― 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４年度の解体工事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 研究協力者	所　　属
1	・　階上解体工法における床版サポート等の安全性に関する研究	
	青　木　孝　義 張　　景　耀 湯　浅　　昇	建築構造技術研究所（名古屋市立大学）所長 建築構造技術研究所（京都大学） 日本大学 生産工学部建築工学科 教授
2	・　プレストレストコンクリート造建築物の解体方法検討	
	湯　浅　　昇	日本大学 生産工学部建築工学科 教授
3	・　再生骨材コンクリートの付加価値向上による利用拡大に向けた基礎的研究	
	小　山　明　男	明治大学 理工学部建築学科 教授
4	・　解体工事の性能評価に関する研究	
	道　正　泰　弘	名城大学 理工学部環境創造工学科 教授

令和4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等の安全性に関する研究

2023年8月25日

青木孝義[1)], 張景耀[2)], 湯浅昇[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) 日本大学生産工学部建築工学科

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
- 。。。

これまでの研究

解体工事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）の地上解体工事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シェルの解体工事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。

令和4年度の研究

1．床版・梁等のサポートの解体シミュレーション
Rhinoceros（GrasshopperとKaramba3D）

3．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

4．コンクリート強度の簡易推定

床版・梁等のサポート計画計算例

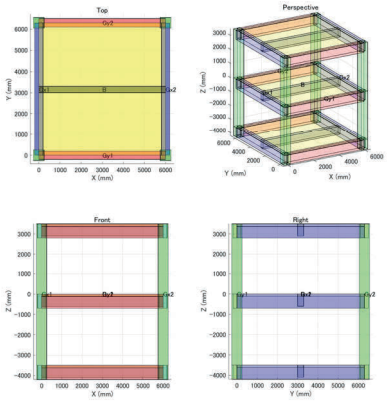
計算対象とする建物は,
- X方向スパン6,000 mm，Y方向スパン6,300 mm，階高3,500 mm
- 柱500×500 mm
- 大梁Gx1 = Gx2 = 400×700 mm（端部上端筋5-φ19，端部下端筋2-φ19，中央部上端筋2-φ19，中央部下端筋4-φ19，スターラップ2-φ9@200）
- 大梁Gy1 = Gy2 = 400×700 mm（端部上端筋7-φ19，端部下端筋3-φ19，中央部上端筋3-φ19，中央部下端筋5-φ19，スターラップ2-φ9@200）
- 小梁B = 300×600 mm（端部上端筋3-φ19，端部下端筋2-φ19，中央部上端筋2-φ19，中央部下端筋3-φ19，スターラップ2-φ9@200）
- スラブ厚さ120mm（短辺：端部上端筋φ6@150，端部下端筋φ6@150，中央部上端筋φ6@150，中央部下端筋φ6@150，長辺：端部上端筋φ6@200，端部下端筋φ6@200，中央部上端筋φ6@200，中央部下端筋φ6@200）

使用材料は,
- 鉄筋SR235（許容引張応力度f_t = 235 N/mm^2），コンクリート（設計規準強度F_c = 18 N/mm^2，許容せん断応力度$f_s = F_c / 30 \times 1.5 = 0.9$ N/mm^2）

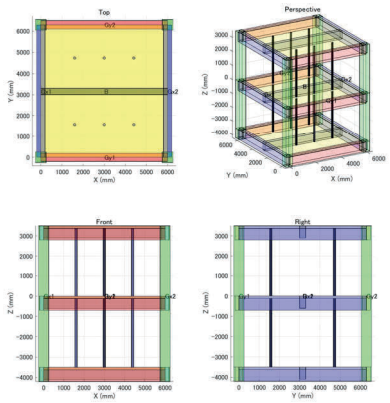
解体用重機は,
- 0.25 m^{3}クラス，0.45 m^{3}クラス，0.7 m^{3}クラスのバックホウ

を想定する.

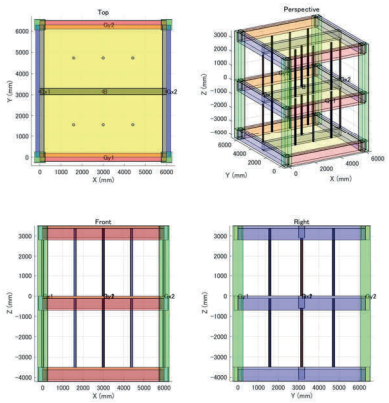
床版・梁等のサポート計画計算例



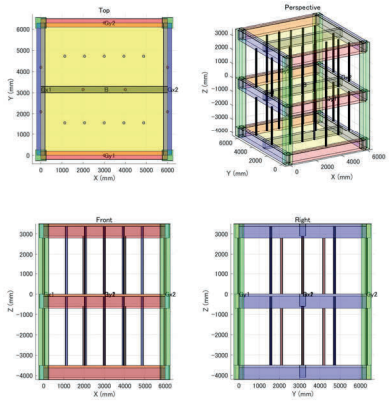
床版・梁等のサポート計画計算結果（0.25m³バックホウ）



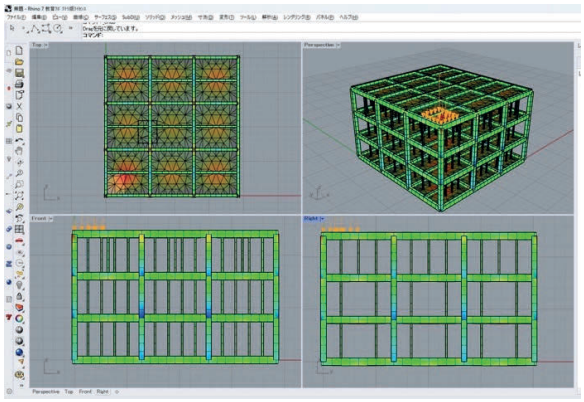
床版・梁等のサポート計画計算結果（0.45m³バックホウ）



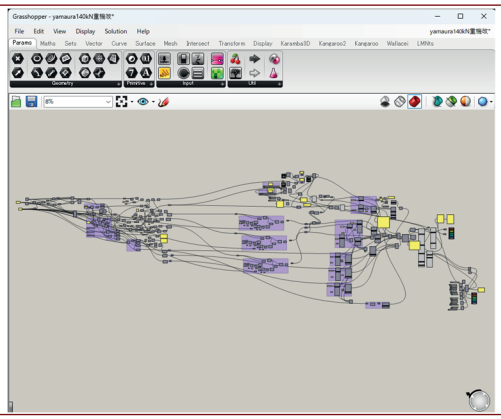
床版・梁等のサポート計画計算結果（0.75m³バックホウ）



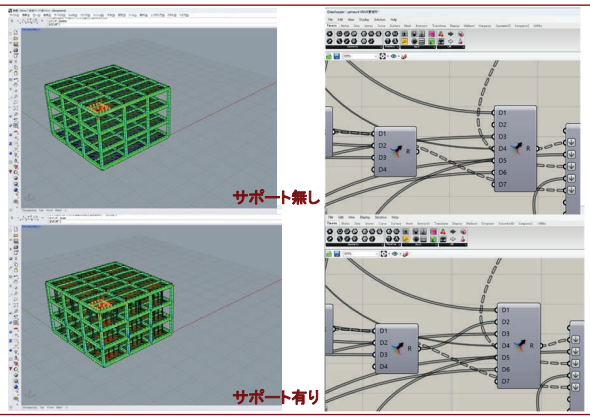
Grasshopperで作成した3Dモデル



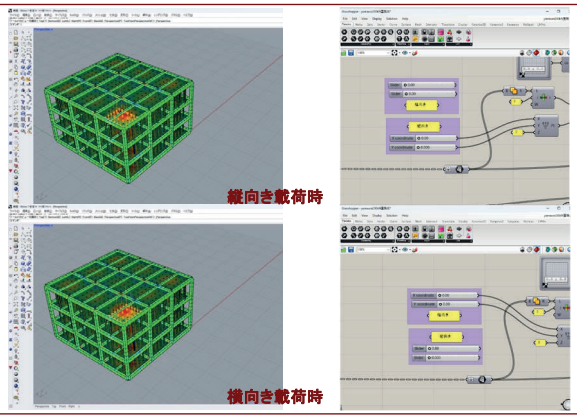
Grasshopperで作成した3Dモデル



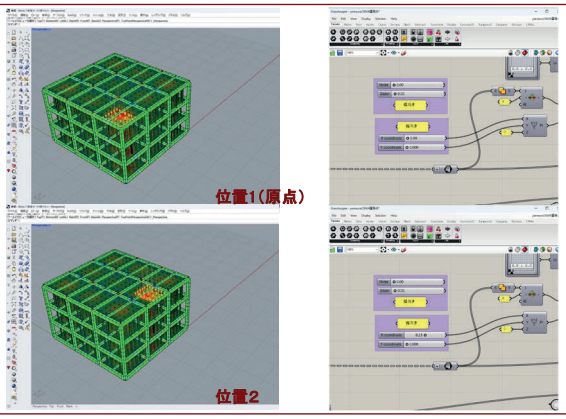
サポート無し(RとD2未接続)と有り(RとD2接続)



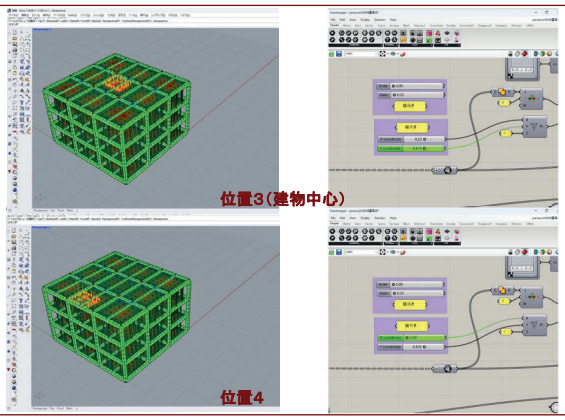
重機縦向き積載時および横向き積載時



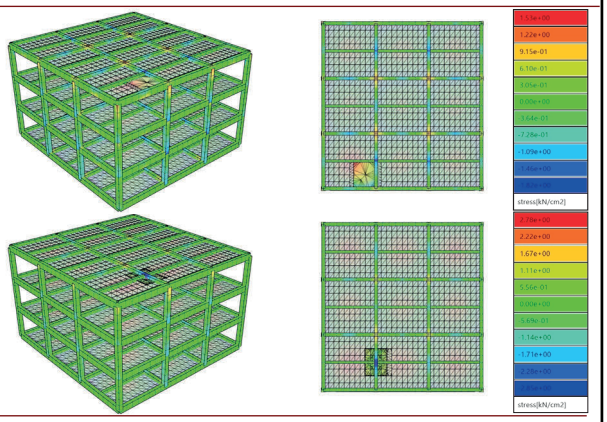
重機積載位置



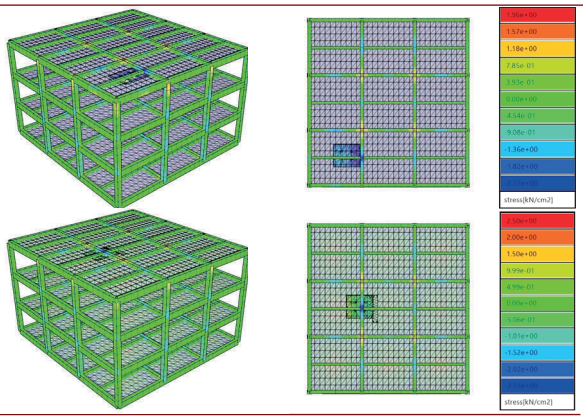
重機積載位置



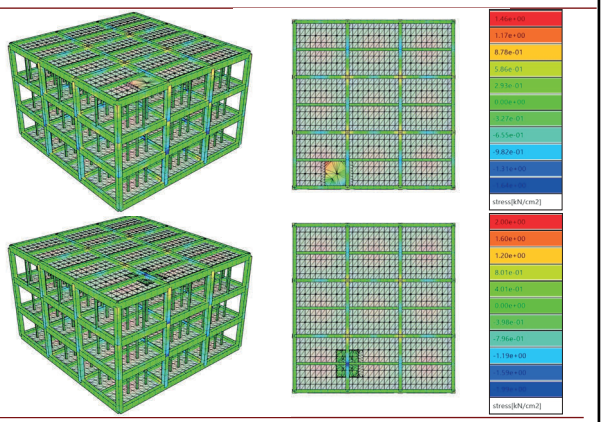
サポート無し重機縦向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



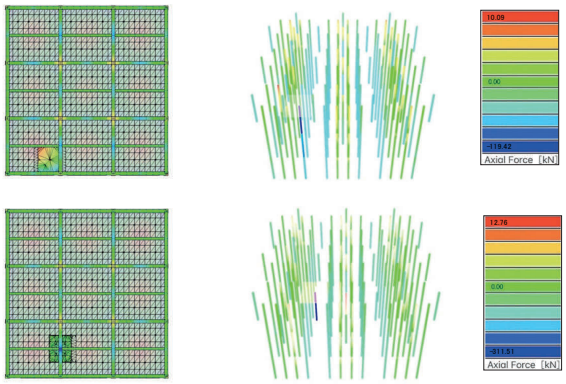
サポート無し重機横向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



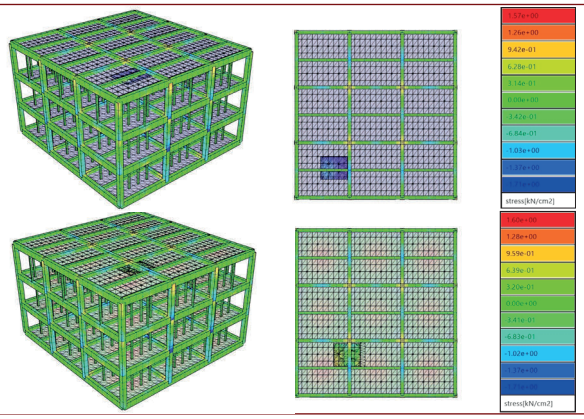
サポート有り重機縦向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



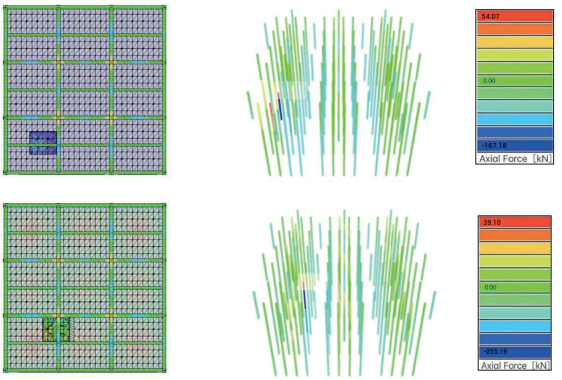
サポート有り重機縦向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



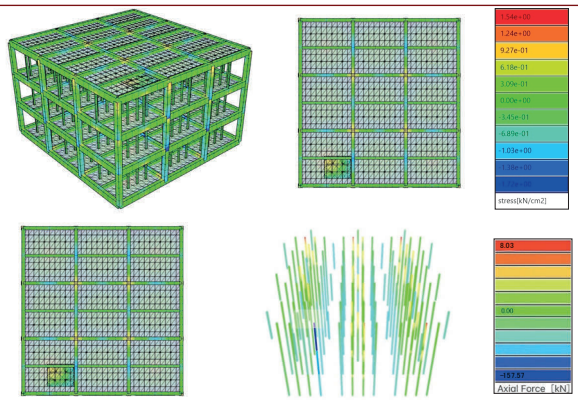
サポート有り重機横向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



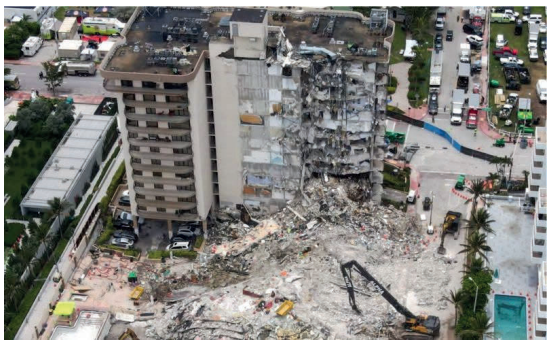
サポート有り重機横向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



サポート有り重機横向きのシミュレーション結果（0.45m³バックホウ）



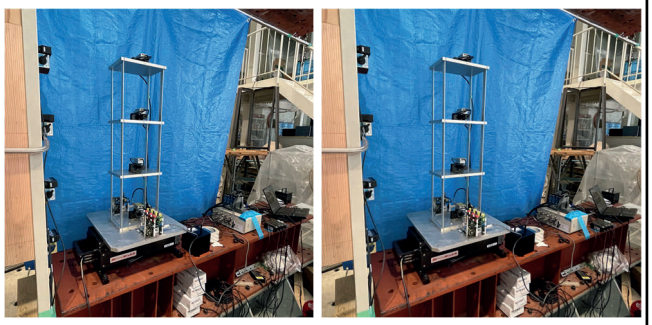
米住居ビル崩落



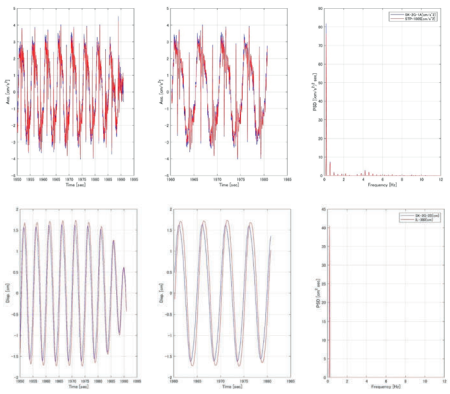
米マイアミ郊外で12階建てマンションが崩落

https://www.bbc.com/japanese/57717405

変位計の開発（実験の様子）



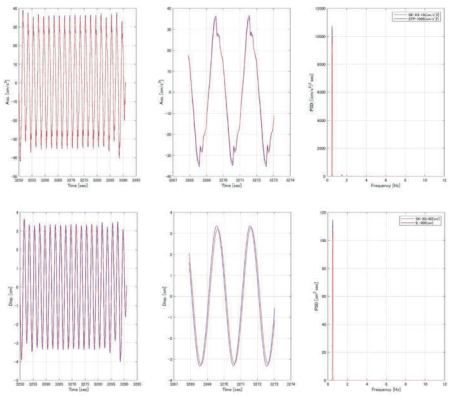
変位計の開発（0．2Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

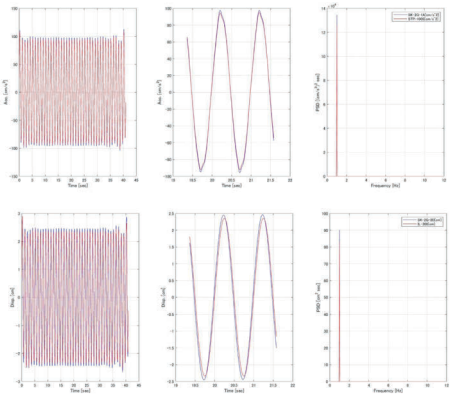
変位計の開発（0．5Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

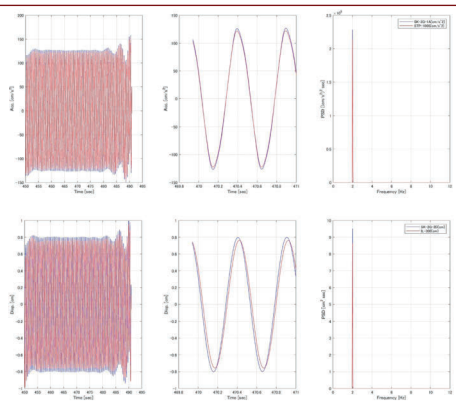
変位計の開発（1．0Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

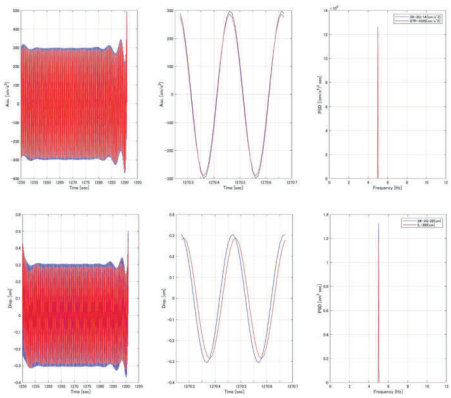
変位計の開発（2．0Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

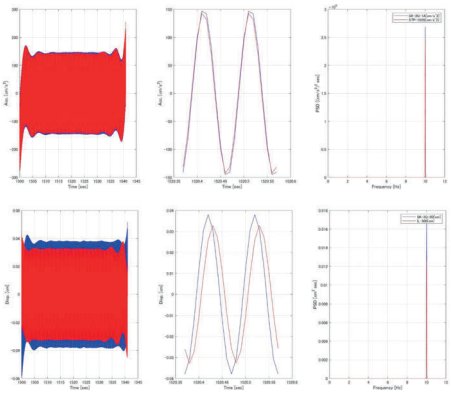
変位計の開発（5．0Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

