・地下の有無は廃棄物発生量に大きな影響を与えると考えられる。
- ・特定建設資材廃棄物以外の廃棄物についても、特定建設資材廃棄物と同様に廃棄物発生見込み量を算出している企業は多い。
- ・木造建築物については、地域によって企業が設定している廃棄物発生見込み量に違いがあることが分かった。

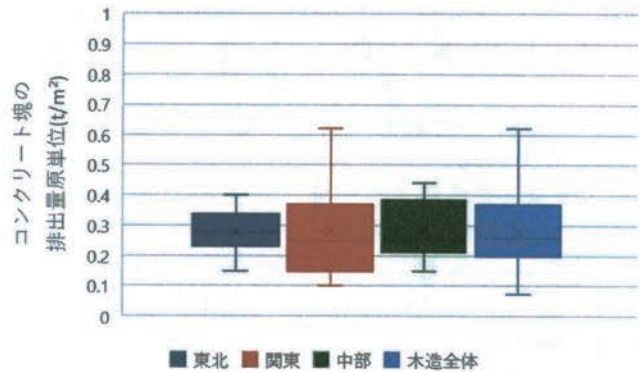


図 12 木造建築物における、コンクリート塊の廃棄物発生量原単位の地域毎による比較

【参考文献】

1)国土交通省：建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律

URL:リサイクル：建設リサイクル推進計画・国土交通省 (mlit.go.jp) (参照 2024.06.20)

【謝辞】

本研究は、公益社団法人全国解体工事業団体連合会の「解体工事業に係る調査・研究助成金」を受けて実施しました。また、本研究の実施にあたり、明治大学建築材料研究室の学生諸氏には多大なる協力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

研究課題：解体工事の環境性評価に関する研究

申請者：道正 泰弘*

1. はじめに

戦後高度成長期に建設された社会インフラは、経年劣化の進行により再構築が必要な時期を向かえており、それに伴い既存施設の解体工事が増加してきている。2002 年には建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法)が完全施行され、建設副産物の分別解体と再資源化が義務付けられた。また、2014 年の建設業法の改正により、2016 年に「解体工事業」が新設された。これらの状況から、日本建築学会は 2024 年に「建築物の解体工事施工指針(案)・同解説(鉄筋コンクリート造編・鉄骨造編)」(指針案)¹⁾を刊行した。一方、日本建築学会「建物の LCA 指針」²⁾では、ISO21930:2017³⁾の資材製造、施工、使用、解体、補足情報の各プロセスの分類に準じて、評価対象となる建築物のライフサイクル評価は、資材生産、建設(施工)、運用(使用)、修繕・更新、解体・廃棄物処理の各プロセスに分類して評価を行っている。このため、解体工事は建築物のライフサイクルを構成するプロセスの一つとして、循環型社会の構築のための重要な要素となる。また、近年は超高層建築物や高層建築物の解体工事の増加により、環境配慮型の解体工法が求められている^{例えば 4)}。建築物のライフサイクルのうち、建設、運用(使用)、修繕・更新に関しては要求性能が明確であり、経済性、工期、安全性等の評価方法も確立されている。一方、解体工事は、建築物あるいは構造物といった成果物がないという点が他の工事と大きく異なるため、その要求性能に対応した評価方法の確立が必要となる。なお、成果物がないということは、社会やクライアントからの要請がないことを意味することではなく、発注者、施工者の合意のもとに達成すべき性能を設定し、法令等に規定された最低限を超える解体工事を目指すのが望ましいと考えられる。

本研究は、建築物のライフサイクルの構成要素である解体工事の性能評価手法の確立を目的に検討を行った。

2. 解体工事における要求性能

解体工事は、本質的に構造物の安定性を損なう状況が発生する作業であり、安全性の確保が難しい工事の一つである。実際、解体工事における労働死亡災害は、建設業全体の 8~14%を占めており¹⁾、労働安全性の確保が重要な課題である。また、通行人の死傷、鉄道の運休等の重大な公衆災害も報告されており¹⁾、公衆安全性の確保も解体工事に求められる重要な性能の一つである。さらに、解体工事では、建築物に投入された材料・資材が撤去・破砕され、排出されるため、必然的に大きなエネルギー投入と大量の副産物が排出される。そこで、周辺環境に公害等で影響を及ぼさないこと(環境安全性)や排出される資源を適切に再資源化し、処理すること(資源循環性)も求められる。これらの安全性能、環境性能の確保にあたっては、合理的で適正な価格を設定して発注することや適切な工期を設定すること等が必要となる。このため、解体工事に係る関係者(発注者・施工者:元請負業者、下請負人、廃棄物処理・処分業者等)は、それぞれの役割と責務を果たすことが重要である。

解体工事の要求性能は、図 1 に示すように、地球環境全体への影響を解体工事のシステム境界として地球(人間活動)の中に、①解体工事現場(施工者)を中心に、関係する②解体工事の発注組織(発注者)、③解体工事現場の近隣等(住民等)、④廃棄物の運搬(収集運搬業者)、⑤廃棄物の中間処理場(中間処理業者)、⑥廃棄物の最終処分場(最終処分業者)、⑦行政(監督官庁等)の 7 つのステークホルダーに分類した^{注 1)}。また、これらのステークホルダー間の流れはベクトルで示してい

*名城大学理工学部環境創造工学科 教授 博士 (工学)

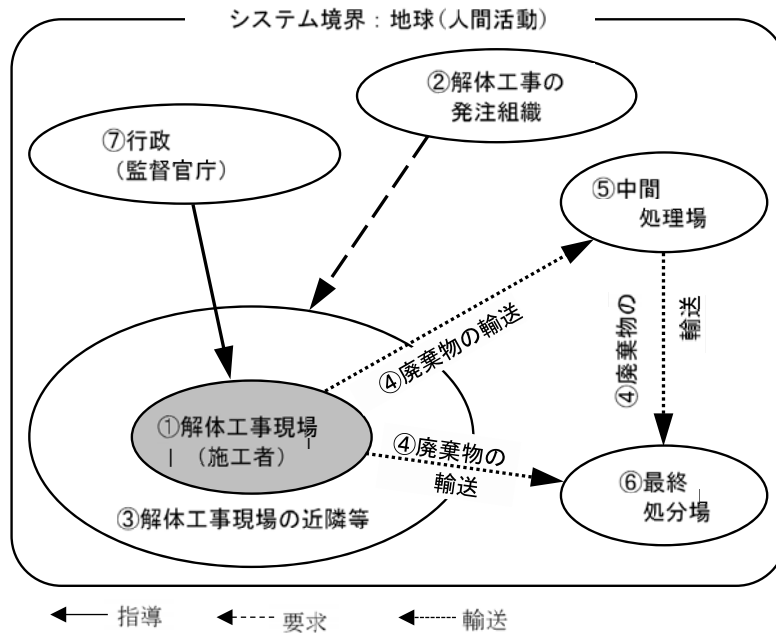


図1 解体工事のシステム境界とステークホルダー

るが、それぞれの関係性は「指導」、「要求」、「輸送」とした。解体工事の要求性能を表1に示す。なお、法規制、近隣からの要求も要求性能の一部とした。これらを経済性(C)、安全性(S)、環境性(E)の3つの評価項目に分類して整理した。工期確保、工期短縮は経済性に含めることとした。

3. 解体工事の評価指標

解体工事の評価指標の設定とその妥当性を確認した。なお、ここで示す解体工法とは、使用機械自体を示す場合もある。

3.1 評価指標の設定

本検討で設定した解体工法の評価指標を図2に示す。この評価指標に基づき定量的評価を行った。具体的には、経済性指標(T_C)、安全性指標(T_S)、環境性指標(T_E)による3つの評価指標およびこれらの評価指標から3次元座標軸上のベクトル成分として総合評価指標(T)を設定し、値が大きいほど優れていることとした。

(1) 経済性

T_C は、解体工事費として式(1)により算定した。算定の範囲は、図3に示す解体工事費の構成のうち、実際の工事で明確になっている直接解体費(労務費、機械・器具費)に限定した^{註2)}。ただし、機械・器具費は、機械損料と燃料費により構成される。なお、廃棄物処理費については解体工法の影響はないものとした。本検討においては、労務費は公共工事設計労務単価⁵⁾により、機械・器具費の機械損料は日本建築機械施工協会の資料⁶⁾に基づき算定した。表2に本検討で用いた使用機械の機械・器具費を示す。燃料費は、燃料の単価^{7,8)}と燃料消費量を乗じて算定した。表3に燃料の単価およびCO₂原単位を示す。なお、燃料の単価は東京都の単価を用いた。表4に本検討で用いた使用機械の時間当たりの燃料消費率を示す。

$$T_C = \sum C_i / C_i \quad (1)$$

ここに、 T_C ：経済性指標

C_i ：各種解体工法を用いた場合の費用(円)*

*労務費、機械・器具費(機械損料、燃料費)の合計

$\sum C_i$ ：各種解体工法の費用の総和(円)

