

建築物の耐震レジリエンス性能 に関する研究開発

指定課題

建築物の耐震レジリエンス性能指向型設計・評価手法に関する研究
(令和4～6年度)

令和6年度 国立研究開発法人建築研究所講演会
令和7年2月21日

構造研究グループ 主任研究員 坂下雅信

巨大災害が都市に及ぼすインパクトの低減に向けて

熊本地震(2016年)等の過去の震災では、1981年以降に建設された新耐震基準に基づく建築物が、崩壊・倒壊しないことが確認されている。

一方で、地震後に継続使用できない建築物や復旧に時間を要する(もしくは技術的には復旧できるが取り壊しとなる)建築物が多く発生しており、このような被害を低減する必要がある。



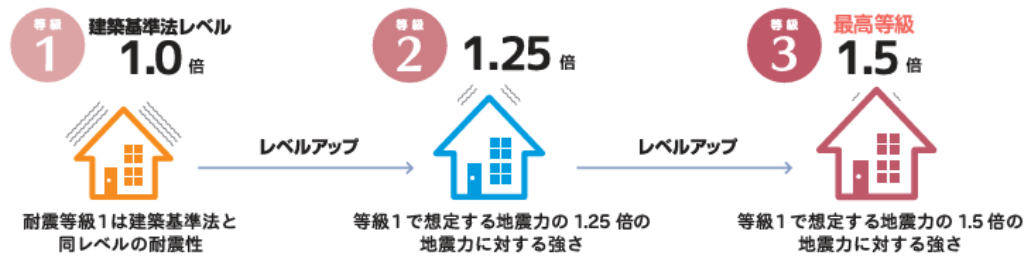
熊本地震(2016年)における被害事例

地震時の建築物の被害を低減し、地震後の機能確保を図る考え方として、住宅性能表示(耐震等級1~3)や官庁施設の耐震安全性の分類(I~Ⅲ類)等が活用できるが、「その効果が具体的に分かりにくい、対策に使える方法が限られる」といった課題がある。

1-2 耐震等級 (構造躯体の損傷防止)

●「地震に対する構造躯体の損傷(大規模な修復工事を要する程度の著しい損傷)の生じにくさ」を等級で表示します。

希に(数十年に一度程度)発生する地震力[※]が建築基準法で定められており、これに対して損傷を生じない程度のもを等級1としています。
※) 想定する地震の揺れの強さは、東京を想定した場合、震度5強に相当



住宅性能表示制度

一般社団法人住宅性能評価・表示協会
<https://www.hyoukakyokai.or.jp/download/pamphlet.html>

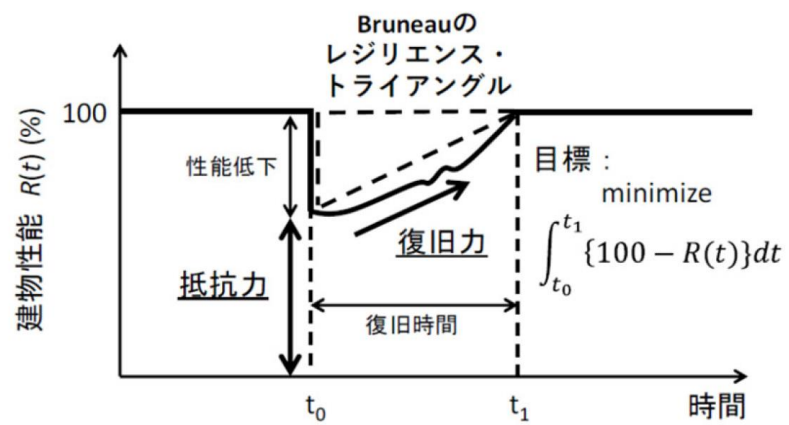
・建築物の耐力を大きくすることで、どの程度、被害が小さくなる？

・耐力を大きくすること以外に、被害を軽減できる方法はある？

建築物の所有者、利用者

地震時に建築物が受ける被害を定量的に示す指標として、建築物の性能低下と復旧時間に着目した「耐震レジリエンス性能」の活用が議論されている。設計者がこの指標を活用できるように評価手法を確立することで、建築物の所有者や利用者のニーズにあった質の高い建築物の実現や普及が期待される。

耐震レジリエンス性能が高い建物
: 性能低下が小さく、復旧時間が短いもの



建物のレジリエンス性能指標等の概念
(2020、日本建築学会)