変位計の開発（10．0Hz）



加速度計（SK-2G-1Aと STP-100S）の比較

変位（SK-2G-1Aとキーエンス IL-300）の比較

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）

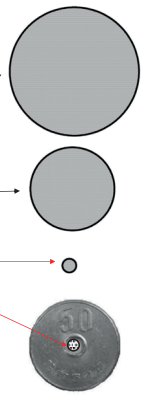
代表的な微破壊強度試験方法

（測定範囲が表面から内部）

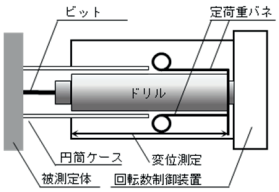
●コアドリル法（φ27mm以上）

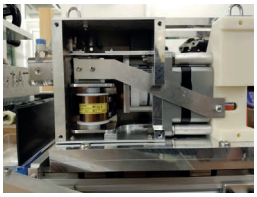
●ハンマードリル法（φ18mm）

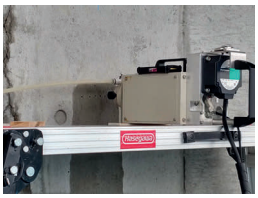
●小径ドリル法（φ3mm）

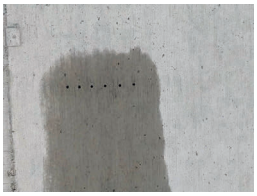


コンクリートの圧縮強度推定手法（小径ドリル型削孔試験）



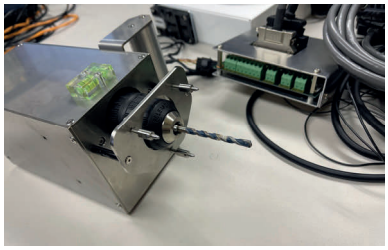






コンクリートの圧縮強度推定手法（小径ドリル型削孔試験）

- 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
- 。。。



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。

解体シミュレーションにあたっては、

- 井上 翼　君
- 山浦 裕起　君

の協力を得ました。

ここに記して感謝申し上げます。

解体工学の構築

日本大学生産工学部建築工学科 教授 湯浅 昇

1. 解体工事業の成立により見えはじめた「解体工学」～経験，試行錯誤を工学に～

2014年の建設業法の改定により，2016年，（公社）全国解体工事業団体連合会（以下，全解工連）会員の悲願であった「解体工事業」が新設された。行政，業界ともに新たな「解体工事」の姿を整備・模索しているところである。

江戸時代まで遡れば，建築と解体は今ほどはっきり分かれたものではなかったと思える。

そして，建築も解体も経験の蓄積，試行錯誤を経て，その当時の体系化が図られものといえるだろう。

明治維新を迎え，東京大学建築学科の前身である造家学科が設立され，それ以降，建築は，“あいまいさ”を含みスタートしながらも，今日では細部に至るまでしっかり工学となっている。

一方，解体はこの建築の工学化の中で取り残された。というよりは，半世紀は時間差をもって考えてよいものとして後回しにされた。

解体技術は，建築新技術との闘いの連続である。そして最近では環境問題とも闘っている。建築の成果，高度耐震化技術，高層化，高強度コンクリート…これらはいずれも解体の大問題である。あれだけ重宝し，使ってきた石綿…今では解体のハードルを押し上げてしまっている。

現時点で解体工事のあり方・工法を精査すると，建築工事に比べても工学になっていないところが多々みられる。言い換えると，建築工事も当初はそうであったが，技術として確立してはいても，それが試行錯誤の経験の上に築き上げられたまま運用されていることが多い。解体工事は，建築工事に比し，“あいまいさ”を含んだ工事管理をせざるを得ない現状といえる。

そのような中，日本建築学会では，「建築物の解体工事研究小委員会」を設置し，新時代の解体に即する仕様書を来春発刊する予定である。

2. 『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）』来春発刊予定

日本建築学会として，鉄筋コンクリート造建築物等の解体に関するはじめての施工標準として，「鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針（案）・同解説」（委員長：（故）笠井芳夫日本大学教授）が1998年に発刊されている（現在絶版）。しかしながら，2000年に施行された建設リサイクル法やアスベストの適正処理など，発刊された当時とは社会状況が変化してきており，現在の法規および実務では，対応しきれていない。

そこで，この改訂を目的に，私が委員長となり，コロナ禍を挟んだが5年にわたり改訂作業を行ってきた。

現在，一応完成し，校閲作業中である。来春発刊の予定である。発刊と同時に東京，名古屋，大阪で日本建築学会として講習会を開催することとしている。指針名，章立ては下記の通りである。

『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）』

1章　総則
2章　解体工事の性能および要求条件
3章　解体工法の種類および特性
4章　事前調査および事前措置
5章　解体工事計画
6章　施工
7章　建設副産物の処理

8章　特別管理産業廃棄物等の処理
9章　石綿含有建材の処理

3. 新指針で規定を断念した課題 ー工学として今後整理必須

『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）』（以下，新指針）での規定を断念した最大の課題として，階上解体のサポート設計が挙げられる。

例えば『建築構造設計指針』では，どう構造設計するかを規定することが大きな柱となっている。建築施工時には，想定や設定が容易な荷重だが，階上解体のサポート設計ではこの荷重から難しい。重機・アタッチメントそのものの静的荷重は容易に計算に乗せられるが，ガラは難しい。

根拠となる実測データも怪しい。設計上，安心して用いられる値，安全率を工学的に，泥臭く実際に計ったデータを多数集め，客観的に統計処理をするという過程がまだ必要である。こんなことも工学であり，極めて大きな意味をもつ。建築も今の体系となるにはこのような泥臭い実験が重ねられた。

また，重機・アタッチメントそのものの静的荷重はほぼ正確に入手できるが，重機の走行・作業による動荷重が静的荷重にどれだけの割り増しを見込む必要があるかは難しい。この場合，実測値を取るところからはじめる必要があるが，構造物の剛性，実測時のサポート状況に依存するはずであるから，それらを踏まえた，最後は政治判断ならぬ研究者判断，そしてその検証（指針にしてからも含む）が必要である。

階上解体で梁や柱の崩壊となると大変な話であるが，私は聞いたことはなく，階上解体における事故のほとんどは，スラブの抜け落ちであろう。建物を作り，運用していく立場からすると，梁に比し，スラブの構造的な信頼感は，解体時は著しく小さい。日本の耐震性能を担保した柱と梁の剛性は，スラブに比し極めて高く，解体時に柱・梁が崩壊するようでははじまらないと，思うのが我々の認識である。

一方，スラブの配筋は，雑という意味で不明確なところがあり，構造上信頼感が薄い。建設時や使用初期には穴であったスラブもあり，鉄筋の定着に信頼感は持てない。そればかりではない。スラブに点でサポートを立てるとサポート直上の曲げモーメントが大きくなる。しかし，本来，使用時のスラブは所々サポートされるわけでなく，荷重を直接梁に伝達するように設計されており，サポートを立てて解体作業した時の荷重に対する曲げモーメントを想定していない。きちんとした施工がされていても建設時の設計思想からすると，不利なのである。

上記の通り，柱・梁の耐力はある程度把握できても，スラブの耐力をスラブ個々に把握するのは難しい。いっそのことスラブに荷重がかからないようにして作業を行う試みをいろいろなところで聞く。先日，大阪の三同建設（株）で，まさしく荷重をスラブにかけずに梁に背負わせる“SDブリッジ”（**写真-1**）工法を見学し，作業の安全性向上，工期および経費削減に絶大な効果があることを確認させていただいた。もちろん柱・梁の剛性，スパンにもよるが，多くの場合，梁下のサポートも要らない場合もあると思いながら帰途についた。

スラブに荷重をかけない工法も含めて，荷重のかけ方，かかり方を工学的に検証することが必要である。

新指針が発刊される前に言うのもおかしいかもしれないが，5～10年後の次の改定では，日本建

写真-1　三同建設（株）のSDブリッジ

築学会が規定する階上解体サポート計算方法というものを提示し，計算を解体工事業者が自社内で行えるようにしたい。

4. 高強度コンクリート部材の解体のあり方の提案

「解体工事業」の立場からすると，私も含めて建築に携わる者は，少々，いや大分，解体しにくいコンクリート構造物を志向しすぎた。SRC造，CFT造，そして高強度・超高強度コンクリートを使用したRC造は，解体することが極めて困難である。

この10年，全解工連の研究助成を受けながら，180N/mm^{2}までの高強度・超高強度コンクリートを使用したRC造の解体のあり方を研究してきた。

まず，やはり経済的な圧砕工法でやりきれないかということになる。高強度域でも無筋なら圧砕刃で，石のようにすぱっと綺麗に割れる。しかし，かみ砕きは圧縮であり，確かに高強度コンクリートは手強い。だから，高強度域では圧砕刃の当て方に対し鉄筋の拘束が効く。一般の強度域だと鉄筋の周りを崩してから鉄筋を切断すればよいが，高強度域ではコンクリートを挟んだ力で，まず鉄筋が伸びたり切れないと刃が入っていかないのである。

実験としては，コンクリート強度180N/mm^{2}級の部材まで，既に流通している重機および圧砕アッタチメント（ただし能力最高レベル）で解体は可能であったが（**写真-2**），アッタチメントの負荷は尋常でなく，時間がかかり，騒音も大きく，重機の余裕がないことによる振動がひどかった。飛散するコンクリート片も鋭利であった。能力最大級の重機，アタッチメントでそうであるため，報告会でビデオを見られた解体工事業の実務の方からは，これを仕事で行うのは，機器の予想される損耗も考えると割にあわない，とする方がほとんどであった。

カッタおよびワイヤーソー（**写真-3**）での実験も行った後の2018年，それまでの研究のひと括りとして，おおまかではあるが私の考え方を提示した[1)]。

写真-2　180N/mm^2 級超高強度コンクリートの圧砕実験

写真-3　180N/mm^2 級超高強度コンクリートのワイヤーソーによる切断実験

①圧砕工法の経済活動に見合った現実的な採用限度は，実強度で50～60N/mm^{2}以下程度。それ以上ではアタッチメントに掛かる負荷が大きく，騒音・振動でNG。

②実強度で60N/mm^{2}を超えるコンクリート部材では，解体現場で，カッタもしくはワイヤーソー工法で対象部材をトラックに載せられる大きさまで切断し，搬出（超高強度・高強度レベルのコンクリートが使われている部材は，その建物の中では下層階の一部に限定され，そんなに多くはない）。

③部材のままリユースまたは作業フィールドで圧砕・破砕・分級の上，高級品質のリサイクル材（そのポイントはセメントリッチ／高強度再生骨材）に。

アッタチメントについては，その後，日本ニューマチック工業（株）とアタッチメントにかかわる応力などを検討している。

解体の前に立ちはだかるのは，コンクリートの高強度化だけではない。SRC造，CFT造は，鋼板・鋼管を圧砕工法で変形・切断させようとしてもその内側のコンクリートの圧縮力が効く。圧砕工法は，コンクリートをかみ砕き，鋼をその後切断する工法である。鋼が前面にあり鋼の変形・切断をその裏にあるコンクリートがその圧縮力で支えていては太刀打ちできない。

我々は，どえらいものを創ってしまっている。壊すにはこれからも英知が必要だ。

5. プレストレスト部材，ハイテンションボルトの銃弾級飛翔

プレストレストコンクリート造建築物では，スパンをとばす目的で，PC鋼材に大きな緊張力を導入している。緊張力が導入されている状況で，PC鋼材を切断すると，端部の留具が飛び出る恐れがある。また，切断により建物の応力状態が一挙に変わるため，注意が必要である。

また，鉄骨造の解体ではハイテンションボルトが飛翔する場合がある。

金属部材・金属片の飛び出し距離が，40mであったとか400mであったとかが報告されており，飛び出し速度は銃弾級である。

幸いなことにそれが当たって死傷したという報告は聞いていないが，公衆災害，労働災害の両面から不安を感じておられる方が多いことを実感する。今のところ，表だった行政指導に至っていないが，一度死傷事故が起きた時には，外壁の逆転倒事故と並ぶ重大事案になることは必至である。

これら金属部材・金属片を含めた，解体材の上屋からの飛散防止対策を講じる現場も見られるようになってきた。今のところ，コストや段取りの兼ね合いから試行錯誤している状況と思えるが，絶対に飛散させないことを目指した工学的な取り組みが必要な段階にきているように思う。

6. 解体工事に見合った構造物の劣化・崩壊度，構造耐力の評価方法の提案

解体対象構造物の劣化状況や崩壊状況を評価すること，前述の階上解体を行う場合などにおいて構造耐力を評価することは重要である。解体の場合には，これからまだ使っていく建物を評価する場合に比し，解体工事に見合った，コストパフォーマンスという観点は重要である。

「なんとなくいいだろう」では工学ではないし，安全を担保できない。解体工事に見合った何らかの工学的な評価軸を持つべきだろうと考える。

拠り所として，「非破壊試験」に目を当ててはどうであろうか。ただし，鉄筋コンクリート造を対象としている場合，「非破壊」は厳密に非破壊であることのみを意味しておらず，わずかな破壊を伴うことも許容範囲としている。また，「非破壊試験」の意味には“簡易な”，“安価な”，“速報性”を含んでいるというのが一般認識になっている。

今年の9月，私が委員長を務めた日本非破壊検査協会規格NDIS 3418「コンクリート構造物の目視試験方法」が改正されたばかりである。災害による崩壊建物は適用範囲ではないが，劣化状況の工学的評価には利用できるように思う。

また，構造耐力評価のうち，コンクリート強度については**表-1**[2)] が利用でき，鉄筋の径・配筋については機器を使うがNDIS 3429「電磁波レーダ法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法」，NDIS 3430「電磁誘導法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法」が利用できると思う。

7. 日本発信の「解体工学」の国際化

国際的に解体技術に関する最新の情報を得ようと検索をかけても，解体材の再利用に関する論文・解説は山ほど出てくる一方，解体技術そのものについては，ほとんどヒットしない。ヒットしてもあまりにも得るものがない陳腐な解説ばかりであり，外国においても解体に関する工学論文がないのには甚だびっくりする。

表-1　解体対象の構造体コンクリートに適用可能な強度に関する試験方法の種類と特徴

試験方法の種類			測定概要	長所	短所	備考
直接法	コア法	JIS法	コアを切り出し，コアを直接強度試験に供する	●直接強度を評価できる方法である	●柱・梁にはほとんどの場合適用できない ●直径の2倍の高さでコアを入手できないことがほとんどであり，補正を要する ●切断した骨材とペーストとの付着破壊が懸念される	●JIS A 1107，JIS A 1108で規格されている ●多くの場合，φ100mmコアが使われる ●測定された値は最も信頼性が高く，評価できるものと扱われることが多い
		小径コア法	JISに適用外の小径コアを切り出し，直接強度試験に供する	●直接強度を評価できる方法である ●柱・梁に適用できる ●直径の2倍の高さが確保されやすい ●目的に応じて，コンクリートの表層部と内部を分けて評価できる ●採取および採取後の補修がJIS法に比し容易である ●現場持ち込み可能な低荷重装置により現場で強度の評価が可能な方法である	●切断した骨材とペーストとの付着破壊がJIS法に比べてもさらに懸念される ●直径10cm高さ20cmの円柱供試体を基準と考えると小径であることの寸法効果が懸念される ●試験体が表層部のものなのか内部のものなのか混同せず，またそれを明示する必要がある	日本建築学会からCTM-14「コンクリートからの小径コアの採取方法及び小径コア供試体を用いた圧縮強度試験方法（案）」が提案されていたが，2022年末NDIS 3439「コンクリートからの小径コア採取方法及び小径コア供試体を用いた圧縮強度試験方法」が制定される
打撃法	反発度法	リバウンドハンマー法	コンクリート表面を打撃し，反発硬度もしくは反発速度比を測定する	●測定が簡便 ●被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる	●コンクリート表面近傍のみの性状が反映する ●15×15cm程度の測定面が必要なため仕上げを取り除き，面を平滑にする必要がある ●圧縮強度への推定には多くの影響要因を補正する必要があり，関係式も多く，試験方法として確立できていない	●最も普及している非破壊試験方法であり，JIS A1155およびNDIS 3438（2022年制定予定）の規格がある．ただし，ハンマー，強度を推定する方法は規格外である ●実務者，研究者の間では，竣工検査レベルでの強度推定にはある程度期待できるが，年月を経過した構造物では推定は困難であるとの評価がある。 ●日大では，反発度に影響を及ぼす深さは1～2cm程度までであることを示した ●最も普及しているN（R）型の他，P型（製造終了），新たにSilver型がある
		Leeb法	直径3mmのテストチップの付いたインパクトボディを所定の速度でコンクリート表面に衝突させ，その打撃速度および反発速度から硬さ値を求める	●計測機がコンパクトで測定が簡便 ●衝突エネルギーがリバウンドハンマーの2100～2300N・mmに対し11.5N・mmと小さい ●端部から5mm以上，隣接する測定点が3mm以上離れていれば測定ができ，供試体の寸法および形状の制限を受けにくい	●コンクリート表面近傍のみの性状が反映する ●測定面が必要なため仕上げを取り除き，面を平滑にする必要がある	●ASTM A 956 “Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products” において鉄の硬度を測定する方法として規格化されてた方法を日大・熊谷組がコンクリートの圧縮試験推定方法として整理・提案した ●3mm以内の表層のコンクリート品質が反映される
	引っかき傷法		引っかき試験器もしくは釘により，所定の荷重でコンクリート表面を引っかき，その時の傷幅をクラックスケールで測定する	●測定が簡便 ●被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる ●わずかである引っかき傷が残ることを許容できる場合，非破壊試験と位置付けられる ●脱型前のコンクリートを供すれば強度発現が評価できる ●内部のコンクリートとは相違することを前提に任意の時に表層劣化度を評価できる	●表面強度，表層劣化を評価するための方法であり，脱型前などはコンクリート強度発現を推定することも可能であるが，脱型後の乾燥の影響や劣化などを受けた場合，内部の強度までを推定できるものではない ●高い強度（30N/mm^{2}以上）域での推定は困難である	●日本建築仕上学会が床スラブの強度に関わる試験器として開発し，日大が構造体コンクリートの強度発現および表層強度試験方法として整理した．構造体コンクリートに直接引っかく方法と円柱供試体に適用できる方法がある ●三重大・名大では，荷重を考慮できる試験者により釘を用いて，極めて簡便に，多くのコンクリートを極短時間で評価する試験方法として提案している ●名城大では，コア側面に引っかき試験器を適用させ，コアの採取時におおよその強度評価が可能であり，有効であると報告している

試験方法の種類			測定概要	長所	短所	備考
打撃法	機械インピーダンス法		剛球などに加速度計または力センサを内蔵した打撃体に取っ手をつけたハンマー等により，反発過程の機械インピーダンスを測定する	● リバウンドハンマーの反発度が表層の塑性の影響を受けるとの問題点が指摘されているが，この方法ではコンクリート内部の弾性体と見なせる内部の反発速度から強度を求める原理となっている	● 測定面が必要なため仕上げを取り除く必要がある	● 日本非破壊検査協会により，NDIS3434-3“コンクリートの非破壊試験－打撃試験方法－第3部：機械インピーダンス試験方法”として，現在制定作業中である ● 反発過程の機械インピーダンスは，打撃体がコンクリートに衝突する反発過程において打撃体がコンクリートから受ける最大の力と打撃体がコンクリートから離れるときの速度の比と定義される ● 影響範囲は深さ100mm程度とされる
弾性波法	超音波法		コンクリートの超音波伝搬時間を測定し，コンクリートの音速を求める	● 被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる ● 同一箇所に繰り返し適用できる ● 大きな振動エネルギーと受信周波数の選定により，良好な測定が可能である ● コアもしくは2つのコア間の音速により深さ方向の分布を測定できる	● 材料・調合・材齢の影響を受ける他，表面の状態，含水率，ひび割れや内部空隙の有無，鉄筋量，配置などの影響を受ける ● 使用周波数を高くすると指向性は高くなるが，音波の減衰は大きくなる	● NDIS 2426-1“コンクリート構造物の弾性波による試験方法－第1部：超音波法”に規定されている ●（国研）土木研究所では同一平面に探触子を走査させ深さ方向の音速分布を把握し圧縮強度分布を評価している（表面走査法）
	衝撃弾性波法		測定する部位に振動検出器をあて，その近傍をハンマーで叩くことにより，衝撃弾性波伝搬速度を求める	● 被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる ● 同一箇所に繰り返し適用できる ● 超音波に比べても大きな振動エネルギーと受信周波数の選定により，良好な測定が可能である	● 材料・調合・材齢に影響を受ける他，表面の状態，含水率，ひび割れや内部空隙の有無，鉄筋量，配置などの影響を受ける	● NDIS 2426-2“コンクリート構造物の弾性波による試験方法－第2部：衝撃弾性波法”に規定されている ● 超音波法の上記表面走査法にならい同一平面に振動センサを走査させ深さ方向の弾性波伝搬速度分布を把握し圧縮強度分布を評価する試みがある
引き抜き法	ピン引き抜き法	ピン後付法	コンクリートに孔をあけ，特殊なアンカピンを挿入して耐力を測定する	● 打設時にあらかじめピンを埋め込む必要がない	● 不規則な円錐形の局部破壊痕を生じる ● 試験後に補修が必要	● CAPO試験，Internal Fracture試験，ESCOT expanding sleeve試験があるが，CAPO試験には特殊な削孔技術を要する
	引張法	表層引張法	正方形の鋼板をコンクリート表面に貼り付け，鋼板周辺に切り込みを入れ引張強度を測定する	● 切り込み深さに応じて測定できる	● コンクリートと鋼板の接着のため試験には最低2日を要する ● 試験後に補修が必要	● コンクリートに施した仕上げ材の接着試験への適用例が多い

これではまずい，日本の情報を世界に流そうと奮起し，この1年は私が過去2～3年に公表した解説等をもとに，全世界でいつでも検索可能で，即入手可能な査読付英文解説・論文を投稿してきた。既に以下の6編の解説・論文が掲載に至っている。

- Establishment and Prospect of Demolition Business in Japan[3)]
  https://www.cit.nihon-u.ac.jp/laboratorydata/kenkyu/publication/journal_a/a54.2.3.pdf
- Demolition of Skyscrapers in Japan[4)]
  https://www.cit.nihon-u.ac.jp/laboratorydata/kenkyu/publication/journal_a/a54.2.4.pdf
- The Transition of Demolition Techniques for Reinforced Concrete Structure in Japan[5)]
  https://www.cit.nihon-u.ac.jp/laboratorydata/kenkyu/publication/journal_a/a54.2.5.pdf
- Transition of Japanese Architectural Demolition “Kaitai” - Until the Establishment of the Tokyo Demolition Cooperative-[6)]
  https://www.cit.nihon-u.ac.jp/laboratorydata/kenkyu/publication/journal_a/a54.2.6.pdf