(2) 安全性

T_S は式(2)により算定した。この式はISO Guide 73: 2009⁹⁾の考え方にに基づき作成した。

表1 解体工事の要求性能

区分	要求性能	評価項目	記号*1
システム境界			
地球(人間活動)	<ul style="list-style-type: none"> ・CO₂等の地球温暖化ガスの発生抑制されること ・解体工事の用途で多量の資材を投入しないこと ・分別解体, 再資源化による資源の有効活用を図ること 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境性 ・経済性 ・環境性 	<p>E</p> <p>C</p> <p>E</p>
ステークホルダー			
① 解体工事現場 (施工者*2)	<ul style="list-style-type: none"> ・適正な工期を確保すること ・経済的な施工を行うこと ・安全性が高い対策を講じること ・適正な予算を組みむこと ・環境保全(公害対策等)が適切であること. ・廃棄物に対して適切な処理を行うこと ・危険物・有害物に対して適切な処理を行うこと ・現場と中間処理場, 最終処分場間の距離が近いこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・工期確保 →経済性 ・経済性 ・安全性 ・経済性 ・安全性 ・環境性 ・環境性 ・経済性 	<p>C</p> <p>C</p> <p>S</p> <p>C</p> <p>S</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>C</p>
② 解体工事の発注組織(発注者)	<ul style="list-style-type: none"> ・合理的で適正な価格を設定し, 発注すること ・適正な契約を行うこと ・適切な工期を設定すること ・既存構造物の一部を有効活用できること 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性 ・経済性, 安全性, 環境性 ・工期短縮 →経済性 ・経済性 	<p>C</p> <p>C</p> <p>S</p> <p>E</p> <p>C</p> <p>C</p>
③ 解体工事現場の近隣(住民等)	<ul style="list-style-type: none"> ・騒音が発生しないこと ・振動が発生しないこと ・粉塵が発生しないこと ・大気汚染が生じないこと ・湖沼, 河川, 地下水等の水質汚濁を生じないこと ・地盤沈下を発生させないこと ・解体コンクリート塊の飛散や飛来落下がないこと ・場外出入車輛や駐車車輛等による交通渋滞の回避と交通安全性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境性 ・環境性 ・環境性 ・環境性 ・環境性 ・環境性 ・環境性 ・安全性 ・安全性 	<p>E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>S</p> <p>S</p>
④ 廃棄物の運搬(収集輸送業者)	<ul style="list-style-type: none"> ・輸送物の重量が法規制の範囲内であること ・輸送物の大きさが法規制の範囲内であること 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性 ・経済性 	<p>C</p> <p>C</p>
⑤ 中間処理場(中間処理業者)	<ul style="list-style-type: none"> ・搬入された解体廃棄物が処理しやすいこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性 	<p>C</p>
⑥ 最終処分場(最終処分業者)	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物の量が十分減容化されていること 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性 	<p>C</p>
⑦ 行政(監督官庁等)	<ul style="list-style-type: none"> ・道路の占有や歩道防護, ガードレール, 交通標識等の撤去を回避できること ・電線や電柱の移動がないこと ・危険物を取り扱わないこと ・解体工事中に, 架線の切断, ガス管・水道管の切損, 電話線の切断等がないこと ・軌道の近くでの解体工事がないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性 ・経済性 ・安全性 ・安全性 ・安全性 	<p>C</p> <p>C</p> <p>S</p> <p>S</p> <p>S</p>

*1 C:経済性, S:安全性, E:環境性 *2:元請負人, 下請負人を含む.

$$T_s = \sum R_i / R_i \quad (2)$$

ここに, T_s : 安全性指標

R_i : 各種解体工法を用いた場合の危険度

$\sum R_i$: 各種解体工法の危険度の総和

危険度 R_i は、厚生労働省の令和4年の労働災害統計¹⁰⁾から死傷事故の発生確率を用いて式(3)により算定した。表5に各種使用機械の事故の型別における死傷事故の発生確率を示す。なお、事故の型別は、参考文献¹¹⁾の災害事例から選定した。ただし、労働災害の発生は、現場の状況等によって大きく異なることから、本検討ではあくまで想定できる災害を示すのに止めた。実際の工事においては、その都度、安全計画書等に基づき検討する必要がある。

$$R_i = \sum(X_n \times P_n / 100) \quad (3)$$

ここに、 R_i : 危険度

X_n : 事故の型別における被災する可能性を有する作業に従事する作業員数(人)

P_n : 各種使用機械の事故の型別における死傷事故の発生確率(%)で式(4)により算定

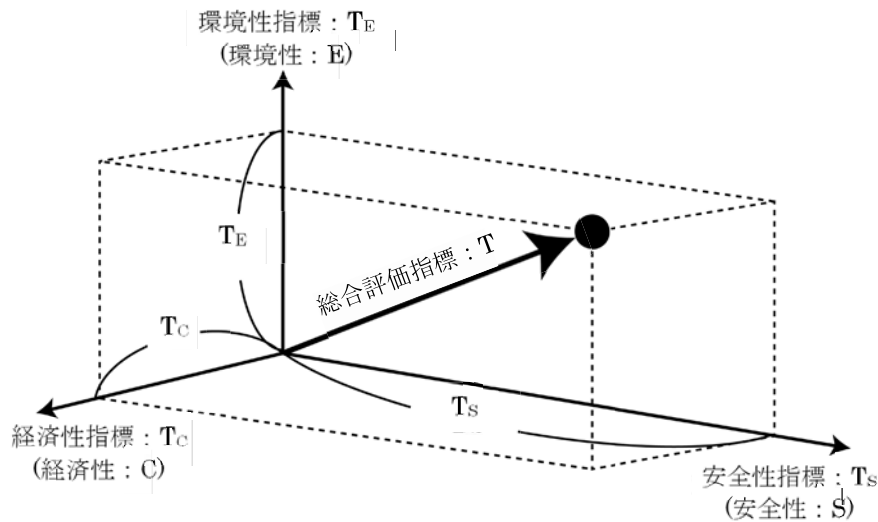


図2 解体工法の評価指標

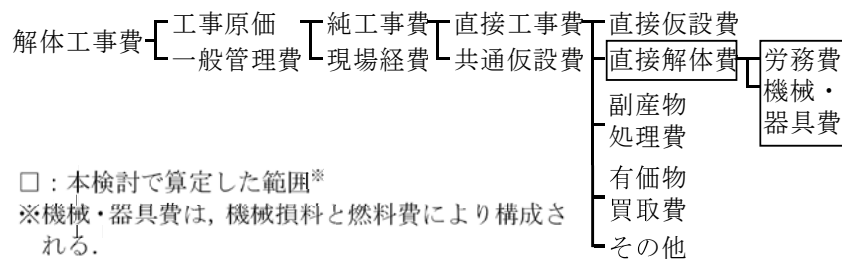


図3 解体工事費の構成

表2 使用機械の機械・器具費

区分	分類	費用	
労務費	オペレーター	27700 円/人日 : 2.8 万円/人日で算定	
	補助作業員	22400 円/人日 : 2.2 万円/人日で算定	
機械損料	ハンドブレーカ	22400 円/人日 : 2.2 万円/人日で算定	
	コンクリートカッター	22400 円/人日 : 2.2 万円/人日で算定	
	放電パルス破碎機	27700 円/人日 : 2.8 万円/人日で算定	
	圧碎機	大型	25500 円/人日 : 2.6 万円/人日で算定
		中型	22400 円/人日 : 2.2 万円/人日で算定
	自走式ワイヤーソー	31600 円/人日 : 3.2 万円/人日で算定	
	ロードカッター	6720 円/人日 : 0.7 万円/人日で算定	

表3 燃料の単価および CO₂ 原単位^{7), 8), 13)}

燃料区分	単価	CO ₂ 原単位
軽油	116 円/ℓ(東京都)	2.62kg・CO ₂ /ℓ
電力	36.4 円/kWh(東京都)	0.441 kg・CO ₂ /kWh