- ・地震時に建物に生じる損傷やその影響
 - ・復旧に必要な修復方法
 - ・損傷を低減するための対策の効果
- 等を事前に検討して説明できる



建築物の所有者、利用者 設計者

耐震レジリエンス性能の評価

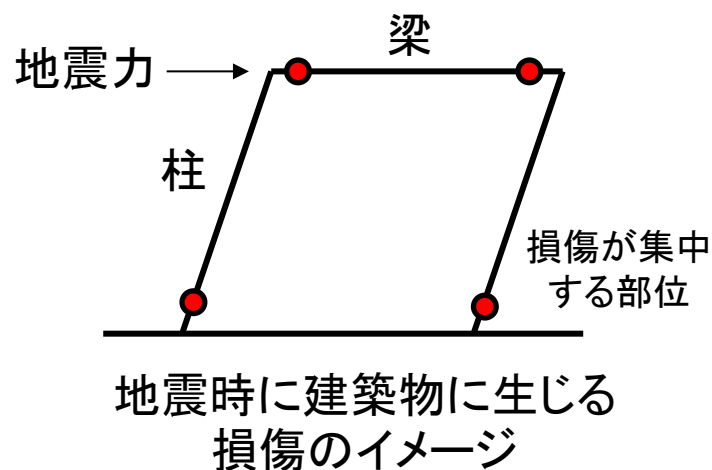
地震後の耐震安全性

- 各部材の損傷から、構造性能の低下を評価し、建物全体で積み上げ。
- 地震後の残存性能(余震に対する安全性)や継続使用の可否の判断に活用。
- 耐震性能残存率Rの算定方法について、各構造で検討。

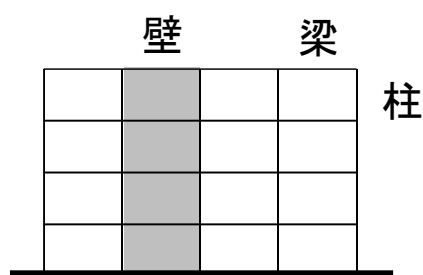
地震後の復旧性

- 各部材の損傷から、修復時間を計算し、建物全体で積み上げ。
- 建物内の損傷程度のばらつきや広がりを評価できる新たな指標となり、従来は評価が難しかった設計上の工夫や配慮を反映可能。

← 冗長性の高い建物には、双方の性能が求められる。



(評価のイメージ)



解析モデルを作成し、想定する地震(極稀)に対して、建物がどのように挙動(変形)するかを計算する。

損傷に関するデータベース

↓ 情報

各部材の損傷の程度を予測

↓

建築物全体で集計し、地震後の耐震安全性を評価

↘

耐震レジリエンス性能として総合的に評価(*検討中)

修復に関するデータベース

↓ 情報

各部材の修復方法・修復時間等を算定

↓

建築物全体で集計し、地震後の復旧性を評価

↙

(実施内容)

- 評価に必要な**損傷や修復に関する情報**の収集・整理
- 建築物全体で耐震安全性や復旧性を**評価する手法**の提案
- 提案した手法を用いた**設計例**の作成

指定課題における実施内容

(目標)

- 「耐震レジリエンス性能」を、住宅や事務所ビルを含めた幅広い用途の新築建築物の設計や評価に盛り込む
- 「耐震レジリエンス性能」の向上に効果的な技術を示す
 ← 鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造に適用できる
 共通の考え方が必要

研究対象	鉄筋コンクリート造	鉄骨造	木造
主担当	坂下(構造G)	長谷川(構造G)	中島(構造G)
対象とした建築物	連層耐力壁構造 (共同住宅の張間方向)	ラーメン構造 (事務所ビル)	軸組耐力壁構造 (戸建住宅)
損傷・修復データの収集・整理を実施した部位	耐力壁 梁	梁端 ブレース	軸組耐力壁 CLT耐力壁