- Application of Crushing Method to the Demolition of High-strength and Ultra-high Strength Concrete Structure[7)]
  https://www.cit.nihon-u.ac.jp/laboratorydata/kenkyu/publication/journal_a/a55.1.1.pdf
- Effective Use Of Concrete Powder By-Produced From Recycled Aggregate[8)]
  International Seminar on Recycled Concrete, Sponsored by Niigata University and Japan Concrete Institute, pp.107-114, 2000.9

コロナ禍前の2019年5月に全解工連はEDA（European Demolition Association）の視察団を受け入れ，2020年に返礼視察団をダブリンに送り込む予定であった。日本の技術・状況の発信の機会として，訪問に備えてしかるべき準備を進めていきたい。

8. 来年夏からはじまる登録解体基幹技能者制度

全解工連では今年2月に国土交通大臣の登録を受け，令和5年度から「登録解体基幹技能者講習修了者」を資格認定することになった。私はその委員長を務めている。

資格認定登録解体基幹技能者とは，解体工事における中核的な役割として，熟達した技能と豊富な知識と経験に加え，現場を効率的にまとめる高度なマネジメント能力に優れた解体工事の技能者である。建設キャリアアップシステムの能力評価基準の最高位（レベル4）の資格として位置付けられ，解体工事における技能者の目標像として活躍が期待される。

解体工事施工技士が現場の管理を行う技術者であるのに対し，登録解体基幹技能者は，現場で作業員の指示・指導・統率をする技能者（上級職長）である。

資格取得のメリットとして，経営審査事項において加点評価（3点）の対象（解体工事施工技士資格では2点），総合評価落札方式での加点評価，建設業者の「優良技能者認定」が挙げられる。

登録解体基幹技能者の受講要件は，10年以上の実務経験を有し，職長経験3年以上で，解体工事施工技士であることが必須で，それらに加え，一級建築施工管理技士（登録解体工事講習修了者），一級土木施工管理技士（登録解体工事講習修了者），特定建築物の石綿含有建材調査者，建築物の石綿含有建材調査者，能力評価基準【解体】のレベル2の資格を満たす者，これらの5つの中から1つ以上の資格を有する必要がある。

登録解体基幹技能者になるには，受講条件を満たす者が2日間の講習を受講し，最後に講習の理解度を確認する試験に合格する必要がある。

全解工連では現在，鋭意準備を進めており，今のところ，全国5ブロックで，来年夏に講習会を行う予定である。

受講資格のある方には受講していただきたい全解工連の実施する新たな資格制度である。

【参考文献】

1）湯浅昇：高強度・超高強度コンクリートを用いた構造物の解体システムに関する研究，全国解体工事業団体連合会，平成30年度解体工事に関わる研究報告書概要集，pp.1-5，2018.7
2）湯浅昇：コンクリートの強度に関する非破壊・微破壊試験方法の現状，日本非破壊検査協会，非破壊検査，Vol.66, No.3, pp.119-128，2017.3
3）湯浅昇：日本における「解体工事業」の成立と展望，全国解体工事業団体連合会，令和2年度解体工事に関わる研究報告書概要集，pp.8-10，2020.7
4）湯浅昇：日本における超高層ビルの解体，全国解体工事業団体連合会，令和2年度解体工事に関わる研究報告書概要集，pp.17-18，2020.7
5）湯浅昇：鉄筋コンクリート（RC）造建築物の解体工法①鉄筋コンクリート造の解体工法の歴史，日本コンクリート工学会，コンクリート工学，Vol.54, No.2，pp.189-194，2016.2
6）高橋英孝・御子柴信也・小熊徳彦・湯浅昇：建築解体における歴史とその変遷ー東京解体協同組合発足までー，日本大学生産工学部第42回学術講演会（建築部会），pp.81-84，2009.12
7）湯浅昇：高強度・超高強度コンクリート構造物の解体負荷に関する研究，第41回セメント・コンクリート研究討論会，pp.67-72，2014.10
8）湯浅昇・笠井芳夫・松井勇・北野喜久：再生骨材製造過程で発生するコンクリート微粉末の有効利用に関する研究，第27回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.27-32，2000.11

持続可能な社会に帰する解体の方向性
―解体を工学に―

湯　浅　　昇*

1. はじめに

2014年の建設業法の改正により，2016年，「解体工事業」が新設された[1)]。行政，業界ともに新たな「解体工事」の姿を整備・模索しているところである。

43年ぶりに，追加された業であるが，そのあり方を鑑みると，他の26業種（全29業種）と異なり，「建築一式工事」，「土木一式工事」と並ぶ「解体一式工事」に移行すべきと思えてならない。

しかしながら，「解体工事業」は，「とび・土工業」の枠組みで運用されてきた実績があったからといっても，やはり新たな業であることには変わりがなく，役割範囲が確定した業となったからこそ，組織的にも，技術的にもそして社会貢献の観点からしても，細部にわたり詰め，発展していくことが急がれる。その礎にすべき観点が，私には「解体工事の工学化」であると思える[2)]。

本解説では，この秋にも発刊される日本建築学会「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）」の改定主旨，目次を紹介した上で，都市部解体のあり方として，階上解体，超高層ビルの解体，高強度コンクリート部材解体，解体材の飛散，周囲への環境配慮における課題を紹介し，持続可能な社会に帰する解体を目指した提言を，解体工事に見合った構造物の劣化・崩壊度・構造耐力診断，解体材のリユース・リサイクル，解体材の無害化，日本発信の「解体工学」の国際化の観点から述べるものである。

2. 建築解体指針改定

日本建築学会では，1998年，鉄筋コンクリート造建築物等の解体に関するはじめての施工標準として，「鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針（案）・同解説」（委員長：故笠井芳夫・日本大学教授）を発刊している（現在絶版）。しかしながら，2000年に施行された建設リサイクル法やアスベストの適正処理など，発刊された当時とは社会状況が変化してきており，現在の法規および実務では，対応しきれていない。

この改定を目的に，日本建築学会では，改定委員会（委員長：湯浅昇・日本大学教授）を設置し，コロナ禍を挟んだがこの5年にわたり改定作業を行ってきた。現在，校閲が終了し，最終調整段階であり，今秋発刊の予定である。

指針名，章立ては下記の通りである。

「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）」

1章　総則
2章　解体工事の性能および要求条件
3章　解体工法の種類および特性
4章　事前調査および事前措置
5章　解体工事計画
6章　施工
7章　建設副産物の処理
8章　特別管理産業廃棄物等の処理
9章　石綿含有建材の処理

3. 都市部解体のあり方

3.1 階上解体

都市部では，解体重機を設置する敷地がない場合があり，いわゆる「地上解体工法」（**写真-1**）を適用できない場合が多い。その場合，重機を屋上に揚げ，上階から順次解体（**写真-2**）し，自走で下まで降りていく「階上解体工法」を採ることになる。

階上解体では，重機がスラブの上を自走，解体作業を行うため，重機およびアタッチメント，コンクリートガラ（下に降りるときはこれで坂を作る）の荷重，そこに

写真-1　地上解体（全解工連提供）

＊　ゆあさ・のぼる／日本大学生産工学部建築工学科　教授

写真-2　階上解体（全解工連提供）

写真-3　階上解体直下階のサポート状況

写真-4　SD ブリッジ

走行および解体時の作業荷重が，スラブ，梁，柱に伝達する。これらの荷重は，建物の設計荷重を超えており，スラブ，梁の下にサポートを設置することになる（**写真-3**）が，時としてスラブの抜け落ちを起こす。日本の耐震性能を担保した柱と梁の剛性は，スラブに比し極めて高く，解体時に柱・梁が崩壊するようでははじまらないが，スラブは，雑という意味で不明確なところがあり，建設時や使用初期には開口であったところもあり，鉄筋の定着にも信頼感は持てない。

本来なら，指針で荷重の見積もり方，サポートの本数，間隔などを計算する方法を規定するべきところであるが，工学的なデータおよび検討が乏しく，今回の改定では見送っている。サポートを立てることは，新設時の構造計算からすると，部材の応力分布を全く想定しない形に変化させてしまうことも問題を難しくしている。

設計上，安心して用いられる値・安全率を工学的に，泥臭く実際に計ったデータを多数集め，客観的に統計処理するという過程が，解体ではまだ必要である。建築も今の体系となるにはこのような泥臭い実験，検討が重ねられたはずである。

柱・梁の耐力はある程度把握できても，スラブの耐力をスラブ個々に把握するのは難しい状況を鑑み，いっそうのこと，スラブに荷重がかからないように作業を行う試みがなされている。大阪・三同建設では，解体時の荷重をスラブにかけずに，梁に背負わせる「SD ブリッジ工法」（**写真-4**）を提案している。作業の安全性向上，工期および経費削減につながる技術と思える。柱・梁の剛性，スパンにもよるが，梁下のサポートが不要にもなり得る。

スラブに荷重をかけない工法も含めて，階上解体における荷重のかけ方，かかり方を工学的に検証することが必要である。

3.2　超高層ビルの解体

高度経済成長期に建設された超高層ビルの解体がはじまっている。今は，高層ビルの幕開け時代の S 造の超高層ビルが対象で，建物の劣化ではなく，再々開発が解体の動機となっているようである。

超高層ビル解体では，超高層だからこそなおさらとなる高所からの解体材・粉塵の飛散防止，作業時の耐震性，作業員の安全の確保，解体材の地上への引き下ろしが重要なポイントとなる。ゼネコン各社工夫を凝らし技術提案[3]，実績を積んでいるようである。通常規模の建築物解体に比し，結果として，総じてスマートな解体システムとなっている。

ただし，これらの解体システムは，S 造の初期超高層ビルだからこそ成立しているといえ，近年，建設可能となった超高強度コンクリートを使った超高層 RC 造ビルの解体は，現実的には難しい。コンクリート部材は鉄筋部材に比し，はるかに重く，壊しにくい。超高層 RC 造は，永久に壊さない計画を第一とすべきと，私自身は思うが，これを解体するとなると，所謂だるま落とし解体は重さと耐震性で NG であり，超高強度コンクリート解体技術（ただし上階まで一貫して超高強度コンクリートが使われているわけではない）を伴った（ただ壊すわけではない）超高層 RC 造階上解体技術開発が肝である。

3.3　高強度コンクリート部材解体

私も含めて建築に携わる者は，少々，いや大分，壊れない，そして解体しにくいコンクリート構造物を志向しすぎた。SRC 造，CFT 造，そして高強度・超高強度コンクリートを使用した RC 造は，解体することが極めて困難である。

私自身，この10年，180 N/mm^{2}までの高強度・超高強度コンクリートを使用したRC造の解体のあり方を研究してきた。

RC造の解体では，まず，やはり経済的な圧砕工法でやりきれないかということになる。高強度域でも無筋なら圧砕刃で，石のようにスパッと綺麗に割れる。しかし，かみ砕きは圧縮であり，確かに高強度コンクリートは手強い。だから，高強度域では圧砕刃の当て方に対し鉄筋の拘束が効く。一般の強度域だと鉄筋の周りを崩してから鉄筋を切断すればよいが，高強度域ではコンクリートを挟んだ力で，まず鉄筋が伸びたり切れないと刃が入っていかないのである。

実験[4),5)]としては，コンクリート強度180 N/mm^{2}級の部材まで，既に流通している重機および圧砕アタッチメント（ただし能力最高レベル）で解体することは可能であった（**写真-5**）が，アタッチメントの負荷は尋常でなく，時間がかかり，騒音も大きく，重機の余裕がないことによる振動がひどかった。飛散するコンクリート片も鋭利であった。能力最大級の重機，アタッチメントを駆使してもそのような状態であるため，解体工事業の実務の方にビデオを見てもらったところ，これを仕事で行うのは，機器の予想される損耗も考えると割にあわない，とする方がほとんどであった。

カッタおよびワイヤーソー（**写真-6**）での実験も行った後の2018年，それまでの研究のひと括りとして，おおまかではあるが私の考え方を提示した[6)]。

①圧砕工法の経済活動に見合った現実的な採用限度は，実強度で50～60 N/mm^{2}以下程度。それ以上ではアタッチメントに掛かる負荷が大きく，騒音・振動でNG。

②実強度で50～60 N/mm^{2}を超えるコンクリート部材では，解体現場で，カッタもしくはワイヤーソー工法で対象部材をトラックに載せられる大きさまで切断し，搬出。

③部材のままリユースor作業フィールドで圧砕・破砕・分級の上，高級品質のリサイクル材（そのポイントはセメントリッチ／高強度再生骨材）に。

解体の前に立ちはだかるのは，コンクリートの高強度化だけでない，SRC造CFT造では，鋼板・鋼管を圧砕工法で変形・切断させようとしても，その内側のコンクリートの圧縮力が効く。圧砕工法は，コンクリートをかみ砕き，鋼をその後切断する工法である。鋼が前面にあり，鋼の変形・切断を，その裏にあるコンクリートが，その圧縮力で支えていては太刀打ちできない。

我々は，どえらいものを創ってしまっている。壊すにはこれからも英知が必要である。

3.4　解体材の飛散

部材に力をかけた時に予期せぬ形で解体材が飛び跳ねる，落下する場面がないとはいえない。それが解体建物内に収まらず，建物の外へ飛び出す事態は，即公衆災害に繋がる。あってはならないことである。

写真-5　180 N/mm^{2}級超高強度コンクリートの圧砕実験

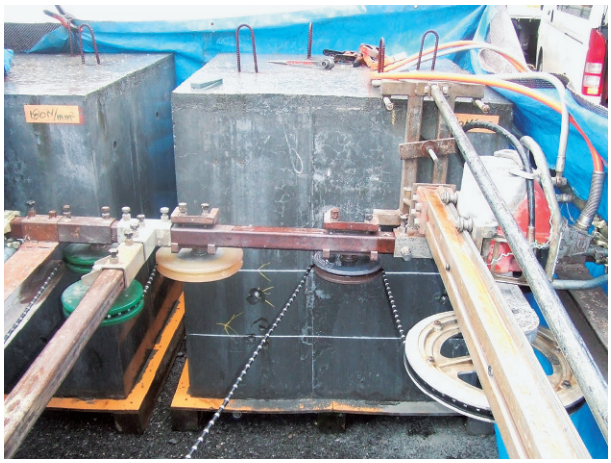


写真-6　180 N/mm^{2}級超高強度コンクリートの
ワイヤーソーによる切断実験

特に，プレストレストコンクリート造建築物では，スパンをとばす目的で，PC鋼材に大きな緊張力を導入している。緊張力が導入されている状況で，PC鋼材を切断すると，端部の留具が飛び出す恐れがある。切断により建物の応力状態が一挙に変わるため，注意が必要となる。

また，鉄骨造の解体ではハイテンションボルトが飛翔する場合がある。金属部材・金属片の飛び出し距離が，40 mであったとか，400 mであったとかが報告されており，飛び出し速度は銃弾級である。今のところ，表だった行政指導に至っていないが，一度死傷事故が起きた時には，外壁の逆転倒事故と並ぶ重大事案になることは必須であろう。

これら金属部材・金属片を含めた，解体材の上屋からの飛散防止対策を講じる現場も見られるようになってきた。今のところは，コストや段取りの兼ね合いから試行錯誤している状況と思える。**写真-7**は，竹中工務店提案のスライド式全面屋根養生工法であり，屋根養生を開閉できるので，クレーンを用いた解体重機の下階への降下を可能としている。

写真-7　スライド式全面屋根養生工法
（竹中工務店提供：階上解体にて）

解体材を絶対に飛散させないことを目指した工学的な取り組みが必要な段階にきている。

3.5　周囲への環境配慮

人口が密集する都市部における粉塵，騒音，振動の抑制は大きな課題であり，解体工事計画上，重要な観点となる。

とりわけ石綿に関する規制は，近年，厳しさを増す一方であり，解体工事はその対応に追われている状況である。高層建物では，高所で石綿等粉塵を飛散させてしまうと，その影響エリアは高さに応じて広範囲なものとなり，だるま落とし工法の低層での解体，解体階を囲いで覆う解体は，超高層ビル解体工法の重要なポイントとされている[3]。

都市部では，土地の高度利用が行われているため，商業施設，集合住宅が解体建物と近接する。振動，騒音の少ない工法が切望される。

4.　持続可能な社会に帰する解体を目指した提言

4.1　解体工事に見合った構造物の劣化・崩壊度，構造耐力診断～非破壊試験を駆使して

解体対象構造物の劣化状況や崩壊状況を評価すること，前述の階上解体を行う場合などにおいて構造耐力を評価することは重要である。解体の場合には，これからまだ使っていく建物を評価する場合に比し，解体工事に見合った，コストパフォーマンスという観点は重要である。

「なんとなくいいだろう」では工学ではないし，安全を担保できない。解体工事に見合った何らかの工学的な評価軸を持つべきだと考える。

拠り所として，「非破壊試験」に目を当ててはどうであろうか。ただし，鉄筋コンクリート造を対象としている場合，「非破壊」という言葉は，厳密に“破壊しない”ことを意味してなく，わずかな破壊を伴うことも範囲としている。また，「非破壊試験」の意味には“簡易な”，“安価な”，“速報性”を含んでいるというのが一般認識になっている。

写真-8　再生骨材製造時に副産する微粉

昨年９月，日本非破壊検査協会規格 NDIS 3418「コンクリート構造物の目視試験方法」が改正された[7]。あわせて，「コンクリート構造物の目視試験方法ガイドブック—NDIS 3418 対応—」[8] が発刊された。劣化状況の工学的評価に利用できる。

また，構造耐力評価のうち，コンクリート強度[9] については NDIS 3439「コンクリートからの小径コアの採取方法及び小径コア供試体を用いた圧縮試験方法」[10] が，鉄筋の径・配筋については，機器を使うが，NDIS 3429「電磁波レーダ法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法」，NDIS 3430「電磁誘導法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法」が有用と思う。

4.2　解体材のリユース，リサイクル

コンクリート塊の再資源化率は，最近では常に 99％以上を達成しているが，本来的な意味では再資源化が進んでいないといわれる。再生骨材製造技術は，成熟しているともいえるが，再資源化率は，路盤材としての利用に偏って高い値を維持できているにすぎない。なかなかコンクリート塊をコンクリートの骨材として再利用する方向に進んでいない。

これは，セメントペースト部分を多く含む一般再生骨材では，吸水率が高く，乾燥収縮によるひび割れを制御できていないからである。セメントペーストをほぼ排除し，原石を取り出す技術も複数提案されているが，処理コスト増大と，更なる微粉分を排出させる。コンクリート微粉（**写真-8**）の再利用[11),12)] は難しく，コンクリートのリサイクルの究極な問題と指摘する声は，世界各国で聞くところである。

再利用をはかるコンクリート塊には，石綿を付着させないことを前提に，例えば，今は炭カル（炭酸カルシウム）を充填材にしている塗膜などの塗りもの系建築材料に微粉を使うことを真剣に考えてもらえないだろうか。

一般再生骨材も，今・これからの技術で更に処理し，吸水率をなくせないだろうか。安価な不透湿性樹脂を簡易に絡ませるなどして，実現できないだろうか。そして，コンクリート塊の破砕，優良な再生骨材製造・処理は一貫して解体現場で行えないだろうか…。そうなれば，解体建物に人の想いが籠もっていたものであれば，再生骨

材が後継新築建物にその想いがつなげられる。建物は，人の想い入れがその価値を高める[13]。

前述の“高強度コンクリート解体”では，圧砕工法には限界があり，実強度 50～60 N/mm^2 以上の高強度コンクリートが使われている部材については，現在では費用が嵩むもののワイヤーソー，カッタ工法を採用してはとの提案を紹介した。これが採用できれば，プレキャスト部材を使う技術が成熟している現在なら，切り出した高強度で，耐震性，耐久性の高い部材の再利用を模索することが可能である。

戦国時代，城の櫓，門，石垣に至るまで，解体・移築を得意としてきた日本である。建物の壊し・移築を専門に行う業者がでてきたのは，明治初期頃だとされている。明治初期，当時は木材が高価かつ不足していたため，中古材の需要は高まり，次第にそれらを売買する市場が形成された。古材は，新材のおおよそ７割程度の価格で取引されていたとされる。そのため木材を傷つけないで壊すという精神は徹底されていた[14]。

この形態は，木造解体についてでさえ，失われてきたが，その後西洋から持ち込まれた鉄筋コンクリート造の解体では，部材レベルで似たようなことを全く見ることがないままである（ただし鉄筋をきれいに取り出して小銭稼ぎをしたという伝聞はある[15),16]）。

持続可能な社会の実現に向けて機運が高まり，周辺技術も成熟している今日，向かうべき姿なのではないだろうか。

4.3　解体材の無害化

解体の際，排出される廃棄物には，特別管理廃棄物の分類として，廃石綿，廃 PCB，廃油がある。これらの物質は，とにかく，無害化することが，持続可能な社会の実現に直結する。廃石綿は，現在，管理型最終処分場で埋め立て処分することになっているが，これが無害化され，充填材等としてリサイクルのシステムにのれれば，石綿問題は，処分問題まで一挙に解決の方向に向かう。安価で簡易な無害化技術の開発が急がれる。

4.4　日本発信の「解体工学」の国際化

国際的に，解体技術に関する最新の情報を得ようと，検索をかけても，解体材の再利用に関する論文・解説は山ほど出てくる一方，解体技術そのものについては，ほとんどヒットしない。ヒットしてもあまりにも得るものがない陳腐な解説ばかりであった。外国においても解体に関する工学論文がないのには甚だびっくりする。