表 5 使用機械の事故の型別における死傷事故の発生確率

使用機械	事故の型別 ¹¹⁾	死傷者数(人) ¹⁰⁾	発生確率: P_n (%)
年間死傷事故の総人数(人): D_T		12597	
使用した各種機械の事故の型別における死傷者数(人): $\sum D_{EW}$			
ハンドブレーカ	飛来・落下	1318	$(1318+1734)/12597 \times 100 = 24$
	転倒	1734	
コンクリートカッター、ロードカッター	巻込れ	1706	$1706/12597 \times 100 = 14$
放電パルス破砕機 自走式ワイヤーソー	高温物接触	233	$(233+470)/12597 \times 100 = 6$
	動作の反動	470	
圧砕機	巻込れ	1706	$(1706+1318)/12597 \times 100 = 24$
	飛来・落下	1318	

$$P_n = \sum D_{EW} / D_T \times 100 \quad (4)$$

ここに、 $\sum D_{EW}$ ：参考文献 10)による使用した各種使用機械の事故の型別毎における死傷事故の人数の合計(人)*

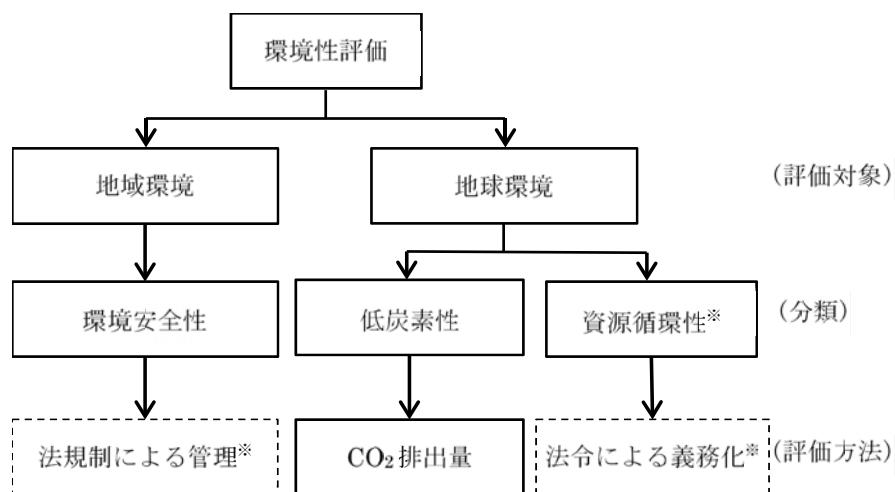
*複数の事故の型別が該当する場合は加算する。

D_T ：参考文献 10)による年間死傷事故の総人数(人)

(3) 環境性

建築工事の環境性については、2022年版のJASS 5(2022)¹²⁾によると、低炭素性(CO₂排出量削減)、資源循環性、環境安全性に分類され、それぞれについて評価することが示された。本検討においては、評価対象を地域環境、地球環境への影響に大別し、環境の評価を行うこととした。環境性評価の階層構造を図4に示す。地域環境において環境負荷の要因は、解体現場の近隣等において発生する騒音・振動、大気汚染、水質汚濁、有害物の溶出等の公害とし、環境安全性に関連する内容とした。地域環境に影響を及ぼす公害は、法規制(騒音規制法、水質汚濁規制法等)により管理値が設定されており、それを満たさない工事は法令違反となり実施できないことから、評価の対象ではなく工事を実施するための条件とした。一方、地球環境への影響はCO₂等の温室効果ガスがあるが²⁾、低炭素性に限定し、CO₂排出量により評価することとした。なお、資源循環性に関連する内容は、建設リサイクル法により分別解体、再資源化が義務付けられていることから、本検討では法令により遵守されるものとして、評価対象とせず、解体工法の種類による再資源化率等への影響はなく、副産物の発生量や処理方法は一定とした。解体工事におけるCO₂排出量は、使用機器類等の原動機から発生する量が支配的であり、使用するエネルギー源(軽油、電力等)と作業量により算定される。1時間当たりのCO₂排出量原単位は式(5)により算定される。

時間当りのCO₂排出量原単位 = 各燃料のCO₂原単位 × 時間当たりの燃料消費量 (5)



*本検討では算定対象としない。

図4 環境性評価の階層構造

表 3 より CO₂ 排出量原単位は、環境省・経済産業省の資料¹³⁾に基づき算定した。機械の時間当たりの燃料消費量は、機関出力と時間当たりの燃料消費率から式(6)により算定した。使用機械の時間当たりの CO₂ 排出量原単位を表 6 に示す。なお、機関出力と燃料消費率は、機械製造メーカーの性能仕様書によることとした。

表 6 使用機械の時間当たりの CO₂ 排出量原単位

種類	CO ₂ 排出量原単位	
ハンドブレーカ	2.619kgCO ₂ /ℓ×3ℓ=7.9kg・CO ₂ /h	
コンクリートカッター	2.619kgCO ₂ /ℓ×5ℓ=13.1kg・CO ₂ /h	
放電パルス破砕機	0.441kgCO ₂ /kWh×10kW=4.4kg・CO ₂ /h	
圧砕機	大型	2.619kgCO ₂ /ℓ×22ℓ=57.6kg・CO ₂ /h
	中型	2.619kgCO ₂ /ℓ×16ℓ=41.9kg・CO ₂ /h
自走式ワイヤーソー	0.441kgCO ₂ /kWh×10kW=4.4kg・CO ₂ /h	
ロードカッター	2.619kgCO ₂ /ℓ×3ℓ=7.9kg・CO ₂ /h	

時間当たりの燃料消費量=機関出力×時間当りの燃料消費率 (6)

T_E は、CO₂ 排出量を用いて式(7)により算定した。

$$T_E = \sum E_i / E_{ii} \quad (7)$$

ここに、T_E：環境性指標

E_i：各種解体工法を用いた場合の CO₂ 排出量(kg・CO₂) で式(8)により算定*

E_i=時間当りの CO₂ 排出量原単位(kg・CO₂/h)×作業時間(h)×作業日数(日) (8)

ΣE_i：各種解体工法の CO₂ 排出量の総和(kg・CO₂) *

※参考文献 13)により有効桁数 3 桁の整数値とした。

(4) 総合評価指標

図 2 に示した評価指標の T_C、T_S、T_E から得られた 3 次元座標軸上のベクトル成分を総合評価指標(T)として、式(9)により算定した。

$$T = \sqrt{T_C^2 + T_S^2 + T_E^2} \quad (9)$$

ここに、T：総合評価指標

3.2 評価指標の妥当性確認

設定した評価指標の妥当性確認として、モデル構造物を対象に単一の解体工法を用いて、評価指標の妥当性について検討を行った。具体的には、汎用的な 2 種類の解体工法、著者らが開発した 1 種類の解体工法¹⁴⁾、^{注3)}の合計 3 種類の解体工法により評価を行った。

(1) モデル構造物

モデル構造物は、図 5 に示す RC 造の集合住宅とし、その内の 1 戸分(約 63m²)の床スラブの解体工事とした。

(2) 解体工法

解体工法の概要を表 7 に示す。本検討では、RC 造構造物の解体工事で、一般的に使われているハンドブレーカ(工法 1)、騒音・振動が少ないコンクリートカッター(工法 2)、放電パルス破砕機(工法 3)¹⁴⁾を対象とした。それぞれの機械の使用台数は各 1 台とし、作業員は 1 名とした。なお、労務費は、工法 1、工法 2 は比較的簡便な作業であることから補助作業員程度とし、工法 3 は専門的な操作が必要になるため、オペレーター程度とした。

(3) 評価結果

性能評価指標の算定結果を表 8 に示す。また、図 6 に各評価指標間の関係を示す。経済性は汎用的な工法 1 がやや優れている。安全性は、感電等高温物との接触(高温物接触)^{注4)}、動作の反動以外の事故が想定されにくい工法 3 が優れた結果となった。環境性は CO₂ をより多く発生する工法 2 が劣る結果となった。T_C と T_S の関係によると、工法 3 は専門的な操作が必要なため労務

費が高くなることから、他の工法に比べてコストが高くなるものの、安全性については優れた結果となった。T_CとT_Eの関係からは、工法3は、他の工法に比べて経済性は劣るが、環境性がやや優れた結果となっている。T_SとT_Eの関係は、工法3は他の工法に比べて安全性、環境性に優れた結果となった。これらから、総合評価指標(T)は、それぞれ6.1、4.8、7.6となり、工法3が最も優れた結果となった。

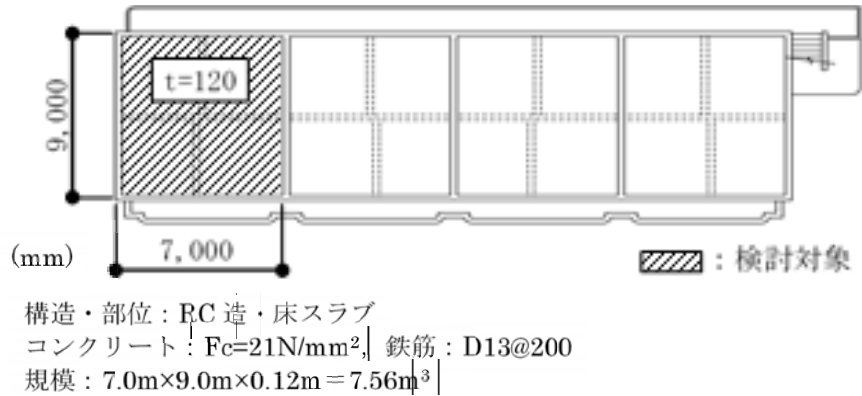


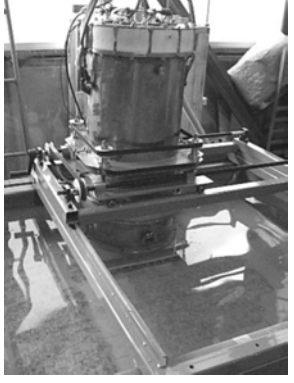


図5 対象建築物の概要

表7 解体工法の概要

解体工法	工法1	工法2	工法3
使用機械	ハンドブレイカ	コンクリートカッター	放電パルス破砕機
作業状況			
概要	一般的な解体工法でハンドブレイカの打撃により、RCを破砕する。	ダイヤモンドを埋込んだカッターでRCを切断する。切断面は直線平滑であり、正確な切断が可能である。ブレードの冷却に水を使用する。	高電圧パルス放電方式による放電パルス破砕機 ¹⁴⁾ により、コンクリート部分を破砕する。
特徴			
経済性	工期	-	工法1に対し延びる
	仮設	大規模な仮設は不要	工法1に対し大
安全性	飛来	有	無
	転倒	有	無
	巻入れ	無	有
	高温物接触	無	無
	動作の反動	無	無
環境性	騒音	大 ^{※1}	工法1に比較し減少
	振動	大 ^{※1}	工法1に比較し減少
	粉塵	多 ^{※2}	工法1に比較し減少