高い技術力を背景に建設された日本の構造物，これらを壊すことを目的に展開されている日本の解体技術は，世界の関心事である[17]。この１年，ウクライナの戦災，トルコの震災を目の当たりにしている。解体がそこからの復興の第一歩であることは，日本のこれまでの歩みから明白だ。日本発の「解体工学」に裏付けられた技術力は，国際社会に末永く貢献し得るものである。

この２年，私は，日本の解体技術を英文で紹介する活動を進めている[1),3),5),10),14),16]。

5.　おわりに－解体を工学に

江戸時代まで遡れば，建築と解体は今ほどはっきり分かれたものではなかった。建築も解体も経験の蓄積，試行錯誤を経て，体系化が図られてきた。

明治維新を迎え，東京大学建築学科の前身である造家学科が設立され，それ以降，建築は，“あいまいさ”を含みスタートしながらも，今日では細部に至るまでしっかり工学となっている。

一方，解体は，この建築の工学化が進む中で取り残された。というよりは，半世紀は時間差をもって考えてよいものとして後回しにされた。

解体技術は，建築新技術との闘いの連続である。そして最近では環境問題とも闘っている。建築の成果，高度耐震化技術，高層化，高強度コンクリート…。壊す立場の解体にとっては大問題となっている。あれだけ重宝し使ってきた石綿…。これも解体のハードルを上げてしまっている。

今の時点で解体工事のあり方・工法を精査すると，工学になっていないところが目につく。言い換えると，技術として確立してはいても，それが試行錯誤の経験の上に築き上げられたまま運用されている。未だ“あいまいさ”を含んだ工事管理をせざるを得ない現状といえる。

社会循環型社会の実現を目指すためにも，今こそ解体工事の工学化を根幹に据えて，ことを運ぶべきである。

参考文献

1）Noboru YUASA：Establishment and Prospect of Demolition Business in Japan, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.21-28, 2021. 12
2）湯浅　昇：解体工学の構築，月刊積算資料公表価格版，No.236, pp.70～76，（一財）経済調査会，2022. 11
3）Noboru YUASA：Demolition of Skyscrapers in Japan, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.29-34, 2021. 12
4）湯浅　昇：高強度・超高強度コンクリート構造物の解体負荷に関する研究，第 41 回セメント・コンクリート研究討論会，pp.67～72, 2014. 10
5）Noboru YUASA：Application of Crushing Method to the Demolition of High-strength and Ultra-high Strength Concrete Structure, Journal of the College of Industrial Technology, Nihon University, Vol.55, No.1, pp.1-10, 2022. 6
6）湯浅　昇：高強度・超高強度コンクリートを用いた構造物の解体システムに関する研究，全国解体工事業団体連合会，平成 30 年度解体工事に関わる研究報告書概要集，pp.1～5，2018. 7
7）小林幸一・小林信一・湯浅　昇：日本非破壊検査協会 NDIS 3418「コンクリート構造物の目視試験方法」の改正，コンクリート工学，Vol.61，No.3，pp.213～218，日本コンクリート工学会，2023. 3
8）㈳日本非破壊検査協会コンクリート構造物の目視試験方法に関するガイドブック編集委員会（委員長：湯浅　昇）：コンクリート構造物の目視試験方法ガイドブック―NDIS 3418 対応―，㈳日本非破壊検査協会，2022. 10. 1
9）湯浅　昇：コンクリートの強度に関する非破壊・微破壊試験方法の現状，非破壊検査，Vol.66，No.3，pp.119～128，日本非破壊検査協会，2017. 3
10）日本非破壊検査協標準化委員会：NDIS3439 制定の報告，非破壊検査，Vol.72，No.2，会告 p.4，日本非破壊検査協会，2023. 2

11） 湯浅　昇・笠井芳夫・松井　勇・北野喜久：再生骨材製造過程で発生するコンクリート微粉末の有効利用に関する研究，第27回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.27～32，2000. 11
12） Yoshio KASAI, Noboru YUASA：EFFECTIVE USE OF CONCRETE POWDER BY-PRODUCED FROM RECYCLED AGGREGATE, International Seminar on Recycled Concrete, Sponsored by Niigata University and Japan Concrete Institute, pp.107-114, 2000. 9
13） 湯浅　昇：人の心をつなぐコンクリート，p.13，コンクリート工業新聞，1999. 11. 18
14） Noboru Yuasa and Tokuhiko Oguma：Transition of Japanese Architectural Demolition "Kaitai" ―Until the Establishment of the Tokyo Demolition Cooperative―, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.43-48, 2021. 12
15） 湯浅　昇：鉄筋コンクリート（RC）造建築物の解体工法①鉄筋コンクリート造の解体工法の歴史，コンクリート工学，Vol.54，No.2，pp.189～194，日本コンクリート工学会，2016. 2
16） Noboru YUASA：The Transition of Demolition Techniques for Reinforced Concrete Structure in Japan, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.35-42, 2021. 12
17） Lauritzen, E. K.：Construction, demolition and disaster waste management, an integrated and sustainable approach, Boca Raton, USA, CRC Press., 2019

解体工事の安全

湯浅　昇（ゆあさ　のぼる）
日本大学生産工学部建築工学科　教授

1. はじめに

解体工事を取り巻く、ダンピング受注や下請け企業へのしわ寄せを元凶とした離職者の増加・若年入植者の減少による将来の担い手不足の懸念、維持更新時代に対応した適正な施工体制の確保を背景として、建設業法が 2014 年、43 年ぶりに改定され、2016 年、「解体工事業」が新設された [1]。行政、業界ともに新たな「解体工事」の姿を整備・模索している [2) 3)]。

一方で、解体技術は、建築新技術との闘いの連続である。そして最近では環境問題とも闘っている。高度耐震化技術、高層化、高強度コンクリート、壊す立場の解体にとっては大問題となっている。重宝し使ってきた石綿も解体のハードルをすっかり上げてしまっている。

これらの課題は、解体工事の安全を揺るがしかねない問題をも秘めている。

本解説では、筆者らがまとめた労働災害の分析、解体工事業者への実態に関するアンケート分析、この秋にも発刊される日本建築学会「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）」の主旨・目次を紹介し、最後に安全にもかかわる解体工事の技術課題に迫るものである。

2. 解体工事における事故の実態

「解体工事業」の創設の根拠の一つとして、国土交通省は、公開ホームページで、表 1 の解体工事における事故等の発生事案を示している。

建設業における労働災害は、1962 年（昭和 37）の 137,282 人をピークに減少し続け、2006 年（平成 18）には 26,872 人となっている [4]。死亡者数に限っても、1961 年（昭和 36）の 2,652 人をピークに減少し続け、昭和 50 年（1975）代後半以降死亡者数は 1,000 人前後で推移し、2006 年（平成 18）には 508 人まで減少している。しかし、解体工事における労働災害については、近年減少がみられない。その時点では、解体工事業が業として成立

表１　解体工事における事故等の発生

	日時	工事の概要	事故の概要	被害
公衆災害	平成15年3月13日	8階（地下1階、地上7階）建ての建物の解体工事（静岡県富士市）	外壁部分の鉄骨を内側からワイヤーで固定する前に、既存の鉄筋を切断したため、5階部分の外壁の一部（縦3m×横15m）が公道（県道吉原停車場・吉原線）に崩落。	・作業員2名が墜落死。 ・県道信号待ちの車の搭乗者4名が崩落した外壁の下敷きとなり、車内にいた2名が死亡、2名が負傷。
公衆災害	平成16年2月28日	ビルの解体工事（東京都立川市）	重機のアームで2階部分の壁を挟み、歩道と反対側に引き倒そうとした際、アームから壁が外れて歩道に崩落。	・自転車で通りかかった男性1人が軽いけが、破片が飛び散り走行中の自動車6台に傷がついた。
公衆災害	平成16年12月6日	ホテルの解体工事（北海道旭川市）	2階から4階の建物外壁部分（高さ約10m×幅約24m）をワイヤーにて内側に引き倒す作業中、ワイヤーが切れ道路側に崩落。	・走行中の車1台が下敷き。 ・なぎ倒した電柱4本が路上に駐車中の車3台に激突。 ・一時周囲の約300戸で停電。
公衆災害	平成20年7月3日	木造2階建て建物の解体工事(東京都品川区)	解体建物が傾き、外壁を覆っていたシートと足場の金属製パイプが、隣接するJRの線路上に落下。	・JR線24本が運休し、計約6万人に影響。
公衆災害	平成22年10月14日	アルミ加工工場の解体工事（岐阜県岐阜市）	作業中のクレーンの先端が、壁に固定されていた足場にひっかかり、外そうとする動きをした直後、コンクリート製の外壁が高さ約11m、幅約18mにわたって道路（市道）側に倒壊。	・自転車で通りかかった女子高生が倒壊した壁の下敷きとなり、死亡。
公衆災害	平成26年4月3日	ビルの解体工事（兵庫県神戸市）	作業中、鉄骨がつかみ機から抜け、その反動で鉄骨が道路側の足場に倒れ、足場とともに道路に崩落	・通行人2名が負傷（うち1名は首の骨を折る重傷）。
環境	平成23年11月13日～28日	ホテルの解体工事（宮城県仙台市）	9階建てのホテルを解体するにあたりアスベストを除去しないまま作業を開始した箇所があった。	・ホテル敷地境界でWHOが定める基準値（大気1リットルあたり10本）を上回るアスベストが検出。
労働災害	平成23年12月	平屋工場（鉄骨造）の解体工事（長野県）	屋根の上で屋根を固定しているフックとナットを取り外す作業を歩み板、防網などの踏み抜き防止措置が講じないまま行っていたところ、墜落。	・屋根材を踏み抜き、高さ約10m下のコンクリート床面に墜落し、死亡。 （※）踏み抜き事故、他多数。
労働災害	平成24年2月17日	地上4階建てのビルの解体工事（東京都新宿区）	4階建てのビルの解体工事において、壁の梁を建物内に倒す予定が何らかの理由で外側に倒れ、落下。	・1名が壁の下敷きになり死亡 ・1名が転落し骨折。 （※）建材等の落下等の事故、他多数。

していない状況下であるが、解体工事業の市場規模が建設業界全体のそれの 1～2%に過ぎないことなどを考慮するならば、建設工事全体の死亡者数に対する解体工事のその割合が平均しても 5%超であり、さらにそれは上昇傾向にあった。

2．1　死亡災害の種類別発生状況

筆者らは、「解体工事業」成立前の 2009 年、建設業労働災害防止協会が発行している建設業安全衛生年鑑[5]を基に、1998 年度から 2002 年度までの 5 年間における解体工事に伴う事故災害の状況を考察している[6]。

図 1 は、1998（平成 10）年度から 2002（平成 14）年度までの 5 年間の解体工事における死亡災害数を抽出したのものである。解体工事では、墜落が最も多く、次いで倒壊と建設機械によることが多くなっている。

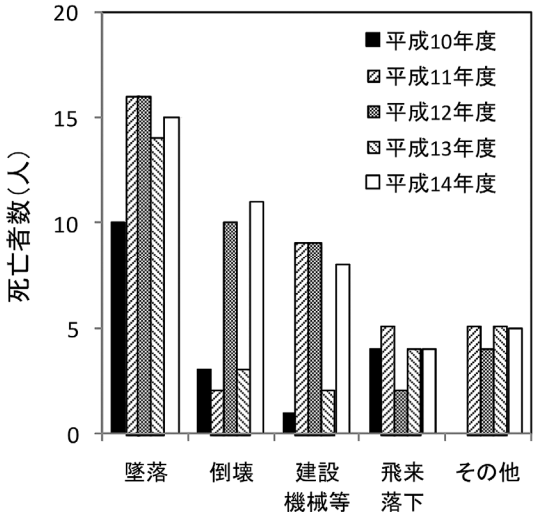


図 1　解体工事における死亡災害の種類

表 2　死亡災害の発生の都道府県

	都道府県	死亡者数(人)（H10 年度～H14 の合計）
1 位	東京都	29
2 位	大阪府	17
3 位	茨城県	10
4 位	静岡県	9
5 位	千葉県	8
5 位	埼玉県	8
7 位	神奈川県	7
7 位	兵庫県	7
7 位	福岡県	7
10 位	広島県	6

表 2 は、1998（平成 10）年度から 2002（平成 14）年度までの 5 年間で、解体工事における死亡災害数（死亡者数）の都道府県別発生状況を示したものである。都市部に多い。

2．2　労働災害と年齢、経験

筆者らは、また「解体工事業」成立前の 2008 年、社団法人全国解体工事業団体連合会から発行された「解体工事における労働災害事例集」[5]を分析し、労働災害と年齢・経験の関係について考察している[7]。

図 2 は、解体工事における労働事故発生件数を年齢別で割合を示したものである。50～59 歳が 31%と突出して多くなっている。図 3 は、事故発生件数を経験年数別で割合を示している。経験年数 10 年未満が全体の半数以上を占めており、10 年を超えると労働災害が減少する傾向がある。図 4 は、50 歳以上の労働災害者の経験年数の分布を示したものであり、50～59 歳では 30%以上、60 歳以上でも約 20%が経験年数 10 年未満であり、熟練者とはいえない高年齢の方が相当数おられることがわかる。

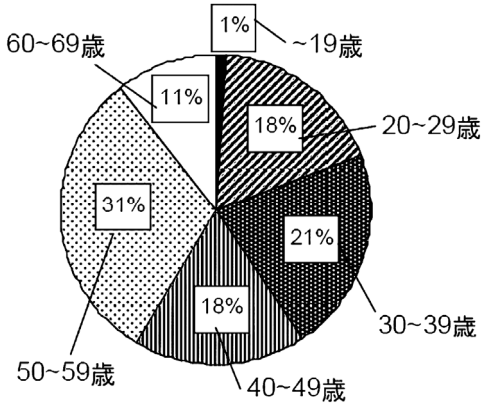


図 2　年齢別事故発生割合

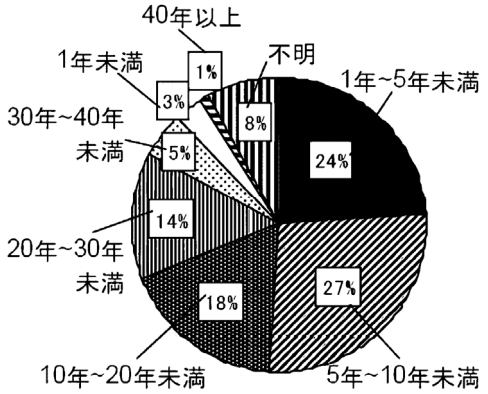


図 3　経験年数別事故発生割合

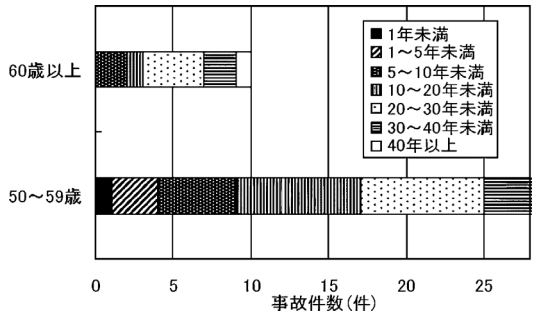


図 4　年齢と経験年数の関係（50 歳以上の場合）

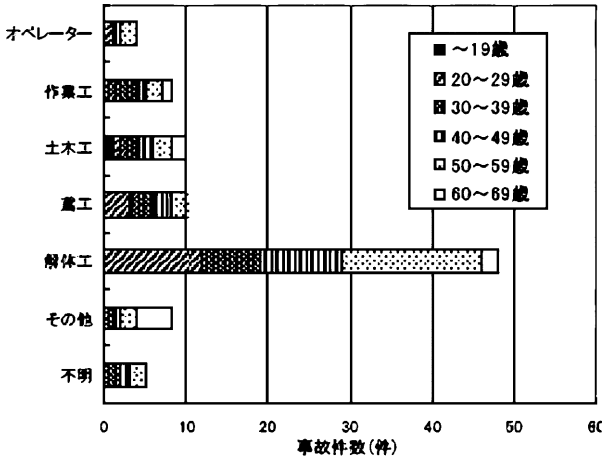


図 5　職種と年齢の関係

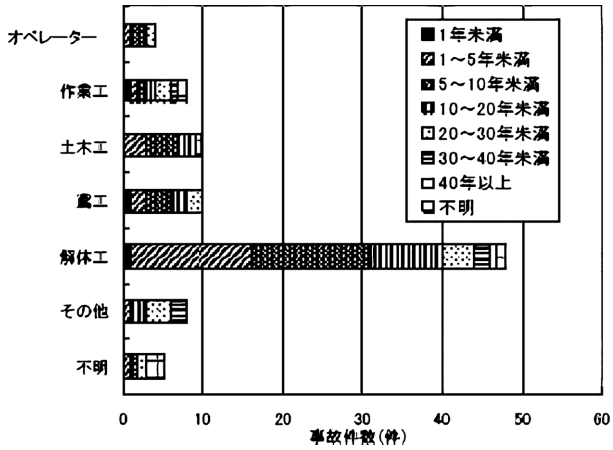


図 6　職種と経験年数の関係

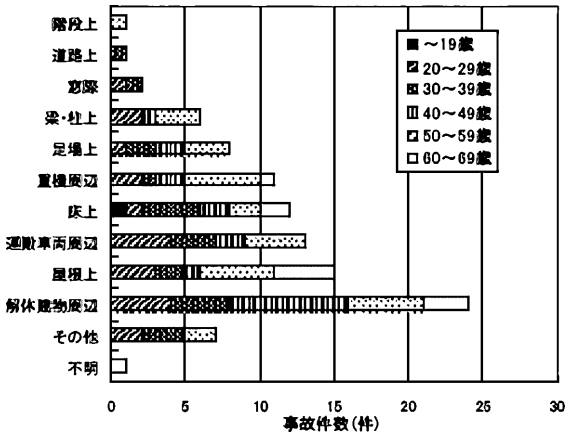


図 7　事故発生場所と年齢の関係

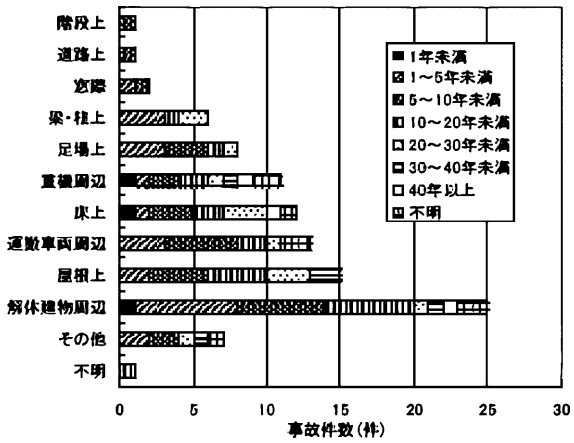


図 8　事故発生場所と経験年数の関係

図 5、図 6 は、労働事故の発生件数を職種別にまとめたものである。図 5 をみると、鳶工を除けば、労働災害者の 4 割以上が 50 歳以上であり、鳶工でさえ約 2 割が 50 歳以上となっている。また、図 6 より、作業工は 4 割程度であるが、他の職種では、労働災害者の 6 割強が経験年数 10 年未満であった。また、年齢が 50 歳以上でも経験年数が 10 年未満であることもあり、年齢と経験年数は必ずしも比例関係になく、こうした背景が解体工事従事者の事故の原因の一因となっているものと思われる。

図 7、図 8 は、労働事故の発生場所について、年齢、経験年数の分布を示したものである。図 7 によると、梁柱上、重機周辺、屋根上において、50 歳以上による事故が 50%～60%となっている。また、図 8 によれば、更に高齢作業者の事故が多かった梁柱上、重機周辺、屋根上をみると、経験年数 10 年未満の作業員の占める割合はどれも 50 歳以上の占める割合よりも小さく、高所作業を伴う場合は、経験年数よりも年齢の方が大きな労働災害の要因であると考えられる。

図 9、図 10 は、労働事故発生時の作業内容と、その年齢、経験年数の分布を示したものである。撤去、搬出の作業や作業位置が高い作業の事故件数が多いことがわかる。図 9 より設備の撤去、躯体の解体、屋根材の撤去の作業においては、50 歳以上の労働災害が 50%を超え、内外装の解体では 30～50 歳未満が占める割合が高い傾向にあった。図 10 から経験年数が 10 年未満の場合非常に多く、内外装の解体においては約 70%、屋根材の撤去は最も割合が低いが 40%を超えている。これらより、

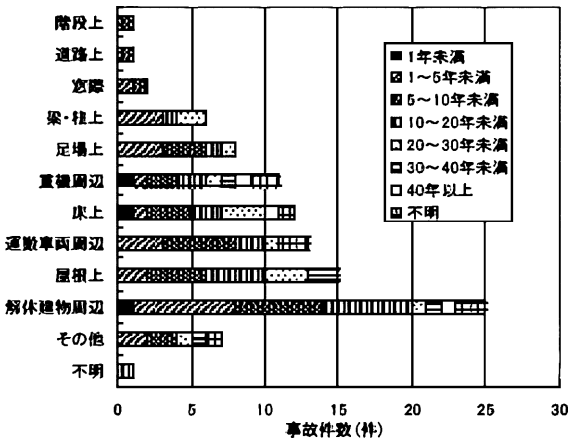


図 9　作業内容と年齢の関係

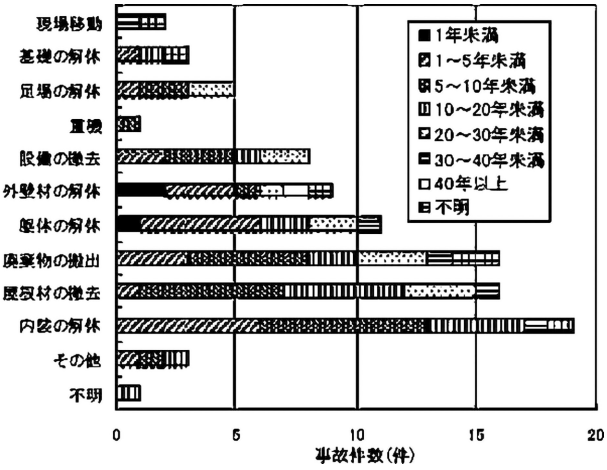


図 10　作業内容と経験年数の関係

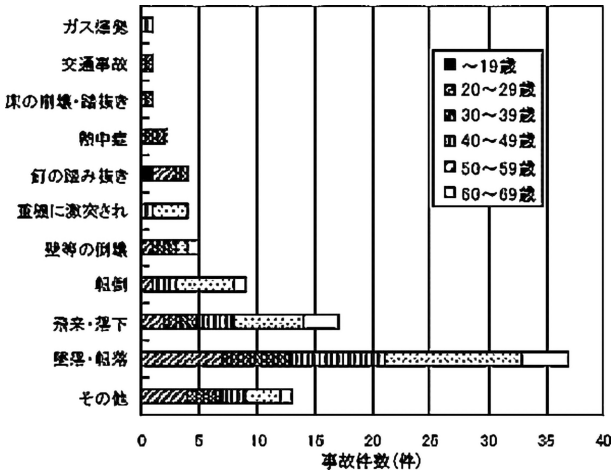


図 11　事故種別と年齢の関係

解体作業は経験を積むこと、また経験が浅くても安全に作業できる環境作り教育が重要である。

図 11、図 12、労働事故の種別と、その年齢、経験年数の分布を示したものである。墜落・転落が大半を占めている。次いで飛来・落下などの事故が多くなっている。図 11 をみると、転倒、墜落・転落、飛来・落下などの事故はいずれも 50 歳以上

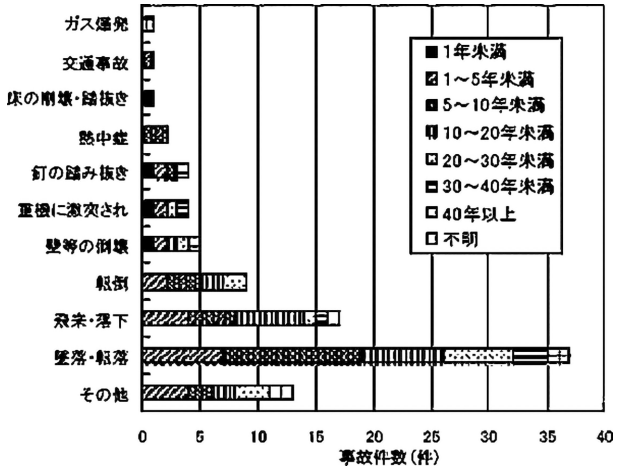


図 12　事故種別と経験年数の関係

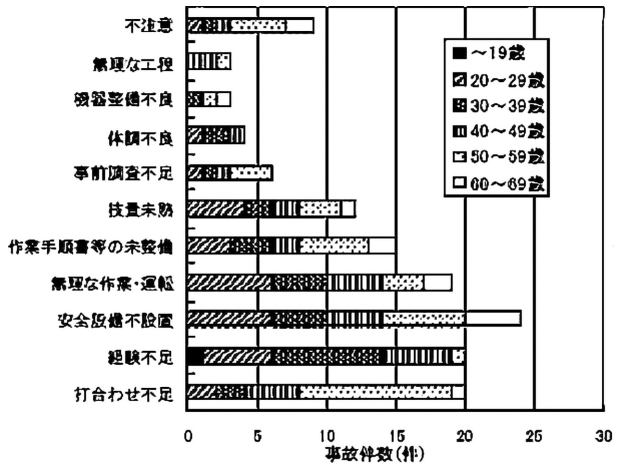


図 13　事故原因と年齢の関係

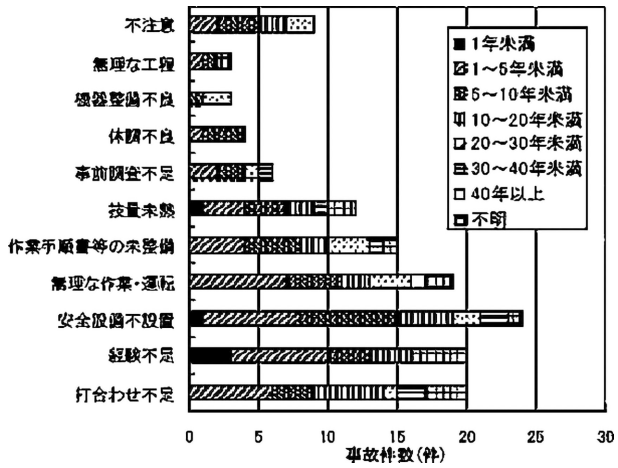


図 14　事故原因と経験年数の関係

の事故が 40%を超えており、壁等の倒壊や踏み抜きなどの事故種別については、年齢の老若による差はない。図 12 より、踏み抜き事故では経験の未熟者が多く、どの事故においても経験年数 10 年未満が約 50%となっている。

図 13、図 14 は、労働事故発生の原因別に、年

齢、経験年数の分布を示したものである。労働事故発生の原因は技量未熟や経験不足、体調不良などの改善が難しい事故に比べ、安全設備不設置、無理な作業・運転、打ち合わせ不足など改善が見込める事故原因が多いことが特徴である。図 13 より事故発生の原因を年齢別にみていくと、不注意ならびに打合わせ不足が 50 歳以上で突出して多い以外は平均的に分布している。図 14 より、経験年数が 10 年以上でも経験不足や技量未熟が原因のこともあり、解体工事従事者の教育が不十分であることが伺える。

3.「解体工事業」成立以前の解体工事の実態

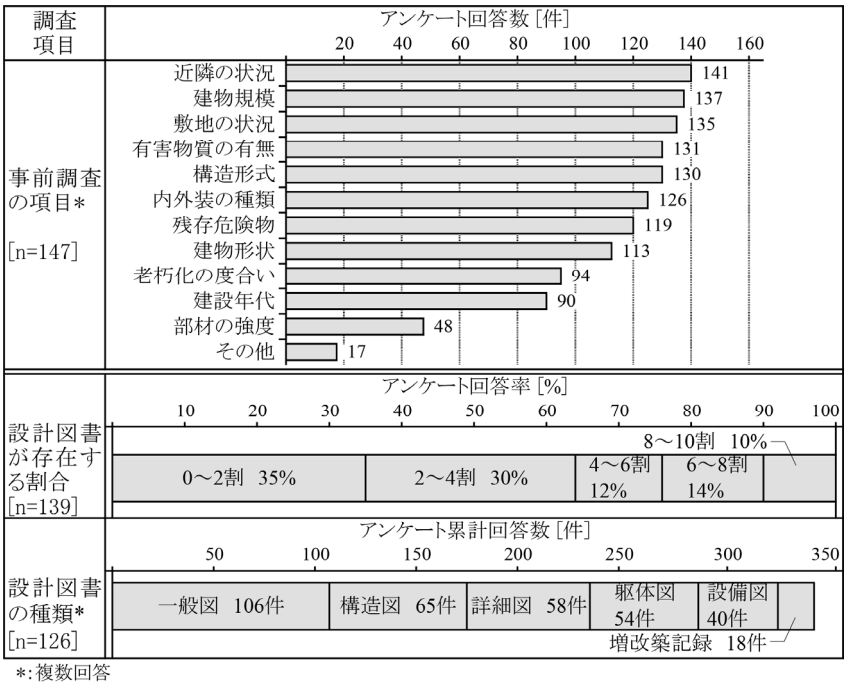
「解体工事業」成立以前、解体工事は、「とび・土工業」の枠組みで運用・実施されてきた。

著者らは、「解体工事業」成立以前の 2009 年～2010 年、その直近 3 年間を対象に、解体工事に直接的に携わっている専門工事業者の技術者および技能者を対象として、①施工前の段階、②施工の段階および③人材の 3 項目に大別して平均的な実態を把握することを目的としたアンケート調査を実施している [8)]。

図 15 によると、事前調査では、部材の強度を対象にしているケースは少なく、近隣の状況をはじめとして、建物の諸元や敷地の状況など全般的に調査されているようである。事前調査において設計図書が存在する割合は、4 割までとする回答が 65%を占め、存在しないことが多いことがわかる。存在する設計図書の種類は、一般図が最も多く、構造図、詳細図、躯体図および設備図などは少なかった。増改築記録に関する図面は極めて少なった。

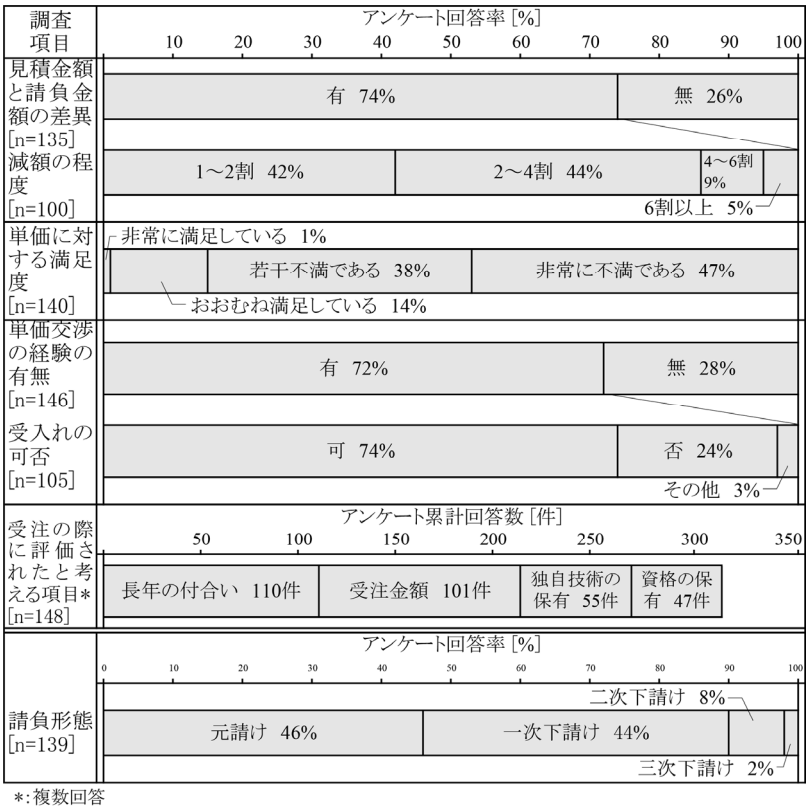
見積りおよび受注に関する意識と請負形態に関する実態を図 16 に示す。見積り金額と請負金額の差異があるとしたのは 74%であった。そして、減額は 2～4 割が 44%で、1～2 割が 42%であった。単価に対する満足度は、「非常に不満である」、「若干不満である」を合わせて 85%に達している。受注の際し評価されたと思える項目を問うたところ、「長年の付合い」と「受注金額」が同程度で多いあが、それらの半分程度、「独自技術の保有」および「資格の保有」も見受けられた。請負形態は、元請けと一次下請けを合わせて 90%に達していた。

施工計画に関する実態を図 17 に示す。施工計画の立案への参画については、「必ず参画する」および「参画したことがある」を合わせて 80%が参画した経験を有していた。一方で、元請け業者の立案した施工計画の不備に対しては、「よく感じる」、「時々感じる」を合わせて 86%となり、何らかの不備を感じている結果となった。適正工期か否かの問いについては、「適正である」が 62%と



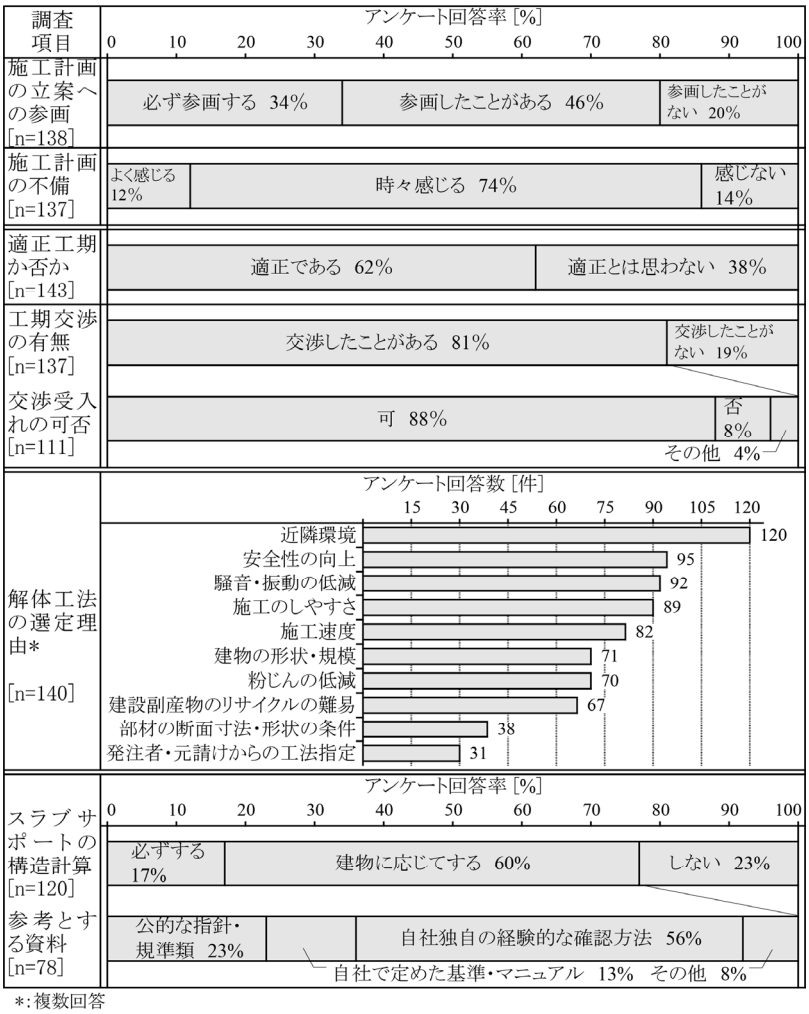
*:複数回答

図 15　事前調査の実態



*:複数回答

図 16　見積りおよび受注に関する意識と請負形態に関する実態



*:複数回答

図 17　施工計画の実態

なり、「適正とは思わない」を上回った。適正工期とするため、元請け業者へ 81%が交渉した経験を有しており、かつ交渉が受け入れられたことも88%と非常に高い。解体工法の選定理由については、安全、環境配慮および施工速度の選択が多く、発注者または元請け業者から指定と答えるケースは少なく、工法選定を委ねられている多いことがうかがえる。スラブサポートの構造計算は、「必ずする」が 17%、「建物に応じてする」が 60%で、「しない」が 23%であった。「必ずする」および「建物に応じてする」と回答したうち構造計算の際に参考とする資料は、36%が公的もしくは自社で定めた基準・マニュアルにより計算しているものの、56%が自社独自の経験的な確認方法となっており、経験による勘が半数を超え、工学的な判断がされていない現状を浮き彫りにした。

施工に関する実態を図 18 に示す。施工計画と施工の差異は、「ほぼ計画通りである」が 72%で最も多く、「計画通りでないことが多い」は 28%であった一方で、「常に計画通りである」とした回答は皆無であった。計画通りにならない理由については、建設副産物・廃棄物の種類および量が最も多く、続いて解体建物の各種仕様が計画と異なるであった。また、構造体の耐力とした回答が少なく、前述の事前調査で部材の強度を事前に調査すると回答が少なかったことを裏付けている。

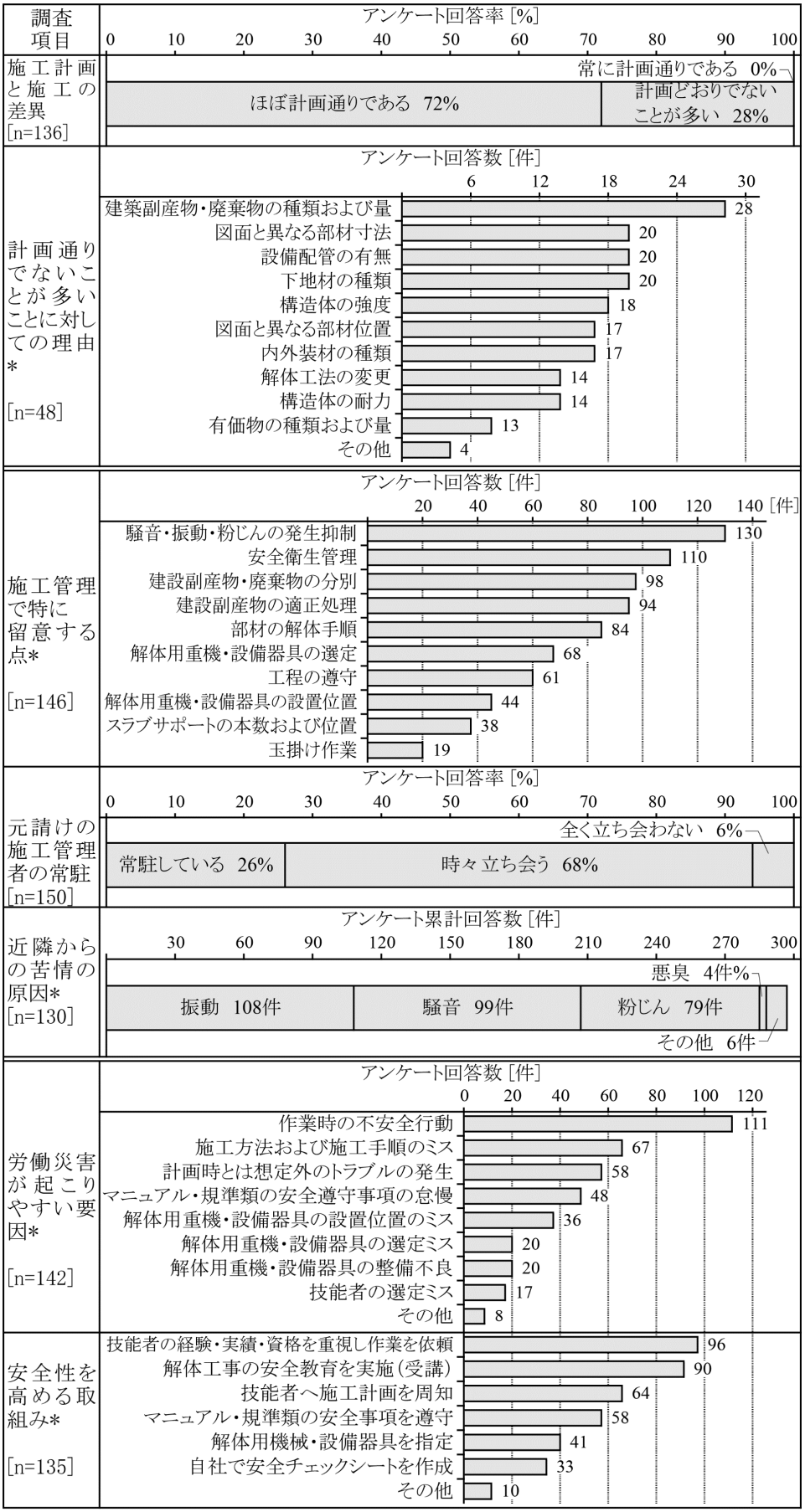
施工管理で特に留意する点は、騒音・振動・粉じんの発生抑制が最も多く、近隣環境の配慮への姿勢の高い。これに続いて、安全衛生管理、建設副産物・廃棄物の分別と適正処理などとなっている。元請けの施工管理者の現場への常駐については、「常駐している」、「時々立ち会う」を合わせた回答が 94%であるが、「全く立ち会わない」とした回答も 6%あった。近隣からの苦情の原因については、振動が最も多く、続いて騒音および粉じんであった。労働災害が起こりやすい要因については、作業時の不安全行動が最も多く、施工方法および施工手順のミス、計画時の想定外のトラブルが続いた。安全性を高める取組みについては、技能者の選定および安全教育の実施、技能者への施工計画の周知が多かった。

従業員構成に関する実態を図 19 に示す。従業員の年齢構成は、年代別では 20 歳代以下が 13%で最も少なく、40～50 歳代が 51%、60～70 歳代が 14%と、若年層の就業者数の減少傾向が顕著に表れていた。経験年数による年代別の従業員構成は、経験年数が 5 年未満の 40 歳以上の占める割合が 40%程度あり、解体工事に従事する年齢が高く、転職などで年齢を経てから解体工事に関わる技術者および技能者が多いことがわかる。

人材育成および技能継承に関する実態を図 20 に示す。人材募集への応募状況は、「非常に多い」、「多い」および「普通」を合わせて 59%となっているが、「ほとんどない」、「全くない」を合わせて 41%にもなっており、2 極化していた。人材募集の形態では、「ハローワークへの求人広告」と「知り合いへの働きかけ」が多く、比較的限定された範囲内での人材募集が行われている実態を感じさせた。人材育成の回答に、新人教育と解体技術に関する社内研修会の実施がほぼ半数程度に留まったのに対して、社内の安全教育の実施と社外の解体技術に関する研修会への参加が 70%程度となり、安全教育は社内で、解体技術については社外から情報を積極的に受け入れるようである。技能継承の状況については、「困難である」が 28%に留まり、72%が問題視していない傾向となった。これは、前述したように、若年層の就業者数が減少している一方で、40 歳以上の中核となる社員が一定数存在することに起因すると思われる。技術・技能継承が必要な事項については、解体工法の選定、分別解体の施工手順および廃棄物の処理方法が多く、続いて重機の設置・操作となった。これは、解体工事において重要と認識されている技術・技能が、工法選定と廃棄物処理に集約されていることを示唆している。技能継承の対策については、経験者による直接指導が 56%と最も多く、研修会への参加と 2 分される傾向となった。