※1 防音シート、防音壁等で対処。 ※2 散水、換気、防塵マスクで対処(作業時)。

このように、各工法の特徴を評価できたことから、評価指標は概ね妥当であるといえる。したがって、本検討では、設定した評価指標を用いてシミュレーションにより、解体工事の要求性能である経済性、安全性、環境性とともな総合的な評価をすることとした。

表 8 性能評価指の算定結果

諸元	工法 1	工法 2	工法 3	
歩掛	0.3m ³ /日・台	26m ³ /日・台	0.2m ³ /日・台	
工期	25 日	30 日	36 日	
X _n	25 人	30 人	36 人	
労務費	25 日×2.2 万円/人日=56 万円	30 日×2.2 万円/人日=67 万円	36 日×2.8 万円/人日=101 万円	
機械損料	4.6 万円	5.7 万円	18.0 万円	
燃料費	3ℓ/h×8h×25 日=600ℓ 116 円/ℓ×600ℓ×10 ⁻⁴ =7 万円	5ℓ/h×8h×30 日=1200ℓ 116 円/ℓ×1200ℓ×10 ⁻⁴ =14 万円	36.4 円/kWh×8h=291.2 円/日 291 円/kW×10kW×36 日×10 ⁻⁴ = 11 万円	
C _i	67 万円	86 万円	130 万円	
ΣC _i	283 万円			
T _c	4.2	3.3	2.2	
R _i	P _n =24% R _i =25×24/100=6	P _n =14% R _i =30×14/100=4.2	P _n =6% R _i =36×6/100=2.2	
ΣR _i	12.4			
T _s	2.1	2.9	5.6	
CO ₂ 原単位	軽油 7.9kg・CO ₂ /h	軽油 13.1kg・CO ₂ /h	電力 4.4kg・CO ₂ /h	
E _i	7.9kg・CO ₂ /h×8h ×25 日=1580kg・CO ₂	13.1kg・CO ₂ /h×8h ×30 日=3140kg・CO ₂	4.4kg・CO ₂ /h×8h ×36 日=1270kg・CO ₂	
ΣE _i	5990kg・CO ₂			
T _E	3.8	1.9	4.7	
総合評価	T	6.1	4.8	7.6

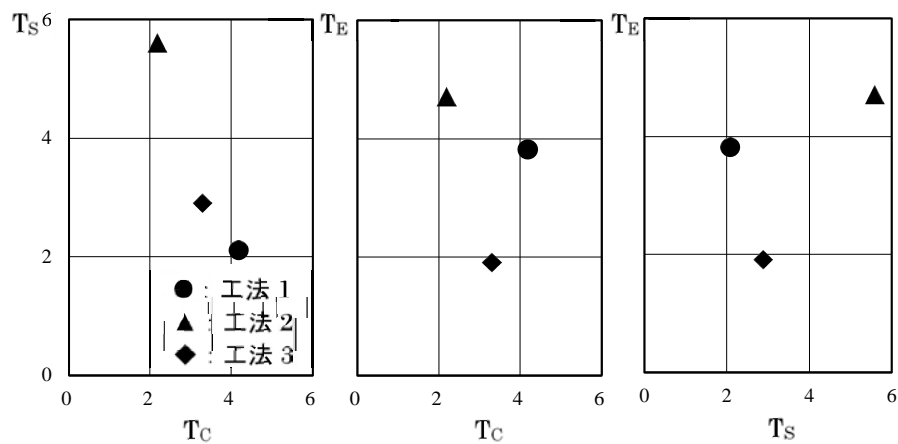


図 6 各評価指標間関係

4. 実工事によるシミュレーション

実際の解体工事と比較用の解体工事として解体工法を想定してシミュレーションを行った。

4.1 条件

(1) 対象建築物

対象建築物は、都内の地下 1 階(RC 造)地上 8 階(一部 SRC 造)の事務所ビルとした。表 9 に対象建築物の概要、図 7 に対象建築物の伏図(基準階)を示す。

(2) 解体工法

解体工法は、実際の施工で採用した圧砕機による解体工法(解体工法 A)と、ワイヤーソーをベースマシンに搭載した自走式ワイヤーソーを採用した解体工法(解体工法 B)の 2 種類とした。表 10 に解体工法の概要を示す。

表 9 対象建築物の概要

用途	事務所ビル	
経年	31年	
敷地面積	642m ²	
建築面積	582m ²	
延床面積	5,863m ²	
階数	地上8階 地下1階	
軒高	31m	
工事期間	2021年4月～2022年8月	
主要資材物量	コンクリート	5,900m ³
	鉄筋	750t
	鉄骨	370t

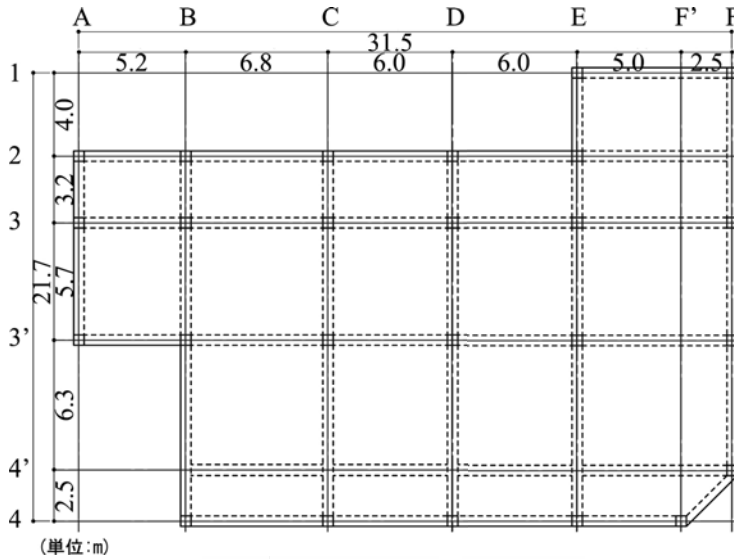


図 7 対象建築物の伏図(基準階)

(3) 解体工程

解体工法 A では、標準階で 1 フLOOR に 3 台の圧砕機を搭載し、運転員 3 名と補助作業員 2 名で作業を行い、6 日/1 階工程で工事を進めた。地下工事では、圧砕機 6 台、作業員 8 人を投入し 10 日間で完了した。この工事实績を基に歩掛りの比により解体工法 B を採用した場合の工事計画を検討し、標準階で自走式ワイヤーソー 3 台と床版用にロードカッター 1 台を搭載し、運転員 3 人と補助作業員 1 名で作業を行い、8 日/1 階の工程で工事を進める計画とした。

4.2 シミュレーション

(1) 諸元

シミュレーションに用いた T_C 、 T_S 、 T_E による 3 つの評価指標に対する算定の諸元は、表 2～表 6 に示した通りである。なお、機械の稼働時間は 8h/日とした。

(2) 評価結果

各評価指標の算定結果を表 11 に示す。また、図 8 に各評価指標間の関係を示す。解体工法 B の T_C は、使用重機の機械・器具費が高額なこと、工期がかかることが影響し、劣る結果となった。一方、 T_S は感電等高温物接触、動作の反動以外、事故の発生が少ないと想定されることから優れた結果となった。 T_E は CO₂ 排出量が少ない電力を燃料としていることにより、解体工法 A に対して優れた結果となった。 T_C と T_S の関係によると、解体工法 B は解体工法 A に比べてコストが高いが、安全性が優れた結果となっている。 T_C と T_E の関係からは、解体工法 B は解体工法 A に比べてコストがかかるが、環境性は優れた結果となっている。 T_S と T_E の関係は、解体工法 B は解体工法 A に比べて安全性、環境性ともに優れた結果となっている。これらから、解体工法 A は経済性に、解体工法 B は安全性と環境性で優れた結果が得られ、総合評価指標の T は、解体工法 A の 3.2 に対し、解体工法 B が 7.7 となり、優れている結果となった。