4. 日本建築学会解体指針改定

日本建築学会では、1998 年、鉄筋コンクリート造建築物等の解体に関するはじめての施工標準として、「鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針（案）・同解説」（委員長：故笠井芳夫日本大学教授）を発刊している（現在絶版）。しかしながら、2000 年に施行された建設リサイクル法やアスベストの適正処理など、発刊された当時とは社会状況が変化してきており、現在の法規および実務では、対応しきれていない。



*:複数回答

図 18　施工に関する実態

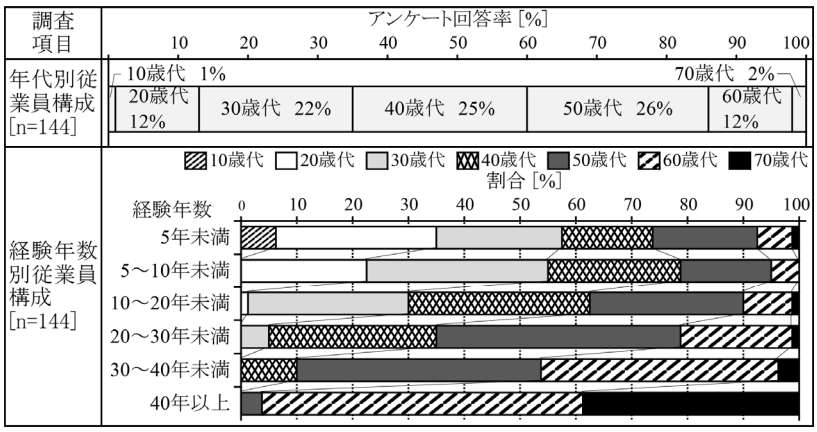
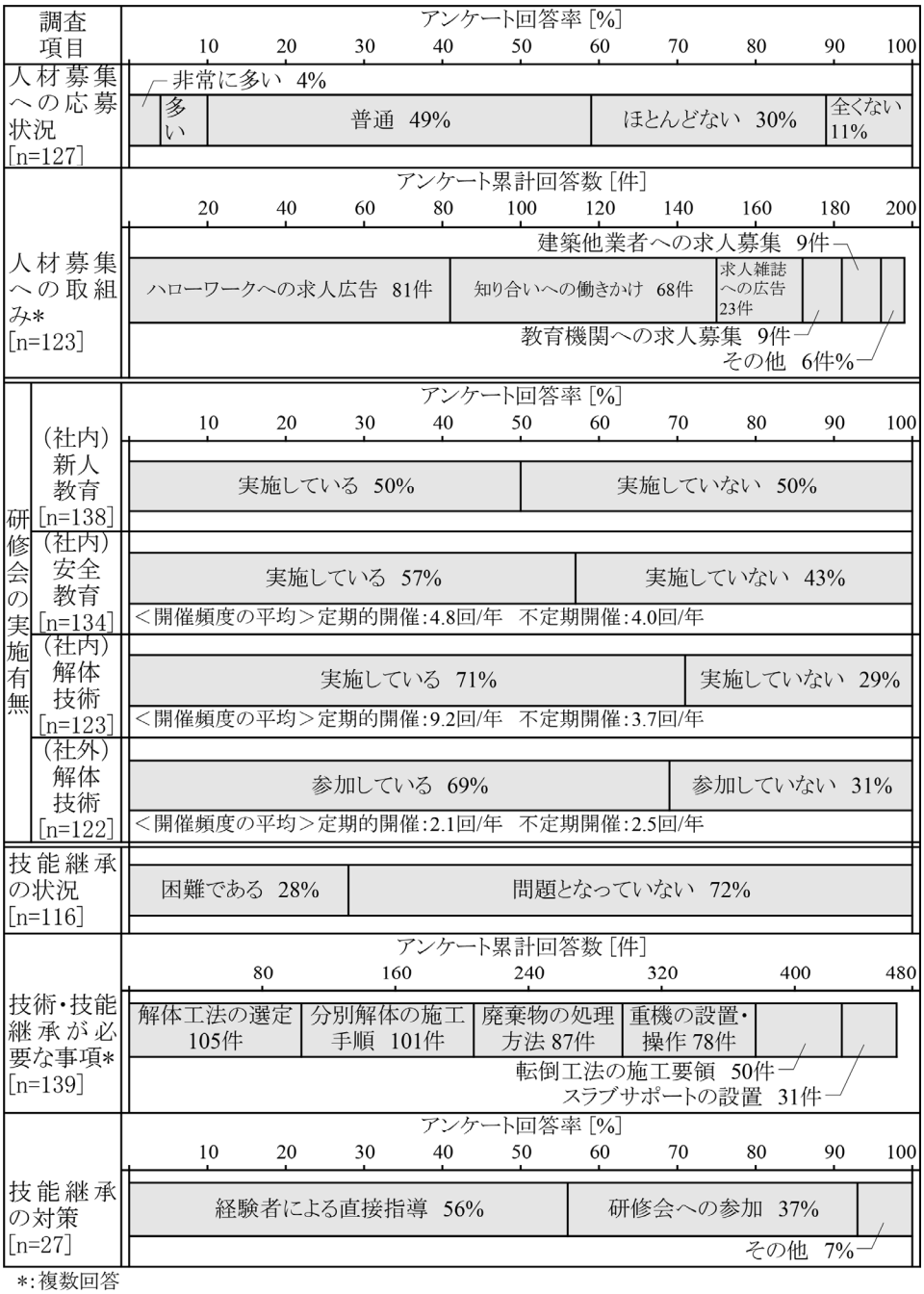


図 19　授業員の年齢、経験年数の実態



*:複数回答

図 20　人材育成および技術継承の実態

この改訂を目的に、日本建築学会では、改訂委員会（委員長：湯浅昇日本大学教授）を設置し、コロナ禍を挟んだがこの5年にわたり改訂作業を行ってきた。現在、校閲が終了し、最終調整段階であり、今秋発刊の予定である。

指針名、章立ては下記の通りである。

「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）」

1章　総則
2章　解体工事の性能および要求条件
3章　解体工法の種類および特性
4章　事前調査および事前措置
5章　解体工事計画
6章　施工
7章　建設副産物の処理
8章　特別管理産業廃棄物等の処理
9章　石綿含有建材の処理

5. 安全問題にも波及する解体技術の課題

(1) 階上解体のサポート問題

都市部では、解体重機を設置する敷地がない場合があり、いわゆる「地上解体工法」を適用できない場合が多い。その場合、重機を屋上に揚げ、上階から順次解体し、自走で下まで降りていく「階上解体工法」を採ることになる。

階上解体では、重機がスラブの上を自走、解体作業を行うため、重機およびアタッチメント、コンクリートガラ（下に降りるときはこれで坂を作る）の荷重、そこに走行および解体時の作業荷重が、スラブ、梁、柱に伝達する。これらの荷重は、建物の長期および短期設計荷重を超えており、スラブ、梁の下にサポートを設置することになるが、時としてスラブの抜け落ちを起こす。日本の耐震性能を担保した柱と梁の剛性は、スラブに比し極めて高く、解体時に柱・梁が崩壊するようでははじまらないが、スラブは、雑につられがちという意味で不明確なところがあり、建設時や使用初期には開口であったところもあり、鉄筋の定着にも信頼感は持てない。

本来なら、指針で荷重の見積もり方、サポートの本数、間隔などを計算する方法を規定するべきところであるが、工学的なデータおよび検討が乏しく、今回の改訂では見送っている。サポートを立てることは、新設時の構造計算からすると、部材の応力分布を全く想定しない形に変化させてしまうことも問題を難しくしている。

(2) 超高層ビルの解体

高度経済成長期に建設された超高層ビルの解体がはじまっている。今は、高層ビルの幕開け時代のS造の超高層ビルが対象で、建物の劣化ではなく、再々開発が解体の動機となっているようである。

超高層ビル解体では、超高層だからこそなおさらとなる高所からの解体材・粉塵の飛散防止、作業時の耐震性、作業員の安全の確保、解体材の地上への引き下ろしが重要なポイントとなる。ゼネコン各社工夫を凝らし技術提案、実績を積んでいるようである9)。

ただし、これらの解体システムは、S造の初期超高層ビルだからこそ成立しているといえ、近年、建設可能となった超高強度コンクリートを使った超高層RC造ビルの解体は、現実的には難しい。コンクリート部材は鉄筋部材に比し、はるかに重く、壊しにくい。

(3) 高強度コンクリート部材解体

建築は、壊れない、そして解体しにくいコンクリート構造物を志向しすぎた。SRC造、CFT造、そして高強度・超高強度コンクリートを使用したRC造は、解体することが極めて困難である。

RC造の解体では、やはり可能なら圧砕工法が経済的に有利であり、高強度域でも無筋なら圧砕刃で、石のように綺麗に割れる。しかし、高強度域では、鉄筋が伸びたり切れないと刃が入っていかない。

私が行った実験[10) 11)]では、コンクリート強度180N/mm^{2}級の部材まで、既に流通している重機および圧砕アッタチメント（ただし能力最高レベル）で解体することは可能であったが、アタッチメントの負荷は極めて大きく、時間がかかり、騒音も大きく、重機の余裕がないことによる振動がひどかった。飛散するコンクリート片も鋭利であった。解体工事業の実務の方にビデオを見てもらったところ、これを仕事で行うのは、機器の予想される損耗も考えると割にあわない、とする方がほとんどであった。

カッタ及びワイヤーソーでの実験も行った後の2018年、それまでの研究のひと括りとして、おおまかではあるが私の考え方を提示した[12)]。

① 圧砕工法の経済活動に見合った現実的な採用限度は、実強度で 50～60N/mm^2 以下程度。それ以上ではアタッチメントに掛かる負荷が大きく、騒音・振動で NG。

② 実強度で 50～60N/mm^2 を超えるコンクリート部材では、解体現場で、カッタもしくはワイヤーソー工法で対象部材をトラックに載せられる大きさまで切断し、搬出。

③ 部材のままリユース or 作業フィールドで圧砕・破砕・分級の上、高級品質のリサイクル材（そのポイントはセメントリッチ／高強度再生骨材）に。

SRC 造 CFT 造では、鋼板・鋼管を圧砕工法で変形・切断させようとしても、その内側のコンクリートの圧縮力が効く。圧砕工法は、コンクリートをかみ砕き、鋼をその後切断する工法である。鋼が前面にあり、鋼の変形・切断を、その裏にあるコンクリートが、その圧縮力で支えていては太刀打ちできない。

(4) 解体材の飛散

部材に力をかけた時に予期せぬ形で解体材が飛び跳ねる、落下する場面がないとはいえない。それが解体建物内に収まらず、建物の外へ飛び出す事態は、即公衆災害に繋がる。あってはならないことである。

特に、プレストレストコンクリート造建築物では、PC 鋼材に緊張力を導入している。緊張力が導入されている状況で、PC 鋼材を切断すると、端部の留具が飛び出す恐れがある。また、切断により建物の応力状態が一挙に変わるため、注意が必要となる。

鉄骨造の解体ではハイテンションボルトが飛翔する場合がある。

(5) 解体工事に見合った構造物の劣化・崩壊度、構造耐力診断の技術展開

解体対象構造物の劣化状況や崩壊状況を評価すること、前述の階上解体を行う場合などにおいて構造耐力を評価することは重要である。解体の場合には、これからまだ使っていく建物を評価する場合に比し、非破壊試験 13)なども積極的に取り入れ、解体工事に見合った、コストパフォーマンスという観点も重要である。「なんとなくいいだろう」では、安全を担保できない。

(6) 周囲への環境配慮

人口が密集する都市部における粉塵、騒音、振動の抑制は大きな課題であり、解体工事計画上、重要な観点となる。

とりわけ石綿に関する規制は、近年、厳しさを増す一方であり、解体工事はその対応に追われている状況である。高層建物では、高所で石綿等粉塵を飛散させてしまうと、その影響エリアは高さに応じて広範囲なものとなり、これまでに提案され実施された超高層ビル解体では、重要なポイントとなっている 9)。

また、排出される廃棄物に、特別管理廃棄物である廃石綿、廃 PCB、廃油がある。これらの物質を無害化し、更にリサイクルのシステムにのらせたいものである。

5. おわりに

「解体工事業」は、43 年ぶりに追加された業であるが、そのあり方を鑑みると、他の 26 業種（全 29 業種）と異なり、「建築一式工事」「土木一式工事」と並ぶ「解体一式工事」に移行すべきと思えてならない。

しかしながら、「解体工事業」は、「とび・土工業」の枠組みで運用されてきた実績があったからといっても、やはり新たな業であることには変わりがなく、役割範囲が確定した業となったらこそ、「工事の安全」を柱に、組織的にも、技術的にもそして社会貢献の観点からしても、細部にわたり詰め、発展していくことが急がれる。その礎にすべき観点が、私には「解体工事の工学化」であると思える。

この 5 月、日本コンクリート工学会機関誌「コンクリート工学」に、解体に関する私の思いの丈を認めた「持続可能な社会に帰する解体の方向性－解体を工学に－」と題した解説を寄稿した 2)。

社会循環型社会の実現を目指すためにも、今こそ解体工事の工学化を根幹に据えて、ことを運ぶべきである。

参考文献

1) Noboru YUASA: Establishment and Prospect of Demolition Business in Japan, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.21-28, 2021.12

2) 湯浅昇：持続可能な社会に帰する解体の方向性ー解体を工学にー、日本コンクリート工学会、コンクリート工学、Vol.61, No.5、pp.425-430、2023.5
3) 湯浅昇：解体工学の構築、月刊積算資料公表価格版、一般財団法人 経済調査会、No. 236、pp.70-76、2022.11
4) 建設業労働災害防止協会:平成 11、12、 13、14、15 年版建設業安全衛生年鑑、 1998-2002
5) 全国解体工事業団体連合会：解体工事における労働災害事例集、2008.3
6) 佐々木隆・湯浅昇・笠井芳夫：解体工事における事故災害調査、日本大学生産工学部第 42 回学術講演会(建築部会)、pp.89-92、2009.12
7) 御子柴信也・湯浅昇・笠井芳夫・佐々木隆・松井勇：解体工事における労働災害と年齢・経験の関係、日本大学生産工学部第 41 回学術講演会(建築部会)、pp.71-74、2008.12
8) 大塚秀三・湯浅昇・齋藤俊克・荒巻卓見：専門工事業者を対象とした建築解体工事の実状に関するアンケート調査、日本建築学会技術報告集、第 46 号、pp. 855-860、2014.10
9) Noboru YUASA: Demolition of Skyscrapers in Japan, Journal of the college of Industrial Technology, Nihon University, Vol.54, No.2, pp.29-34,2021.12
10) 湯浅昇：高強度・超高強度コンクリート構造物の解体負荷に関する研究、第 41 回セメント・コンクリート研究討論会、pp.67-72、2014.10
11) Noboru YUASA: Application of Crushing Method to the Demolition of High-strength and Ultra-high Strength Concrete Structure, Journal of the College of Industrial Technology, Nihon University, Vol.55, No.1, pp.1-10, 2022.6
12) 湯浅昇：高強度・超高強度コンクリートを用いた構造物の解体システムに関する研究、全国解体工事業団体連合会、平成 30 年度解体工事に関わる研究報告書概要集、pp.1-5、2018.7
13) 湯浅昇：コンクリートの強度に関する非破壊・微破壊試験方法の現状、日本非破壊検査協会、非破壊検査、Vol.66, No.3、pp.119-128、2017.3

名建築ビル 解体ラッシュ

ゼネコン 新技術競う

高度経済成長期に建設された高層ビルや有名ホテルといった戦後の名建築が、老朽化に伴い相次いで解体されている。安全面などから建て替えが必要となったり、再開発で取り壊されたりするケースが多い。

大手ゼネコンの鹿島は13日、世界貿易センタービル（東京・浜松町）の解体現場を報道陣に公開した。都心部での解体はリスクが大きいため、新工法を採用した。建物を大型ブロック状に切り分けてクレーンで降ろし、地上で細かく解体していく。床を切る際は斜めに切って下に抜け落ちにくくする。重機で粉砕する従来手法と異なり、粉じんと騒音を抑えられるのが特徴だ。工期の約1割短縮を見込む。鹿島の広報担当者は「今後も高層ビルの解体需要が見込まれ、新技術を活用したい」と話す。

同ビルは1970年に東京商工会議所が中心となって建設。高さ162㍍は当時、日本一の高さを誇り、高度成長の象徴だった。鹿島は来春までに解体を終える計画で、跡地には2026年度中に複合ビル（235㍍）が建つ予定だ。

工作機械でコンクリートの床を切断する作業員（東京都港区で）

高度成長のシンボル的な存在だった世界貿易センタービル

都内では解体ラッシュが続く。東京都庁舎などを手がけた建築家・丹下健三氏が設計した旧電通本社ビル（中央区）、世界中の賓客をもてなしてきた高級ホテル「ホテルオークラ東京別館」（港区）なども取り壊されている。

国内には100㍍を超える超高層ビルが計画中も含めると1000棟以上あり、築30年以上のビルは東京、大阪だけで約100棟に上るとされる。

ゼネコン各社は解体技術の開発を競っている。大成建設は、建物の最上部を鉄製の覆いで囲って密閉し、上から1階ずつ壊す手法に磨きをかける。建物が縮んでいくように見えるのが特徴で、約10年前に旧「グランドプリンスホテル赤坂」（約140㍍）の解体時、注目を浴びた。同社では覆いを軽量化し、より汎用性の高い工法も開発した。

欧米では、建築物を改修しながら長く使うケースもみられるが、日本は地震が多いこともあり、コンクリートの耐用年数である50年を機に建て替えに踏み切るところが多い。都市部への人口集中で再開発が相次いでいることも背景にある。今後は地方でも老朽ビルの解体が相次ぐ見通しだ。政府は建設業法を改正して16年に施行し、大手中心だった解体事業を中小建設会社でも参入しやすくした。

ただ、建設業界では担い手不足と高齢化が急速に進んでいる。日本大学生産工学部の湯浅昇教授は「将来的には高度な解体の技術者や作業員が不足する恐れがある。今から、大手と中小建設会社が連携して人材の育成を進める必要がある」と指摘する。

戦後に建設された有名ビル・ホテルが続々と取り壊されている

世界貿易センタービル（東京都港区、1970年）	高度経済成長期を象徴するビルの一つ。高さ162㍍で、完成当時の高さは日本一
明治安田生命新宿ビル（新宿区、61年）	新宿副都心の開発に先駆けて建設され、新宿駅西口を象徴する建物に。解体後は複合施設に
旧電通本社ビル（中央区、67年）	通称「電通築地ビル」。建築家・丹下健三の作品で、保存を求める声も
シナガワグース（港区、71年）	前身の「ホテルパシフィック東京」は国内高層ホテルの先駆け。今後はホテルなどが入る複合ビルに
ホテルオークラ東京別館（港区、73年）	各国大使らが集う催事が定期的に開かれるなど、日本を代表するホテル
横浜市旧庁舎（横浜市、59年）	建築家・村野藤吾が設計し、大規模市庁舎建築の傑作と評される。解体後はオフィスなどが入る高層ビルに

※（）内は所在地と完成年。ホテルはいずれも開業年。建物の所有者や建設会社の公表資料などを基に作成

再生骨材コンクリートの付加価値向上による利用拡大に向けた基礎的研究

明治大学理工学部
小山明男

Key-word : 再生骨材，低炭素,，促進中性化，圧縮強度，炭酸化，リサイクル

1. はじめに

現在，構造物などの解体によって生じるコンクリート塊のリサイクル率は99%を超えており，非常に高い水準であるといえる。リサイクルされたコンクリート塊の主な利用先は路盤材であり，約99.5%(18276千トン)が再生砕石として利用されている[1)]が，都市開発が進み路盤材の需要量が減少することで，コンクリート塊のリサイクル率は，今後減少すると予想される。したがって，コンクリート塊を再生骨材としてコンクリートに用いることが求められている。しかし，現在再生骨材として利用されるコンクリート塊は，約0.5%(約10万トン)[1)]とわずかな量である。これは，再生骨材をコンクリートに用いた際の強度などの性状に対する不安が原因であると考えられる。よって，再生骨材をコンクリートに用いて普及させるには，新たな付加価値を与えることを考えていく必要がある。

我が国においては，2020年10月に2050年までにカーボンニュートラルを目指すことが宣言された。また，再生骨材は炭酸化を行うことで品質が向上するという研究報告[2)3)]がある。そこで，再生骨材の利用推進のためには，再生骨材に炭酸化による低炭素性を付加価値として与えることが有効であると考えられる。これにより二酸化炭素を固定するとともに再生骨材の品質が向上することも期待される。しかし，再生骨材の炭酸化によるコンクリートの各性状についての研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では，コンクリートリサイクルの質すなわち高度で広範囲な活用を目的に，再生骨材コンクリートを対象に，低炭素性を付加価値とした提案を試みる。具体的には，炭酸化による再生骨材の品質改善効果およびそれを用いた再生骨材コンクリートの品質について実験的に検討を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表1に本研究で使用した材料の概略を示す。コンクリート塊を破砕・分級して得られる再生骨材について，炭酸ガス（CO_2）の吸収の有無によって品質の相違等を検討した。

2.2 モルタルおよびコンクリートの調合概略

炭酸化した再生骨材と未炭酸化の再生骨材をもちいてモルタルおよびコンクリートを製造し，その基礎物性について検討した。モルタルおよびコンクリート調合およびフレッシュ性状は表2，表3に示す。

表1 使用材料の種類および物性

使用材料	記号	種別・物性
結合材	C	普通ポルトランドセメント（密度3.16 g/cm³）
細骨材	S	川砂（絶乾密度2.55 g/cm³，吸水率1.37%）
粗骨材	G	砕石（絶乾密度2.62 g/cm³，吸水率1.04%）
再生細骨材	RS	原コンクリートの水セメント比45%と60%（L品質）
再生粗骨材	RG	原コンクリートの水セメント比45%と60%（L品質）
炭酸化再生細骨材	CRS	強制炭酸化を行った再生細骨材
炭酸化再生粗骨材	CRG	強制炭酸化を行った再生粗骨材
練り混ぜ水	W	上水道水（20±3℃）
AE減水剤	AE	リグニンスルホン酸系化合物とポリオールの複合体

表2 モルタル供試体の調合概略

供試体記号	W/C (%)	S/C	AE減水剤 (C*100%)	置換率	単位重量（kg/m³）				
					W	C	S	RS	CRS
60-PLAIN	60	3.0	—	0	275	458	1380	0	0
60-60RLS-100		2.6	—	100			0	1188	
60-C60RLS-100		2.6	—	100			0		1209
50-PLAIN	50	3.0	0.1	0	241	482	1468	0	0
50-60RLS-25		2.9	0.1	25			1101	316	
50-60RLS-50		2.8	0.1	50			734	632	
50-60RLS-75		2.7	0.1	75			367	947	
50-60RLS-100		2.6	0.1	100			0	1263	
50-45RLS-50		2.8	0.1	50			734	615	
50-45RLS-100		2.6	0.1	100			0	1229	
50-C60RLS-25		3.0	0.1	25			1101	0	322
50-C60RLS-50		2.9	0.1	50			734		643
50-C60RLS-75		2.8	0.1	75			367		965
50-C60RLS-100		2.7	0.1	100			0		1286
50-C45RLS-50		2.8	0.1	50			734		637
50-C45RLS-100		2.6	0.1	100			0		1252
40-PLAIN	40	3.1	0.2	0	201	502	1535	0	0
40-60RLS-100		2.6	0.2	100			0	1321	0
40-C60RLS-100		2.7	0.2	100			0	0	1345

表3 コンクリート供試体調合概略およびフレッシュ性状

試験体記号	W/C (%)	再生骨材置換率(%)		AE減水剤 (C*%)	単位使用量(kg/m³)								スランプ cm	空気量 %
		粗骨材	細骨材		W	C	細骨材			粗骨材				
							S	RLS	CRLS	G	RLG	CRLG		
60-PLAIN	60	0	0	0.6	185	308	954	0	0	793	0	0	18.9	5.1
60-C60RLG-100		100	0							0	0	726	20.8	4.6
60-60RLG-100		100								0	711	0	21.4	4.2
60-C45RLG-50		50								396	0	354	19.3	5.6
60-C45RLG-100		100								0	0	708	20.6	4.7
60-45RLG-50		50								396	343	0	20.6	4.4
60-45RLG-100		100								0	687	0	20.6	4.7
60-C60RLSRLG-100		100	100				0	0	836	0	0	726	14.6	4.3
60-60RLSRLG-100							0	821	0	0	711	0	14.6	4.3
60-C45RLSRLG-100							0	0	829	0	0	708	15.5	4.2
60-45RLSRLG-100							0	799	0	0	687	0	16.5	5.0
50-PLAIN	50	0	0	0.6	185	370	876	0	0	821	0	0	21.3	3.6
50-45RLG-100		100					876	0	0	0	736	0	21.9	4.1
50-C45RLG-100		100					876	0	0	0	0	752	20.3	4.2
40-PLAIN	40	0	0	0.9	180	450	784	0	0	862	0	0	17.8	6.6
40-45RLG-100		100					784	0	0	0	773	0	21.8	4.2
40-C45RLG-100		100					784	0	0	0	0	790	22.0	5.5

2.3　実験項目および方法

2.3.1　骨材の品質試験

再生骨材を炭酸化養生槽により温度 20±2℃，湿度 60±5%，CO_2 濃度 5%の環境下で 4 週間の強制炭酸化を行った。作製した炭酸化再生骨材を JIS A 1109，JIS A 1110 に準じて密度および吸水率試験を行った。

2.3.2　モルタルおよびコンクリート性能試験

モルタルおよびコンクリートの試験項目および方法を表 4 に示す。なお，モルタルの促進中性化試験は促進期間 1 週，2 週，4 週，8 週で中性化深さを測定した。

3.　実験結果および考察

3.1　骨材品質の改善試験結果

原コンクリートの水セメント比 45%および 60%の再生骨材を強制炭酸化した後，測定した密度および吸水率試験の結果を図 1 に示す。

再生細骨材および再生粗骨材のいずれも，強制炭酸化を行ったことで，密度は増加し，吸水率は低下する傾向にある。これは炭酸ガスの浸透により炭酸ガスがモルタル中の水酸化カルシウムと結合することで炭酸カルシウムが生成され，空隙を充填し緻密化したためと考えられる[4)]。このことから，炭酸ガス（CO_2）を吸収させることで骨材品質の改善効果が認められ，コンクリートの品質改善も見込める可能性が示された。

3.2　モルタル強度試験結果

曲げ強度試験結果を図 2 および図 3 に，圧縮強度試験結果を図 4 に示す。

再生細骨材及び炭酸化再生細骨材を用いたモルタルでは，置換率が上昇するほど強度が減少した。これは普通細骨材に比べて再生細骨材及び炭酸化再生細骨材の密度が低いことが原因であると考えられる。また，炭酸化による改質効果は概ね認められた。しかし，置換率と品質向上率の間に相関は見られなかった。

曲げ強度ではモルタルの水セメント比が小さくなるほど炭酸化による品質向上率が小さくなった。反対に，圧縮強度ではモルタルの水セメント比が小さくなるほど炭酸化による品質向上率が大きくなった。

3.3　モルタルの促進中性化試験結果

促進中性化試験結果を図 5 に示す。再生細骨材および炭酸化再生細骨材を用いたモルタルでは，普通細骨材のみで作製したモルタルに比べて，中性化深さが大きくなった。これは，再生細骨材および炭酸化再生細骨材の絶乾密度が普通骨材に比べて小さく（吸水率は大きく）空隙が多いため，炭酸ガスがコンクリート内部まで侵入しやすいことが原因と考えられる。また，置換率に関わらず，再生骨材を用いたモルタルは炭酸化再生骨材を用いたモルタ

表 4　試験項目および試験方法

種類	試験項目	試験方法
モルタル	フロー試験	JIS R 5201
	圧縮/曲げ強度試験	
	促進中性化試験	JIS A 1153
コンクリート	スランプ試験	JIS A 1101
	空気量試験	JIS A 1128
	圧縮強度試験	JIS A 1108
	促進中性化試験	JIS A 1153
	長さ変化試験	JIS A 1129-3

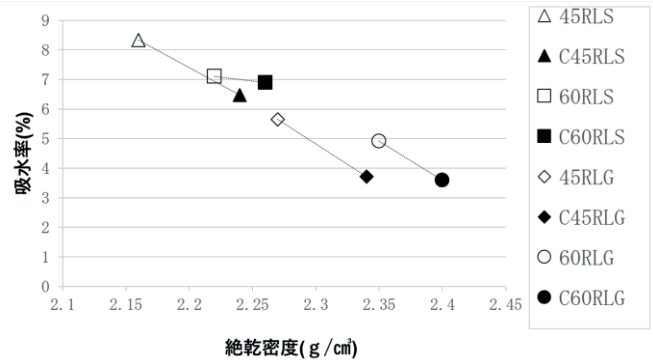


図 1　炭酸化再生骨材の密度および吸水率

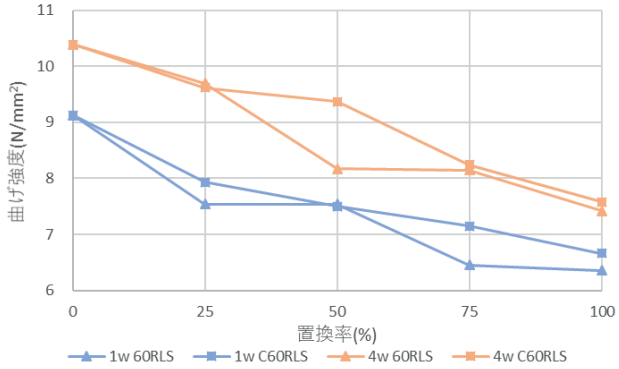


図 2　曲げ強度に及ぼす置換率の影響（W/C=50%）

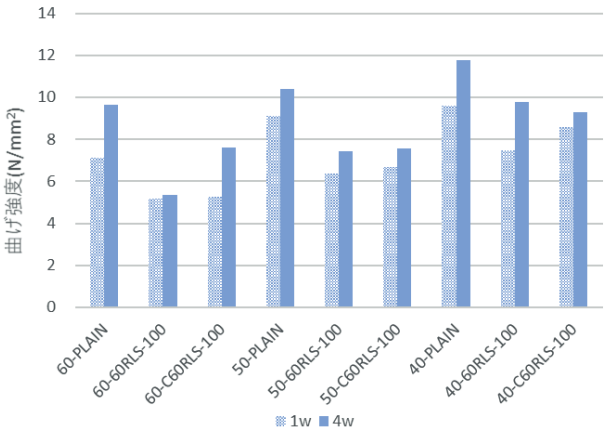


図 3　モルタルの曲げ強度試験結果

ルと比べて中性化深さは大きい結果となった。すなわち，再生細骨材の炭酸化によりモルタルの中性化抵抗性が高まる効果が確認できた。

3.4　コンクリートの圧縮強度試験結果

コンクリートの圧縮強度試験結果を図 6 および図 7 に示す。図 6 によれば水セメント比 60%において，再生骨材種類によらず炭酸化再生骨材を用いたコンクリートは，未炭酸化の再生骨材を用いたコンクリートよりも，圧縮強度が大きくなる傾向を示した。また，原コンクリートの水セメント比 45%の再生骨材は原コンクリートの水セメント比 60%再生骨材と比べ強制炭酸化によりコンクリート圧縮強度の改善効果が大きい。これはモルタル付着率が高いほど，炭酸化による品質の改善効果が大きいためと考えられる。

図 7 の圧縮強度とセメント水比の関係では，再生骨材および炭酸化再生骨材を用いたコンクリートのいずれも，一般的なコンクリートと同様の傾向を示した。

3.5　コンクリートの長さ変化試験結果

本実験で行ったコンクリートの乾燥収縮試験結果を図 8 に示す。水セメント比 60%のコンクリートでは，再生骨材置換率が大きくなるほど，乾燥収縮率は大きくなった。また，炭酸化による改質効果が認められ，炭酸化再生骨材は，未炭酸化の再生骨材を用いたコンクリートに比べて乾燥収縮率が小さく，再生骨材置換率が大きいほど，炭酸化による効果が高くなる傾向を示した。

特に，再生細骨材と再生粗骨材の両方を用いた再生骨材コンクリートでは，再生骨材の強制炭酸化によりコンクリート乾燥収縮率の抑制効果が認められる。

3.6　コンクリートの促進中性化試験結果

コンクリートの促進中性化試験結果を図 9 に示す。原コンクリートの水セメント比 45%の再生骨材および炭酸化再生骨材を用いて，水セメント 60%，50%，40%のコンクリートの中性化抵抗性の影響を検討した。60%および 50%の水セメント比では，未炭酸化の再生骨材と比べ，炭酸化再生骨材を用いたコンクリートの中性化抵抗性が若干高い傾向を示した。これはモルタルの結果と同様に，再生骨材を炭酸化することで，密度が大きく，吸水率が小さくなったため，炭酸ガスがコンクリート内部まで侵入しにくくなったことが原因と考えられる。

一方で，水セメント比 40%においては，再生骨材の炭酸化の有無が中性化深さに及ぼす影響はみられなかった。これは，セメントペースト自体がち密であり，骨材物性の影響を受けにくいことが原因と考えられ，再生骨材の炭酸化による効果は，コンクリートの水セメント比によって異なるといえる。

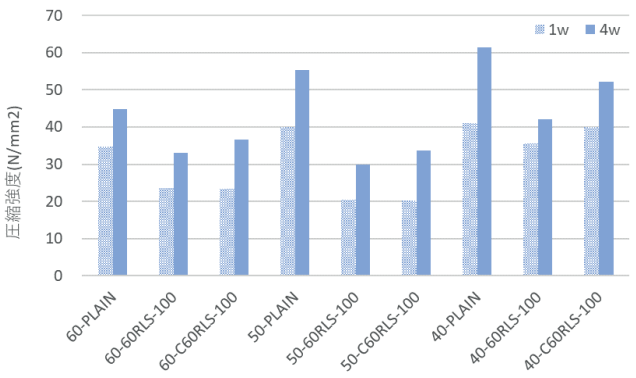


図 4　モルタルの圧縮強度試験結果

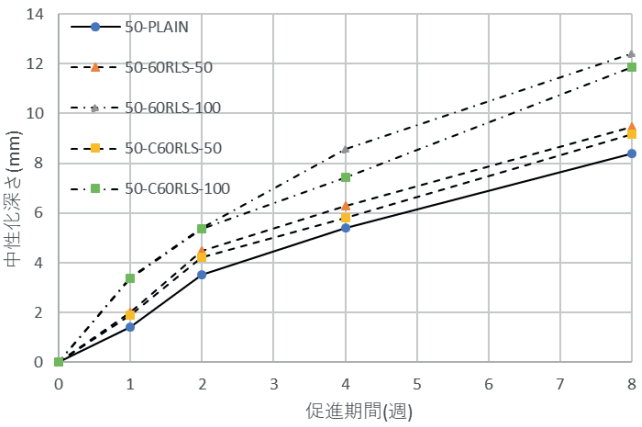


図 5　モルタルの促進中性化試験結果

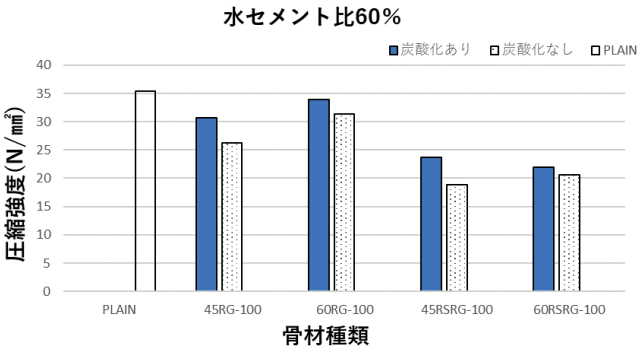


図 6　コンクリートの圧縮強度試験結果

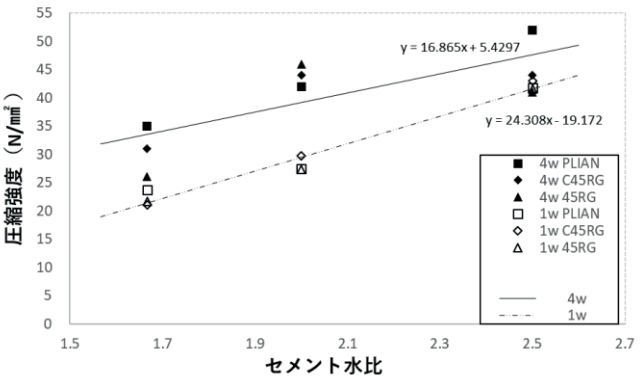


図 7　水セメント比と圧縮強度の関係

3.7　炭酸化による CO_2 収支の検討

再生骨材コンクリートは，普通コンクリートに比べて強度が低下するため，セメント量を増やす必要があり，結果として CO_2 排出量が増加する。これに対し，セメント量増大による CO_2 排出量増大を打ち消すだけ再生骨材を炭酸化しないと，環境性確保のためには意味がない。そこで図 10 に圧縮強度 36N/mm² を満足する炭酸化再生骨材コンクリートの CO_2 収支の試算結果を示す。なお，セメントの CO_2 原単位を 798.1kg-CO_2/t，再生粗骨材の CO_2 吸着可能量を 30kg-CO_2/t と仮定した。再生骨材の炭酸化度が 73.8%を超えると，炭酸化再生骨材コンクリートのセメント量増加分によって排出する CO_2 量を，炭酸化によって吸着した CO_2 量の収支が下回る結果となった。吸着可能量にはまだ余裕がある可能性があるため更なる CO_2 収支減少が見込まれ，低炭素性が付加価値として効果があることがわかる。

4.　まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

1) 再生骨材を炭酸化させた場合，密度は大きく，吸水率は小さくなり，骨材の基礎物性の改善が見込まれる。
2) 再生骨材を用いたモルタルやコンクリートの品質は普通コンクリートに比べて低下するが，炭酸化した再生骨材を用いることで，強度，乾燥収縮率および中性化深さに関する性能は改善される。
3) 特に，水セメント比が大きい場合のコンクリートの圧縮強度と中性化抵抗性については，再生骨材の炭酸化による効果が明確に認められた。
4) 本研究では，再生骨材の炭酸化度を測定しておらず，炭酸化の程度と品質との関係は明確になっておらず，継続的に検討を行う予定である。

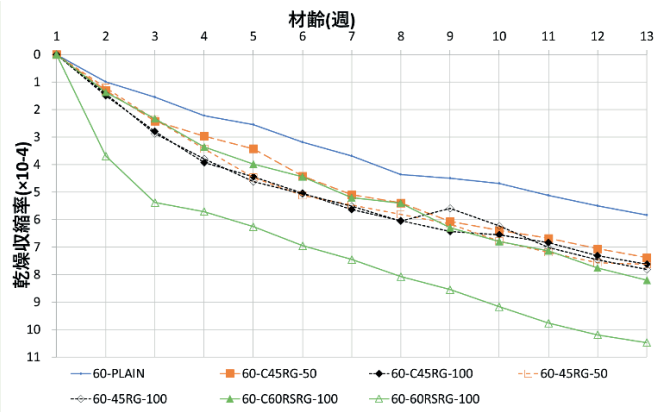


図 8　コンクリートの乾燥収縮試験結果

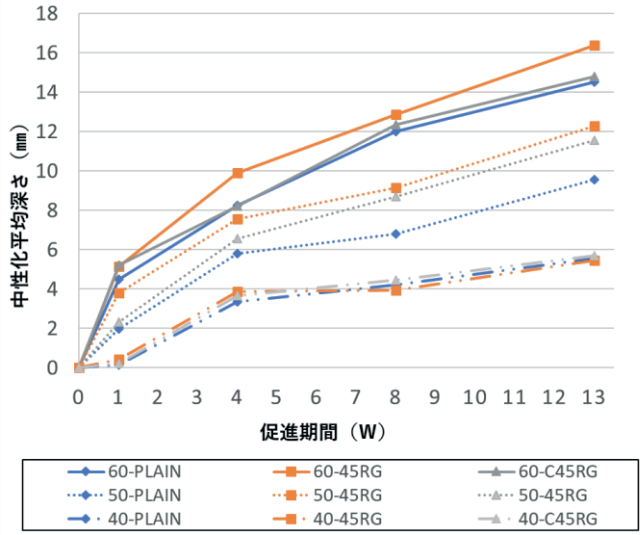


図 9　コンクリートの促進中性化試験結果

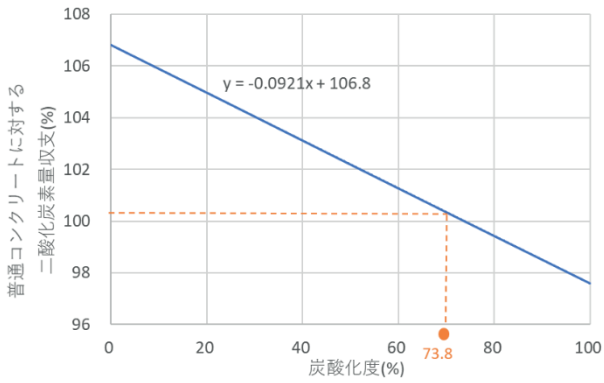


図 10　炭酸化度と CO_2 収支の関係
(強度 36N/mm²，単位水量 185kg/m³，s/a50%)

【参考文献】

1)野口貴文：再生骨材コンクリートの JIS 改正「生産者・利用者の期待に応える普及に向けて」，https://www.suishinkaigi.jp/publish/organ/2018_summer/2018_summer_special%20feature1.pdf　(2023 年 5 月 6 日確認)

2)松田信広ほか：異なる条件で改質させた再生骨材がコンクリートの強度性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No1，2017

3)松田信広ほか：炭酸化による低品質再生骨材の改質技術の提案と改質再生骨材がコンクリートに与える影響，コンクリート工学論文集，第 30 巻 p.65-76，2019

4) 伊代田岳史，本名英理香：コンクリート構造物の炭酸化進行における雨掛り等の環境条件の影響とその進行メカニズムの検討，コンクリート工学論文集，Vol. 28，pp. 113-122，2017

【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：解体工事の性能評価に関する研究

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，一部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いる。これらの状況を踏まえ，近年解体工事を建築工事のひとつとして捉える考え方が定着し，2013 年に改定された日本建築学会「建物の LCA 指針」[1)] では，建設時の評価に加え，解体・リサイクルの評価が確立されたことから，循環型社会の構築のための大きな推進力となった。また，高層建築物の解体工事の始まりとともに，「上部閉鎖式解体工法」のような環境配慮型の解体工法が求められている[2)]。

建築物に対する評価は，建設→運用→保守・補修→解体→廃棄・再利用といったライフサイクルの中で行われる必要があることが認識されはじめており[3) 4) 5) 6)]，解体もその中の重要な構成要素として位置づけられている。しかし，建設→運用→保守・補修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，解体工事は製品としての構造物が残らないことから，明確な評価手法が確立されていない。