このように、解体工事の要求性能を経済性、安全性、環境性の3つの評価指標により、総合的な性能を定量的に評価することが可能となる。ただし、本検討は限られた範囲の中で実施したもので、今後はより詳細のデータに基づき、精度を向上させる必要がある。特に、環境性は低炭素性としてCO₂排出量により評価したが、資源循環性、環境安全性等、解体工事が環境に及ぼす影響を総合的に評価する指標が必要となる。

表 10 解体工法の概要

解体工法		A	B
使用機械		圧砕機	自走式ワイヤーソー
概要			
		ハサミ状の圧砕機をアーム先端に取付け、RC、SRC、Sを圧砕	油圧ショベルにワイヤーソーを装着し、RC、SRCを押切り切断
特徴			
経済性	工期	—	解体工法 A に比較し若干延びる
	仮設	養生シート、散水設備が必要	解体工法 A に比較し大幅削減可能
安全性	巻込れ	危険性有	危険性少
	飛来落下	危険性有	危険性少
	高温物接触	危険性少	危険性有
	動作の反動	危険性少	危険性有
環境性	騒音	比較的小さい	周辺交通騒音程度
	振動	比較的小さい	不感知レベル
	粉塵	多い*	解体工法 A に比較し半分以下

*散水、換気、防塵マスクにより対処(作業時)。

5. まとめ

建築物のライフサイクルの構成要素である解体工事の性能評価手法の確立を目的に検討を行った結果、以下のことがいえる。

- (1) 解体工事のシステム境界の中に、施工者等、7つのステークホルダーとその間の流れを設定し、それぞれの要求性能を経済性、安全性、環境性の3つの評価項目に分類して整理した。
- (2) 解体工事の評価は、経済性はコスト、安全性は危険度、環境性はCO₂排出量を用いた3つの評価指標を設定し、各工法を評価した結果、概ね各工法の特徴を評価できた。さらに、これら3つの評価指標を用いて3次元座標軸上のベクトル成分を総合評価指標として算定することにより評価した。
- (3) 本検討で設定した評価指標により、実際の解体工事を例にシミュレーションを行った結果、経済性、安全性、環境性による総合的な性能を定量的に評価することが可能であることが明らかとなった。ただし、本検討は限られた範囲の中で実施したもので、今後はより詳細のデータに基づき、精度を向上させる必要がある。特に、環境性は低炭素性のCO₂排出量に限定して評価したが、資源循環性、環境安全性等、解体工事の環境に及ぼす影響をより総合的に評価する指標が必要となる。

表 11 各評価指標の算定結果

解体 工法	階	階高 (m)	床面積 (m ²)	機械 台数※1 (台)	作業 員数 (人)	稼働 日数※2 (日)	経済性			安全性						環境性			総合 評価 T	
							労務費 ⁵⁾ (万円)	機械・器具費 ^{7),8)} (万円)	C _i	ΣC _i	T _c	X _n (人)	P _n (%)	R _i	ΣR _i	T _s	E _i	ΣE _i		T _E
A	PH	4.9	77	大型:1	運転員:1	1	2.8	2.5	2.0	7.3		1	24.0	0.24		461				
				中型:1	補助員:1	1	2.2	1.5	5.9	1		24.0	0.24	335						
	2~8F	3.6	640	大型:2	運転員:3	6	349.0	210.0	171.5	730.5		126	24.0	30.20		38700				
				中型:1	補助員:2	6	188.2	94.1	344.7	84		24.0	20.20	14100						
	1F	4.8	640	大型:2	運転員:3	7	58.2	35.1	28.6	121.9	2.5	21	24.0	5.04	1.4	6450		1.2	3.2	
				中型:1	補助員:2	7	31.4	15.7	10.4	57.5		14	24.0	3.36		2350				
	B1F	12.3	640	大型:4	運転員:5	10	138.5	100.0	81.7	320.2		50	24.0	12.00		1840				
				中型:2	補助員:3	10	67.2	44.8	141.7	30		24.0	7.20	6700						
	計							837.5	504.4	387.8	1729.7	4360.6	327	-	78.50	109.5	70900	84000		
	B	PH	4.9	77	ワイヤロー:1	運転員:1	1	2.8	3.2	2.3	8.3		1	6.0	0.06		35			
カッター:1					補助員:1	1	2.2	0.7	4.0	1	14.0		0.14	63						
2~8F		3.6	640	ワイヤロー:3	運転員:3	8	465.4	530.9	391.2	1387.5		168	6.0	10.10		5930				
				カッター:1	補助員:1	8	125.4	37.6	225.4	56		14.0	7.80	440						
1F		4.8	640	ワイヤロー:3	運転員:3	11	91.4	104.3	76.8	272.5	1.7	33	6.0	1.98	3.5	1160		6.4	7.7	
				カッター:1	補助員:1	11	24.6	7.4	44.2	11		14.0	1.54	692						
B1F		12.3	640	ワイヤロー:4	運転員:4	18	199.4	227.5	167.2	594.1		72	6.0	4.32		2540				
				カッター:2	補助員:2	18	80.6	24.2	144.9	36		14.0	5.04	2270						
計								991.8	935.8	753.3	2680.9		378	-	30.98		13100			

※1 大型:大型圧碎機, 中型:中型圧碎機, ワイヤロー:自走式ワイヤロー, カッター:ロードカッター ※2 燃料費は機械の稼働時間を8h/日として算定した.

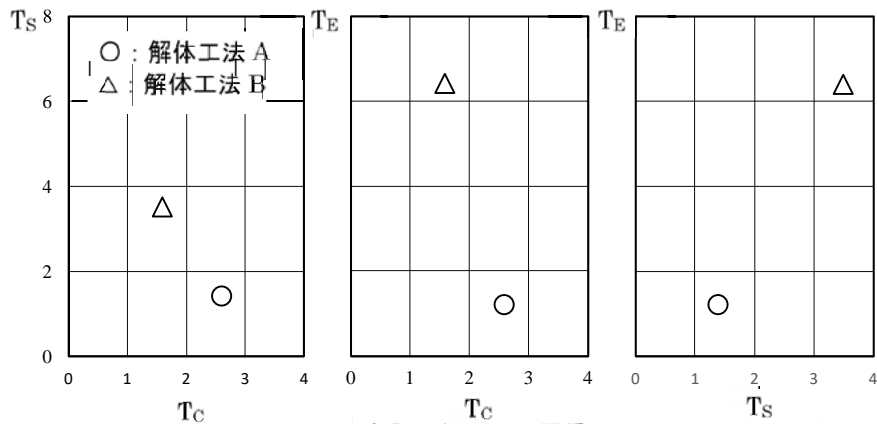


図8 各評価指標間の関係

謝辞

本検討の実施にあたり、(株)大崎総合研究所 村上 一夫氏に多大の協力を頂いた。ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築物の解体工事施工指針(案)・同解説(鉄筋コンクリート造編・鉄骨造編), 2024
- 2) 日本建築学会: 建物のLCA指針 温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール 改訂版, 2024
- 3) International Organization for Standardization, ISO 21930:2017, Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services, 2017
- 4) 市原英樹ほか: 超高層建物における閉鎖型解体工法の開発, 日本建築学会技術報告集, 19巻, 41号, pp.13-18, 2013.2
- 5) 国土交通省: 公共工事設計労務単価, 2023.2
- 6) 日本建設機械施工協会: 建築機械損料表, 2011.5
- 7) 建設物価調査会: 建設物価, 2024.5
- 8) 東京電力エナジーパートナー(株): 電気料金プラン, 2024.4
- 9) International Organization for Standardization, ISO Guide 73:2009 Risk management Vocabulary, 2009
- 10) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課: 令和4年労働災害発生状況等, 令和5年5月23日
- 11) 建設業労働災害防止協会: 災害事例, 2021.5
- 12) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022
- 13) 環境省地球環境局, 経済産業省産業技術環境局: 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガス排出量の算定に関する省令, 2023.12
- 14) Kazuo Murakami, Yasuhiro Dosho, Kensuke Uemura, Hiroshi Kimura: Concrete Demolition and Surface Scraping using High Voltage Pulse Discharge, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16 Issue 8, pp.358-367, August 2018

注

- 注1) 指針案 2.5 の「解体工事における関係者の役割と責務」に準拠したうえで、必要と思われる項目を追記し、要求性能との関連を示した。
- 注2) 仮設費は、現場の状況等で大幅に異なることから本検討には含めない。
- 注3) 著者らが開発した放電パルス破砕機¹⁴⁾は、実用化された工法ではないが、特徴を把握しているため、評価指標の妥当性確認のため選定した。
- 注4) 参考文献10)では、「高温・低温物との接触」であるが、内訳が不明なため、本検討では、「高温物との接触(高温物接触)」として一括りにした。

- (a) 交付年度 : 2023年度
(b) 研究題目 : 環境負荷低減型解体手法開発のための静的破砕剤の高次利用方法の検討
(c) 研究代表者 氏名 : 高橋 駿人
所属 : 東北大学 (前 東京理科大学)