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．解体工事の要求性能

解体工事に係わる対象範囲における要求性能は，**図１**に示すように解体工事現場（①）を中心に，その周辺に存在する７つ（②～⑧）のステークホルダーをあわせた８つの対象範囲にまとめられる。また，解体工事に係る各対象範囲における要求性能を**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。

①解体工事現場（施工者）②解体工事の発注組織
③解体工事現場の近隣　　④廃棄物運搬経路
⑤廃棄物の中間処理場　　⑥廃棄物の最終処分場
⑦行政（監督官庁）　　⑧地球的規模

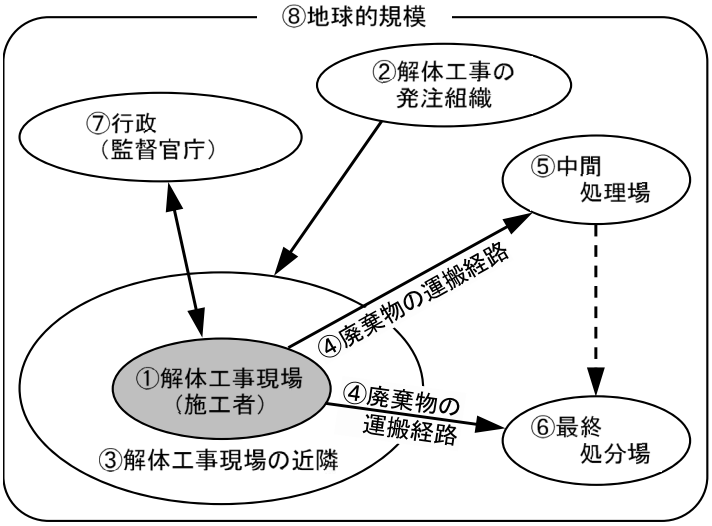


図１　解体工事に係わる対象範囲

*名城大学理工学部環境創造工学科 教授 博士（工学）

３．解体工事の評価軸と評価指標の設定

本研究で設定した解体工事・工法の評価軸を**図 2** に示す。評価項目は経済性，安全性，環境保全性の 3 項目とし，定量評価については，経済性はコスト（C），安全性は危険度（R），環境保全性は CO_2 排出量（E）を用いた。また，各対象範囲の要求性能を経済性，安全性および環境保全性の３項目に分類した結果を表１に示す。

3.1 経済性（C）

経済性は工事費とした。なお，工期は経済性に含め，工期の延長による労務費，機械・仮設損料の増加等は工事費に加えた。

表１　解体工事に係る各対象範囲における要求性能

対象範囲	要求性能	評価軸	記号
①解体工事現場（施工者）	・工期が確保できること	・工期確保→経済性	C
	・経済的に優れていること	・経済性	C
	・解体工法の安全性が高いこと	・安全性	S
	・工事にともなう手続を迅速に行えること	・工期確保→経済性	C
	・特別管理産業廃棄物の処理に手間がかからないこと	・経済性	C
	・現場～処理場間が近いこと	・経済性	C
	・危険物がない，または処理済みのこと	・安全性	S
②解体工事の発注組織	・経済的であること	・経済性	C
	・解体工期が短縮できること	・工期短縮→経済性	S
	・既存建物の一部を有効活用できること	・経済性	C
③解体工事現場の近隣	・騒音が発生しないこと	・環境保全	E
	・振動が発生しないこと	・環境保全	E
	・大気汚染が生じないこと	・環境保全	E
	・湖沼，河川，地下水等の水質汚濁を生じないこと	・環境保全	E
	・地盤沈下を発生させないこと	・環境保全	E
	・解体コンクリート塊の飛散や飛来落下がないこと	・安全性	S
	・場外出入車輌や駐車車輌等による交通渋滞の回避と交通安全性の確保	・安全性	S
④廃棄物の運搬経路	・運搬物の重量が法規制の範囲内であること	・経済性	C
	・運搬物の大きさが法規制の範囲内であること	・経済性	C
⑤中間処分	・搬入された解体廃棄物が処理しやすいこと	・経済性	C
⑥最終処分	・廃棄物の量が十分減容化されていること	・経済性	C
⑦行政（監督官庁）	・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	・経済性	C
	・電線や電柱の移動がないこと	・経済性	C
	・危険物を取り扱わないこと	・安全性	S
	・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	・安全性	S
	・軌道の近くでの解体工事がないこと	・安全性	S
⑧地球的規模	・CO_2 等の地球温暖化ガスの発生抑制されること	・環境保全性	E
	・解体工事の用途で多量の資材を投入しないこと	・経済性	C
	・再利用による資源の有効活用を図ること	・環境保全性	E

記号）Ｃ：経済性　　Ｓ：安全性　　Ｅ：環境保全性

3.2 安全性（S）

本研究では過去の災害事例をもとに，死傷事故の発生確率[7]を用いた評価指標を提案し，危険度（R）として（3.1）式に定義した。

R＝∑（Xn×Pn/100）/m ……（3.1）式

R：危険度

Xn：墜落，飛来・落下，倒壊，爆破・火災等の事故を被災する可能性を有する作業に従事する作業員数（人）

Pn：各死傷事故の発生確率（%）

m ：解体作業にかかわる総作業員数（人）

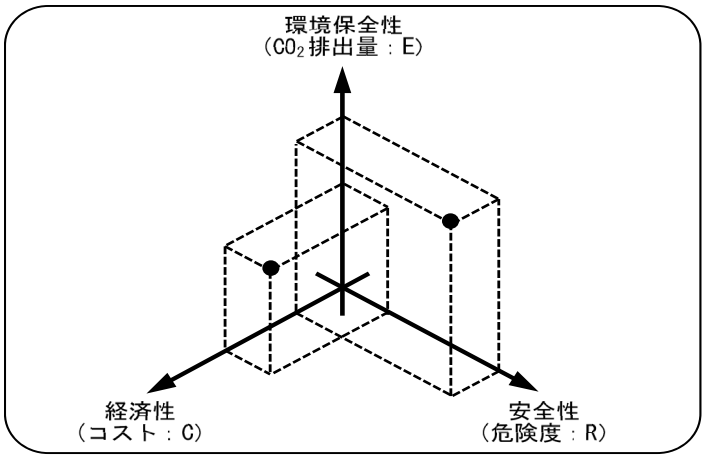


図 2　解体工事・工法の評価軸

3.3 環境保全性（E）

環境保全性評価の階層構造を**図 3** に示す。

地域環境の環境負荷因子としては，解体現場の近隣で騒音，振動，大気汚染，水質汚濁，一方，地球的規模では CO_2 等地球温暖化ガスの発生が上げられる。地域環境の騒音，振動，大気汚染，水質汚濁は法規制（例えば，騒音規制法，水質汚濁規制法等）で管理値が設定されており，それを満足しない工事は認められない。また，地球的規模は CO_2 排出量，フロン等地球温暖化ガスがあるが[1]，本研究では CO_2 排出量を代表値として評価してみた。

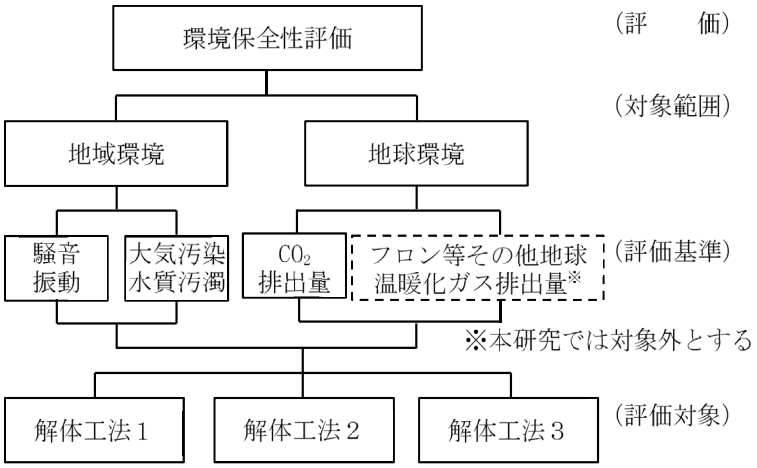


図 3　環境保全性評価の階層構造

(1) CO_2 排出量原単位

解体工事における CO_2 排出量は，使用する機器類等の原動機から発生する量が支配的であり，これは使用するエネルギー源（軽油，電力等）と作業量に依存する。

1 時間当たりの CO_2 排出量原単位は（3.2）式で定義される。

原動機の時間当たりの CO_2 排出量原単位＝各燃料の CO_2 原単位×時間当たりの燃料消費量　(3.2)式

表 2 に電力および軽油の CO_2 原単位を示す。また，時間あたりの燃料消費率の例を**表 3** に示す。軽油は参考文献 1)に，電力は参考文献 8)に基づく。

原動機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(3.3)式で求められる。

時間当たりの燃料消費量＝機関出力×時間当たりの燃料消費率　(3.3)式

機関出力および燃料消費率は機械製造メーカの性能仕様書による。

本研究では，鉄筋コンクリート造建築物の解体工事で，一般的に使われているハンドブレーカと動力源となる発動発電機（工法 1），騒音・振動が少ないコンクリートカッター（工法 2）および筆者らが開発を行っている放電パルス破砕機（工法 3）[9)] を対象とし，各種解体工法の時間あたりの CO_2 排出量原単位の例を**表 4** に示す。なお，ハンドブレーカを使用した場合の算定例を以下に示す。

時間あたりの CO_2 排出量原単位＝2.58×3.0＝7.74kg・C/h

ここに 2.58kg・C/L：**表 2** による。

3.0L/h：**表 3** による。

表 2　電力および軽油の CO_2 原単位

燃料区分	CO_2 原単位	備考
軽　油	2.58 kg・C／L	参考文献１）による
電　力（東京電力）	0.505 kg・C／kWh	参考文献８）による

表 3　時間あたりの燃料消費率の例

機械の種類	使用燃料	時間あたりの燃料消費率
ハンドブレーカ	軽油	3 L／h
コンクリートカッター	軽油	5 L／h
放電パルス破砕機	電力	10 kW／h

表 4　各種解体工法の時間あたりの CO_2 排出量原単位の例

解体工法の種類	CO_2 排出量原単位
ハンドブレーカによる解体	7.74 kg・C／h
コンクリートカッターによる解体	12.9 kg・C／h
放電パルス破砕機による解体	5.05 kg・C／h

3.4 評価指標の設定

評価指標は以下のように設定した。

①評価値は比率で表す。

②数値が大きいほど各特性で優れていることを示す。

上記方針に基づき，経済性（C），安全性（S），環境保全性（E）の評価指標をそれぞれ（3.3）～(3.4)式にて算定する。

経済性指標：C＝1/Ci/ΣCi）……(3.3)式
安全性指標：S＝1/Ri/ΣRi）……(3.4)式
環境保全性指標：E＝1/Ei/ΣEi）……(3.5)式
i：その解体工事で考えられる工法（使用機械）の種類（i＝1～n）
Ci：i 番目の工法（機械）を用いた場合のコスト（円）
ΣCi：i～n のコストの総和
Ri：i 番目の工法（機械）を用いた場合の危険度（R）
ΣRi：i～n の危険度の総和
Ei：i 番目の工法（機械）を用いた場合の CO_2 排出量（kg・C）
ΣEi：i～n の CO_2 排出量の総和
優位度（ｒ）として 3 軸評価点のベクトルの長さを用いて(3.5)式で定義する。

$$r=\sqrt{\overline{C}^2+\overline{R}^2+\overline{E}^2} \qquad (3.5)\text{式}$$

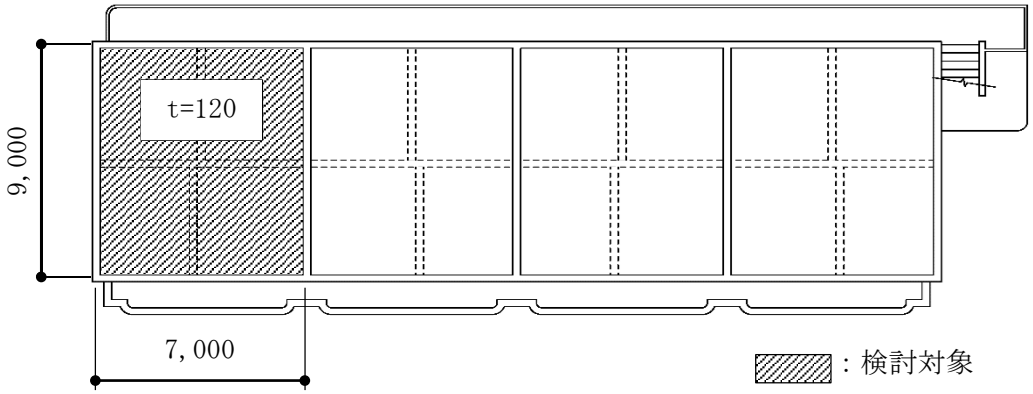
４．試算

4.1　対象建築物および条件

試算に用いる対象建築物および条件を以下に示す。

（1）対象建築物

対象建築物は**図 4** に示す鉄筋コンクリート造の集合住宅とし，その 1 戸分（およそ 63m²）のスラブを解体することにした。排出されるコンクリート塊の大きさは人頭大（およそ 20cm）以下とする。



構造：鉄筋コンクリート造床スラブ　ｺﾝｸﾘｰﾄ　鉄筋
コンクリート：Fc=21N/mm²鉄筋：D13@200
規模：7.0m×9.0m＝63.0m²×0.12m＝7.56m³

図 4　対象建築物の平面図

（2）使用機器

使用機器の概要を**図 5** に示す。また，評価指標算定諸元を**表 5** に示す。解体に用いる機器類は，一般的な工法としてハンドブレーカ，コンクリートカッターおよび放電パルス破砕機の 3 種類とし，使用台数は各 1 台とする。また，作業員は 1 名とし，労務費は公共工事設計労務単価[10]による。

①ハンドブレーカ（工法 1）

打撃により鉄筋コンクリートを破砕する。本格的な鉄筋コンクリートの解体が始まった

1955 年以降今日まで，広く一般的に使われている。重量が 25～40kg と軽いのが特徴。原則として下向き作業で用いる。

②コンクリートカッター（工法 2）

ダイヤモンドを埋め込んだ円盤状の切刃（ブレード）で鉄筋コンクリートを切断する。設断面図は直線できわめて平滑であり, 正確な切断が可能。ブレードの冷却のため水を使用する。

③放電パルス破砕機（工法 3）

高電圧パルス放電により鉄筋コンクリートを破砕する。コンクリート表面から 2～3cm まで水の中に浸漬した状況でコンクリートに高い電圧を瞬時にかけると，水が絶縁体になり放電パルスはコンクリート中を流れる。この時, コンクリートは絶縁破壊を起こし破砕される。

4.2 試算結果

試算結果を**図 6** に示す。工法 1 は経済性に優れているが安全性と環境保全性は劣るのに対し，工法 3 は逆に安全性と環境保全性は優れているが，経済性に劣っている。工法 2 は経済性と安全性は中間的位置づけであるが，環境保全性は劣っている。また，優位度（ｒ）は工法 1，2，3 でおよそ 6，5，10 となり，高電圧パルス放電破砕機が最も優位であった。実作業においても，防塵マスク，メガネ，耳栓等が不要でありその優位性が実感できるが，評価指標を設定することにより定量的に判断する事が可能となった。

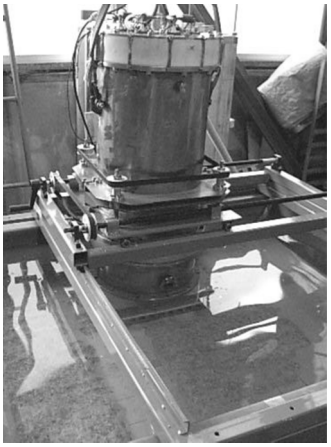
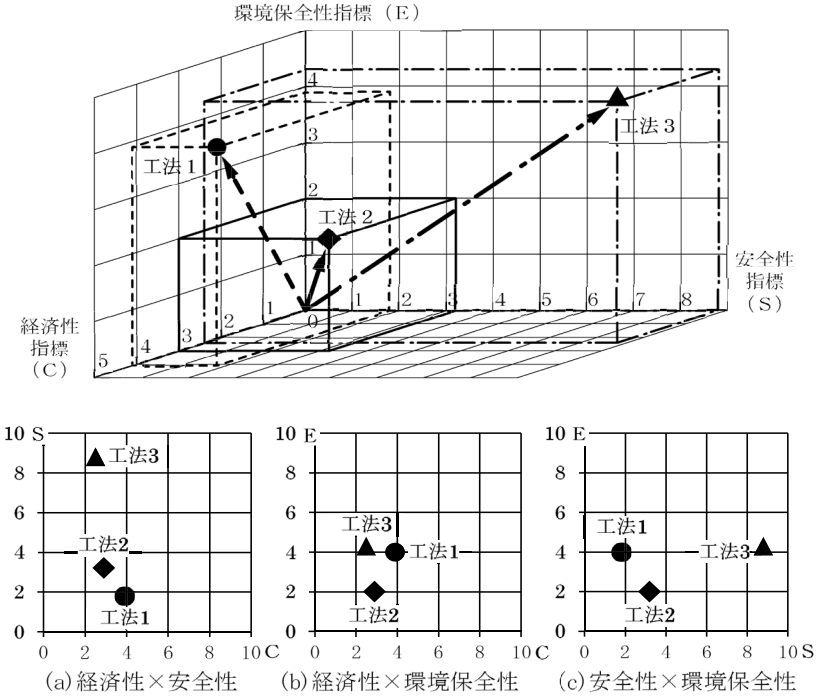
機器	ハンドブレーカ	コンクリートカッター	放電パルス破砕機
作業状況			
燃料 (ｴﾈﾙｷｰ)	軽油	軽油	電力

図 5　使用機器の概要

表 5　評価指標算定諸元

		ハンドブレーカ	コンクリートカッター	放電パルス破砕機
経済性評価	歩掛	0.3m³／日・台	26m／日・台	0.2m³／日・台
	工期	25 日	30 日	36 日
	人件費	25 日×2 万円/人日=50 万円	30 日×2 万円/人日=60 万円	36 日×2 万円/人日=72 万円
	機械損料	8 万円	10 万円	20 万円
	燃料費	3L／h×8h×25 日＝600L 100 円/L×600L×10^{-4}=6 万円	5L／h×8h×30 日＝1,680L 100 円/L×1,680L×10^{-4}=16.8 万円	10kW／h 300 円/h×8h×36 日×10^{-4}=8.6 万円
	Total	64 万円	87 万円	101 万円
	総計		252 万円	
	C	3.9	2.9	2.5
安全性評価	危険率	転倒：1,795 人 切れこすれ：1,568 人 (1,795＋1,568)／17,184=0.20	巻きこまれ：1,892 人 1,892／17,184＝0.11	感電：59 人，倒壊：569 人 (59＋569)／17,184＝0.04
	総計	0.35		
	S	1.8	3.2	8.8
環境保全性評価	CO_2 原単位	軽油 2.58kg・C／L ×3L／h＝7.74kg・C／h	軽油 2.58kg・C／L ×5L／h＝12.9kg・C／h	事業用電 0.5051kg・C／kWh×10kW＝5.05kg・C／h
	Total	7.74kg・C／h×8h ×25 日＝1548kg・C	12.9kg・C／h×8h ×30 日＝3096kg・C	5.05kg・C／h×8h ×36 日＝1454kg・C
	総計	6,189kg・C		
	E	4.0	2.0	4.3



(a)経済性×安全性　(b)経済性×環境保全性　(c)安全性×環境保全性

(2) 2 次元表示

図 6　試算結果

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，大要以下のことがいえる。

（1）解体工事に要求される性能を経済性，安全性，環境保全性の３軸で評価することが可能である。

（2）現在すでに行われている建設時の評価と合わせることにより，建築物のライフサイクルにおける評価が可能となる。

（3）本研究では地球的規模の環境負荷として CO_2 排出量に限定しているが，今後は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。地球温暖化に係る環境指標についても検討する必要がある。

６．今後の課題

経済性と安全性は，従来の評価方法を取り纏めることにより，概ね妥当な評価結果が得られた。しかし，環境保全性については，総合的な評価が困難であり，評価方法によって結果にばらつきが生じた。具体的には，環境保全性を資源循環性，低炭素性，環境安全性に分類して評価し，妥当性を検証したが，性能間でばらつきが生じたため，統一した指標の作成には至らなかった。今後，環境保全性は総合的に評価する指標が必要となる。

謝辞

本調査の実施にあたり，清水建設㈱（㈱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，2013 年 2 月
2) (一財)建築コスト管理システム研究所，新技術調査検討会：高層ビル解体工法について,建築コスト研究 NO.77，pp.46～pp.54，平成 24 年 4 月，
3) 内川祐郎ほか：大規模電力建物のライフサイクルにおける解体行為の評価（その 1.解体の要求性能と評価方法），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.653～pp.654，1998
4) 角陸純一ほか：大規模電力建物のライフサイクルにおける解体行為の評価（その 2.環境保全性分析），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.655～pp.656，1998
5) 村上一夫ほか：大規模電力建物のライフサイクルにおける解体行為の評価（その 3.環境負荷性の簡易評価法の提案），本建築学会大会学術講演梗概集，pp.563～pp.564，1999
6) 竹本正治ほか：大規模電力建物のライフサイクルにおける解体行為の評価（その 4.環境負荷性及び経済性の 2 項目による評価の試み），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.565～pp.566，1999
7) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課:平成 26 年労働災害発生状況等,平成 27 年 4 月 28 日
8) 電気事業連合会：事業者別排出係数―平成 28 年度実績―，2015 年 11 月 30 日
9) 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, 2018
DOI https://doi.org/10.3151/jact.16.358
10) 国土交通省土地・建設産業局：平成 27 年 2 月から適用する公共工事設計労務単価について，平成 27 年 1 月 30 日