(d) 研究成果

概要 : 本研究では、静的破砕剤の使用に着目し、RC 構造物の効率的かつ環境負荷を低減した解体を実現するための基礎的な検討を、剛体バネモデルによる3次元微細構造解析により実施した。ひび割れの進展方向について実験と解析の整合性を確認した。また、小型RCモデル供試体を対象とし、静的破砕剤の配置条件やスターラップの有無をパラメータとして解析を実施し、特にスターラップの存在がひび割れの進展およびひび割れ幅に大きく影響を与えることが確認できた。

キーワード : 解体, 静的破砕剤, ひび割れ, 3次元剛体バネモデル

1) はじめに

コンクリート構造物は寿命を迎えると、更新または撤去となり、その際には構造物の解体作業が必須となる。代表的な解体手法として、ハンマーなどによる打撃荷重を用いた手法があるが、経済的である反面、粉塵や騒音、破片の飛散などが発生し環境負荷が大きい。したがって、特に都心部や自然環境保全地域などで、大きく制限を受けることが考えられる。

上記の対応策の一つとして、静的破砕剤の活用が挙げられる¹⁾。静的破砕剤は、水と混ぜ合わせると水和発熱を伴いながら硬化・膨張が生じる物質であり、構造物中の孔内に注入すると、孔周囲に膨張圧が生じ、構造物中にひび割れが発生する²⁾。図-1に静的破砕剤によるひび割れ発生の様子を示す。このように、静的破砕剤を注入した孔を起点としてひび割れを導入することで、その後の構造物の解体を容易にすることができる。

これまでも、静的破砕剤を用いた手法でコンクリート構造物や岩盤構造物の解体の簡素化することを目的に、実験的に解体プロセスを検討した事例は見られる^(例えば3), 4)。しかし、実構造物に適用する場合は、あらゆる構造形式に対して効率的に解体するための検討が必要であり、そのためには解析技術の開発が不可欠である。

Cho et al.⁵⁾は、Concrete Damaged Plasticity モデルを用いて、意図通りのひび割れを発生させるための静的破砕剤間の最適間隔とコンクリート圧縮強度の関係を数値解析的に明らかにしている。また Kim et al.⁶⁾は、これらの数値解析技術を活用して、港湾構造物を対象にして実証実験を行っている。しかし、これらの研究は無筋コンクリート構造物を対象としており、さらなる適用性の拡大のためには、RC 構造物を対象とすることが必要不可欠であるが、その知見が少ないのが現状である。

そこで本研究では、静的破砕剤を活用したRC 構造物の解体のための基礎的な検討を、剛体バネモデルを用いた3次元構造解析により実施した。具体的には、



図-1 静的破砕剤によるひび割れ発生

小型RCモデル供試体を対象とし、スターラップの存在や静的破砕剤の配置方法、配置数が鉄筋周辺のひび割れの進展に与える影響を解析的に把握することを目的とした。

2) 実験概要

2.1 解析モデル概要

本研究では、剛体バネモデルを(RBSM)^(例えば7)を使用した。鉄筋コンクリートモデルは、図-2に示すように、隣接する要素に1つの垂直バネと2つのせん断バネモデルで接続された3次元多面剛体要素で構成されている。各剛体は並進3自由度、回転3自由度を有している。コンクリートは、図-3(a)に示すように、剛体要素をランダムな点群となるようにポロノイ分割をしてメッシュ化することで、亀裂伝搬の方向性とメッシュの偏りを低減している。鉄筋は、図-3(a)、(b)に示すように異形鉄筋とし、異形鉄筋のリブの形状を正確に表現することで、鉄筋とコンクリートの力学的な運動性を正確にシミュレーションすることができる。

2.2 コンクリート構成則

コンクリートは、各コンクリート要素間を垂直バネ

とせん断バネの特性を与えて接続している。各バネは圧縮破壊しないものとし、剛体要素間の破壊は垂直バネとせん断バネの両者が破壊することで発生する。コンクリート要素のひび割れは、垂直バネの応力が引張強度を超えた時に発生することとした。また、コンクリート要素のせん断バネは弾塑性挙動し、せん断応力は、ひび割れ幅の拡大に比例して直線的に低下すると仮定した。

2.3 静的破砕剤—コンクリート界面構成則

文献 8) の Corrosion Expansion Model (CEM) を参考に、静的破砕剤—コンクリート要素の界面を垂直バネで接続し、静的破砕剤要素側から段階的に膨張していく、コンクリートの引張強度に達した時にコンクリート要素にひび割れが導入されることとした。RBSM 上での CEM の適用は、既往の研究 7) で検証されており、鉄筋腐食によるひび割れパターンは実験と解析で一致していることが報告されている。また、文献 8) で、CEM を用いて鉄筋がスターラップに拘束されている場合の鉄筋腐食によるひび割れも再現出来ていることが報告されており、CEM による検討は妥当であると考えられる。図-4 に CEM をベースにした RBSM 上での静的破砕剤の膨張モデルを示す。本モデルを適用した時のコンクリート要素のひび割れパターンの検証については、3 章に後述する。

2.4 鉄筋構成則

鉄筋は、弾性段階とひずみ硬化を伴う組成段階からなる法線バネで構成されるとする。また鋼材要素間のせん断バネの挙動は弾性と仮定する。

2.5 鉄筋—コンクリート界面構成則

鉄筋—コンクリート要素の界面をつなぐバネは、コンクリート要素をつなぐ垂直バネと同じ構成モデルとする。鉄筋—コンクリート界面の引張強度は、コンクリートの引張強度の半分とした。

2.6 材料定数

本研究の RBSM によるシミュレーションで適用した材料定数を表-1 に示す。コンクリートの値は、文献 9) を参考に圧縮強度 30MPa に対応する値として各値を設定した。

3) 解析モデルの検証

RBSM を用いた静的破砕剤の膨張によるひび割れの進展に関する解析についての妥当性を検証するため、小型の無筋供試体を用いた要素実験を行い、RBSM による解析と比較した。

3.1 要素実験概要

(1) 供試体概要

図-5 に供試体の概要図を示す。使用した供試体は、75mm×75mm×150mm の角柱コンクリート供試体で、材齢 28 日の圧縮強度は 34.2N/mm² であった。静的破砕剤の配置方法がひび割れに与える影響を把握するため、充填用の孔をφ20mm×75mm とし、孔の位置はケース (a) 75mm×75mm 断面の中心と、ケース (b) 75mm×150mm の断面の中心の 2 ケースとして穿孔した。主成分が CaO である静的破砕剤を使用し、水破砕剤質量比は 0.3 として練り混ぜて、スラリー状にし

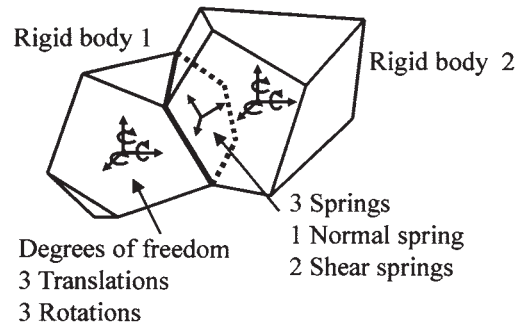
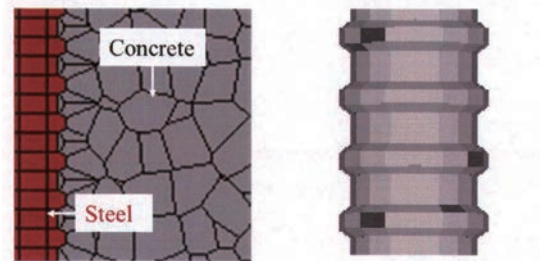


図-2 剛体バネモデル (RBSM) の概要 7)



(a) 鉄筋—コンクリート界面近傍の断面図 (b) 3D 鉄筋モデル

図-3 RBSM による鉄筋コンクリートモデル 8)

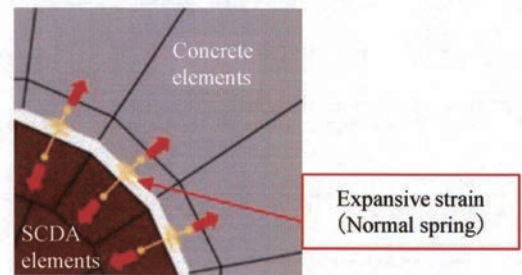
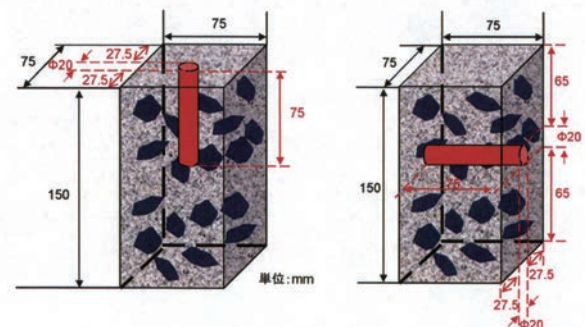


図-4 RBSM による静的破砕剤膨張モデル (SCDA: 静的破砕剤)

表-1 シミュレーションで用いた材料定数

材料特性	コンクリート	鉄筋
引張強度	2.22 MPa	-
降伏強度	-	400 MPa
弾性係数	28 GPa	200 GPa
ポアソン比	0.18	0.25



ケース (a) ケース (b)

図-5 要素実験の供試体概要図

たものを孔に充填した。

(2) X線CT測定

供試体内部のひび割れを確認するため、X線CT測定を実施した。マイクロフォーカスX線CT装置を使用し、測定条件は管電圧225kV、管電流400 μ A、解像度121 μ m/pixel、119 μ m/sliceとした。測定は各供試体とも、充填直後と約24時間後を目安に実施したが、実際は測定時の都合上、若干の前後があることは留意されたい。

3.2 実験と解析の比較検証

図-6にケース(a)、ケース(b)についての要素実験と解析によるひび割れの比較を示す。なお、要素実験および解析の断面画像は、供試体中央部の75mm \times 150mmの断面であり、解析の結果は内部応力状況も含めて示す。図-6によると、ケース(a)の要素実験から観察されるひび割れとしては、静的破砕剤の充填箇所の周囲を起点に数か所からひび割れが発生し、モルタル部および骨材界面を経路として供試体の長辺の外縁方向に進展していることがわかる。また、ケース(a)の解析結果では、静的破砕剤の膨張が0.5mmになると静的破砕剤の充填箇所底部で発生するひび割れが顕著になり、要素実験と同様のひび割れが生じていることがわかる。

ケース(b)の要素実験から観察されるひび割れとしては、静的破砕剤の充填箇所の周囲を起点に、供試体の長辺外縁方向にほぼ直線に進展していることがわかるが、微細なひび割れは斜め方向にも進展していることも見て取れる。ケース(b)の解析結果では、膨張が0.5mmになると、供試体の長辺外縁方向にひび割れが進展しているほか、供試体上部の短辺外縁方向へも進展していることがわかる。要素実験で供試体上部の短辺外縁方向へのひび割れが生じなかった原因として、要素実験での穿孔箇所が75mm \times 150mm断面の中心より若干右側に偏在したため、応力が均等に伝わらず、先に距離が短い方の供試体長辺外縁方向にひび割れが集中して進展し、次いで距離が長い方の供試体長辺外縁方向に進展したためと考えられる。しかし、要素実験、解析共に主ひび割れの進展の傾向は捉えているといえる。

以上より、充填した静的破砕剤による膨張の主ひび割れの進展について、RBSM解析により概ね再現できることが明らかになった。

4) 静的破砕剤の配置条件およびスターラップの拘束がひび割れに与える影響

4.1 解析ケース

対象とした解析ケースを表-2に示す。解析対象は200 \times 200 \times 500mm、主鉄筋を4D20とした簡易なRC柱をモデル化し、静的破砕剤を充填する孔数(1 or 3)や、穿孔深さを半分にした場合と貫通させた場合(H or F)、スターラップの有無(S or NS)をパラメータにした8ケースを対象とした。解析モデルの例として、NS-F-1およびS-H-3について図-7に示す。主鉄筋は200 \times 200mm正方形断面の各頂点から(|50|, |50|)mmの位置に長辺方向に配置し、それぞれ

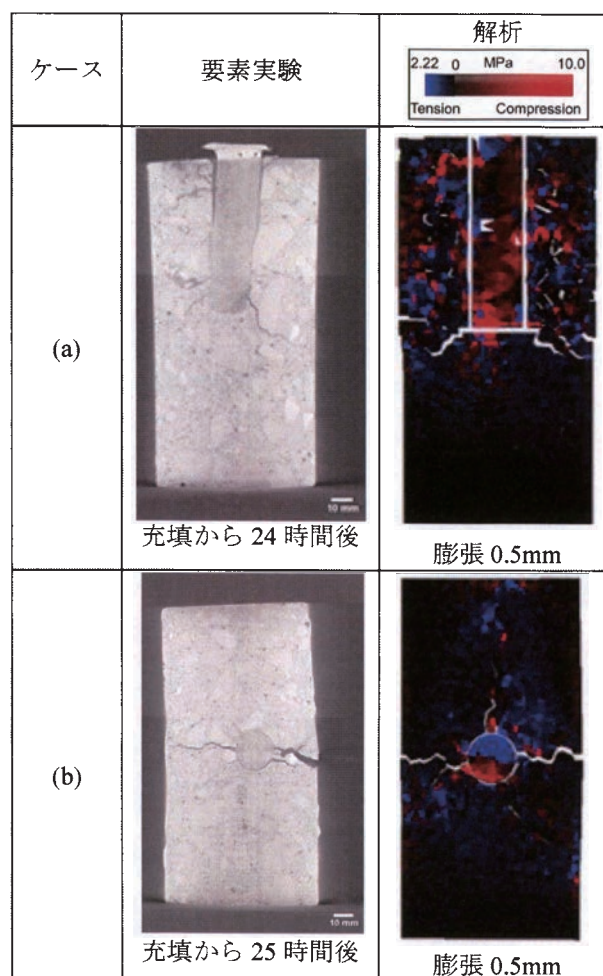


図-6 要素実験と解析の比較

表-2 解析ケース

ケース	孔数	穿孔深さ	スターラップ
NS-H-1	1	半分 (H)	無 (NS)
S-H-1			有 (S)
NS-F-1		貫通 (F)	無 (NS)
S-F-1			有 (S)
NS-H-3	3	半分 (H)	無 (NS)
S-H-3			有 (S)
NS-F-3		貫通 (F)	無 (NS)
S-F-3			有 (S)

図-7に示すようにA~Dと称する。スターラップ有(S)の場合は、D10の鉄筋を長辺方向100mmピッチに各主鉄筋を囲むように設置し、図-7に示すようにa~dと称する。穿孔する径は20mmとし、穿孔箇所はA-B間(C-D間)になるようにし、穿孔方向はA-C方向(B-D方向)とし、穿孔深さは供試体高さ半分の100mm(H)および供試体を貫通する200mm(F)の場合とした。また、孔数が1の場合は200 \times 500mm断面の中心に、孔数が3の場合は200 \times 500mm断面の中心および長辺方向に100mm離れた両側に導入した。

図-8(A)~(H)は全てのケースの解析結果である。各ケースの解析結果について、供試体表面の状況を示す。

また、文献 10)で外観に対するひび割れ幅の設計限界値が 0.3mm 程度としている。さらに、より顕著なひび割れとして 1mm を閾値として、ひび割れ幅を w とすると、 $0.3\text{mm} < w \leq 1.0\text{mm}$ と $w > 1.0\text{mm}$ の境界面それぞれを可視化して示すこととした。

4.2 穿孔深さがひび割れ形態に与える影響

図-8 A), C)に NS-H-1, NS-F-1 の解析結果をそれぞれ示す。NS-H-1 と NS-F-1 を比較すると、両者とも主

鉄筋の長手方向にひび割れが進展しているが、表面ひび割れを見ると主鉄筋 C,D 側に現れる表面ひび割れ幅は NS-F-1 の方が NS-H-1 よりも若干大きいように見て取れる。このように、穿孔深さはひび割れの進展方向に影響を与えることがわかる。

4.3 スターラップがひび割れ形態に与える影響

図-8 A)~ D)に NS-H-1, S-H-1, NS-F-1, S-F-1 の解析結果をそれぞれ示す。これによると、スターラップ

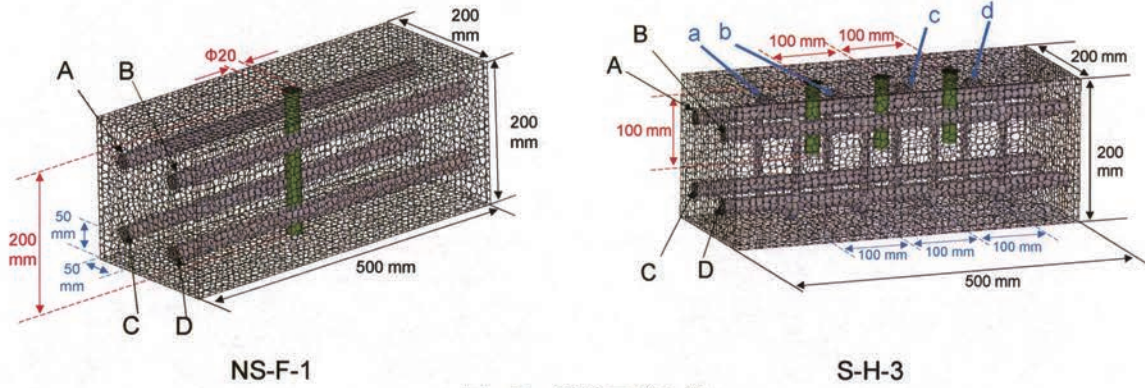


図-7 解析モデル例

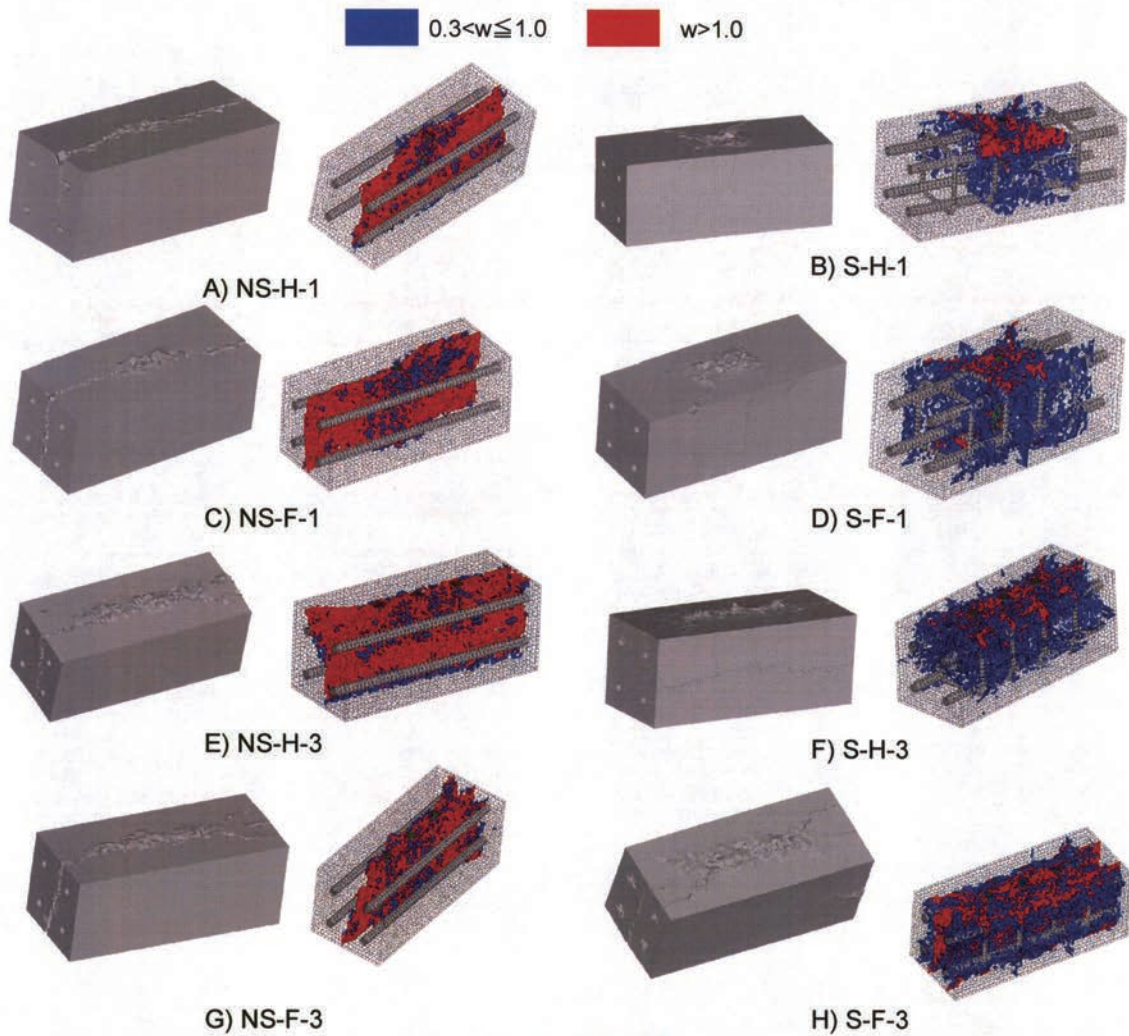


図-8 解析結果

の無い NS-H-1, NS-F-1 では、ひび割れは主鉄筋の長手方向に向かってほぼ一直線に進展していることがわかる。一方、S シリーズでは、ひび割れはスターラップ b-c 間を中心に発生しているが、S-H-1 ではスターラップ b-c 間および主鉄筋 A,B 側の表面にひび割れが進展しているのに対し、S-F-1 では主鉄筋 C,D 側へも進展していることがわかる。ひび割れ幅の分布に着目してみると、NS シリーズでは $w>1.0$ の境界面が多く存在しているのに対し、S シリーズでは $0.3<w\leq 1.0$ の境界面が多いことがわかる。これは、スターラップによる拘束が、ひび割れ幅の拡大を抑制したためと考えられる。

以上より、スターラップの存在は主ひび割れの進展を大きく阻害することがわかる。

4.4 穿孔数がひび割れ形態に与える影響

図-8 A), C), E), G) である NS シリーズで比較すると、穿孔数が変化しても、ひび割れ形態に大きな違いはないことがわかる。一方、図-8 B), D), F), H) である S シリーズで比較すると、穿孔数が 1 か所である S-H-1 および S-F-1 は、穿孔したスターラップ b-c 間を中心にひび割れが発生するが、穿孔数が 3 箇所である S-H-3, S-F-3 は、隣接した a-b 間および c-d 間でひび割れが連結し、供試体の長手方向にわたってひび割れが生じていることがわかる。したがって、穿孔数を多くして適切に配置すれば、スターラップがあつたとしてもひび割れは連結することがわかる。

4.5 各ケースとひび割れ幅分布の関係

図-10 に、コンクリート要素間の境界面の総数に対して、各ひび割れ幅になった境界面の数を割合で示す。なお、図-8 では区別していないが、 $w=0$ と $0<w\leq 0.3$ も区別して示す。

各シリーズの H と F で比較すると、 $w>0$ の境界面の割合が増えていることがわかる。これは穿孔数が深くなったことで、より強い内部応力が生じたためと考えられる。

NS と S で比較すると、スターラップのない NS シリーズでは、 $w=0$ の境界面の割合が多い一方で、スターラップのある S シリーズでは、 $0<w\leq 0.3$ の境界面の割合が多いことがわかる。これは、スターラップがない場合では鉄筋長手方向に主ひび割れが集中的に生じているが、スターラップがある場合では鉄筋長手方向に生じる主ひび割れがスターラップにより阻害され、微細なひび割れが生じているためと考えられる。

穿孔数で比較すると、特にスターラップがある S シリーズで、穿孔数が多い方が $w>0.3$ のひび割れ幅の境界面の割合が多くなっていることがわかる。

以上のように、スターラップの存在や静的破砕剤の配置方法、配置数はひび割れ幅の分布にも影響を与えることが明らかになった。

5) まとめ

本研究では、静的破砕剤を活用した RC 構造物の解体のための基礎的な検討を、剛体バネモデルを用いた 3 次元構造解析により、小型 RC 供試体モデルを対象として実施した。本研究で得られた知見を次にまとめ

る。

- (1) 剛体バネモデルを用いた 3 次元微細構造解析を、無筋供試体を用いた小型供試体による要素試験と比較した結果、主ひび割れの進展について概ね再現可能であることがわかった。
- (2) 静的破砕剤の穿孔深さが、供試体高さの半分程度である場合、スターラップがあるとひび割れの進展方向が限定される。スターラップが存在する供試体では、主ひび割れの進展が大きく阻害されるが、隣接するスターラップ間で静的破砕剤を導入すると、静的破砕剤間でひび割れが連結する。
- (3) スターラップの存在や静的破砕剤の配置方法、配置数は、ひび割れ幅の分布に影響を与え、特にスターラップがあると、0.3mm 以下の微細なひび割れが多く発生する。

参考文献

- 1) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 360 号/V-3, pp.61-70, 1985.
- 2) Hinze, J. and Brown, J.: PROPERTIES OF SOUNDLESS CHEMICAL DEMOLITION AGENTS, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.120, No.4, pp.816-827, 1994.
- 3) Gambatese, J. A.: Controlled Concrete Demolition Using Expansive Cracking Agents, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.129, No.1, pp.98-104, 2003.
- 4) Tang, W. et al.: The influence of borehole arrangement of soundless cracking demolition agents (SCDAs) on weakening the hard rock, International Journal of Mining Science and Technology, Vol.31, No.2, pp.197-207, 2021.
- 5) Cho, H. et al.: Numerical simulations of crack path control using soundless chemical demolition agents and estimation of required pressure for plain concrete demolition, Materials and Structures, Vol.51, Article number 169, 2018.
- 6) Kim, K. et al.: The use of expansive chemical agents for concrete demolition: Example of practical design and application, Construction and Building Materials, Vol.272, 121849, 2021.
- 7) Jiradilok, P. et al.: Development of discrete meso-scale bond model for corrosion damage at steel-concrete interface based on tests with/without concrete damage, Construction and Building Materials, Vol.236, 117615, 2020.
- 8) Avadh, K. et al.: Mesoscale simulation of pull-out performance for corroded reinforcement with stirrup confinement in concrete by 3D RBSM, Cement and Concrete Composites, Vol.116, 103895, 2021.
- 9) Joshi, S. S. et al.: Investigating the effect of rebar corrosion order and arrangement on cracking behavior of RC panels using 3D discrete analysis, Construction and Building Materials, Vol.325, 126730, 2022.
- 10) 土木学会: 2022 年制定 コンクリート標準示方書設計編, p.247, 2023.