損傷や修復に関する情報の収集・整理

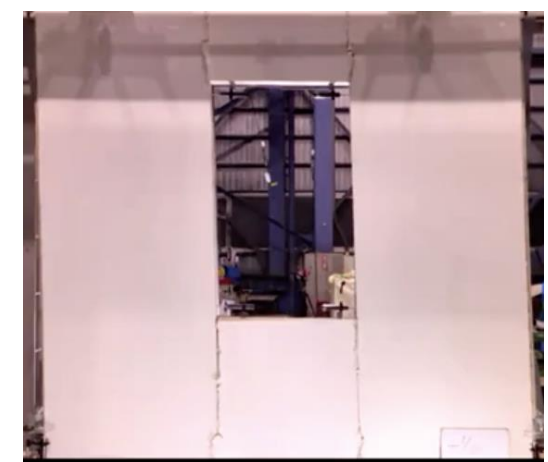
- 各部材の修復時間を算定するためには、対象とする建築物の形式ごとに、部材ごとに地震時に生じる損傷の情報(ひび割れの長さや幅、亀裂や破断の程度等)に加え、損傷に対応した修復方法の情報(エポキシ樹脂充填、ガウジング、部材の取り換え等)を整理しておく必要がある。
- このような観点で実施された既往研究に限られるため、実験やヒアリングによって、必要な情報の収集・整理を行った。



梁・耐力壁の損傷度と修復法の整理(鉄筋コンクリート造)

作業過程	作業内容	使用材料とその数量	材料費(円)	作業時間(min) 工数(人日)	単価(円) 人件費(円)
1	損傷部切除(開先含む)	エアガス切断、フレンジガス切断	81	24.4 0.051	30,000 1,525
6	塗装	錆止め塗装 さび止め塗料、面積 996cm ²	100	6.4 0.013	30,000 398
合計			材料費： 1,598円	工数：0.46人 日	人件費： 16,295円

梁端の損傷と修復法の整理(鉄骨造)



軸組耐力壁の損傷と修復法の整理(木造)

地震後の耐震安全性の評価

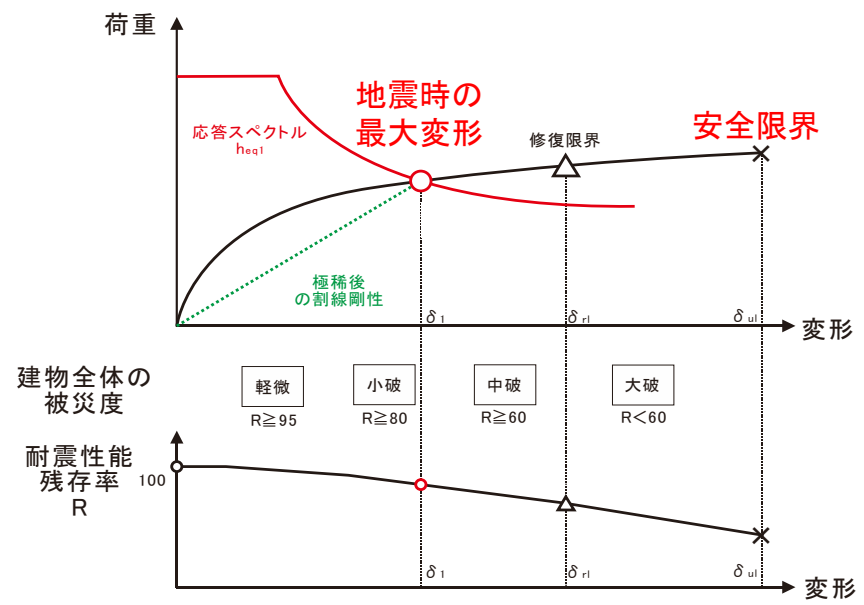
- 日本建築防災協会「震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針」で用いられている構造躯体の耐震性能残存率Rを基本とした考え方を各構造に適用。
- 地震時の最大変形もしくは累積変形から、各部材の損傷度(0~V)を定義し、建物全体で積み上げる(もしくは最大の損傷度を用いる)ことで評価。
- 建物全体の構造性能をより適切に評価するための新しい手法についても検討。

国土技術政策総合研究所が実施している総合研究開発プロジェクト「社会環境の変化に対応した住宅・建築物の性能評価技術の開発(R4~8)」と連携して、評価方法の検討を実施。

被災度判定基準
における
耐震性能残存率R
の考え方

被災度	R(%)
軽微	$95 \leq R$
小破	$80 \leq R < 95$
中破	$60 \leq R < 80$
大破	$R < 60$
倒壊	$R = 0$

安全限界に対する余裕はどの程度？



耐震性能低減率Rのイメージ

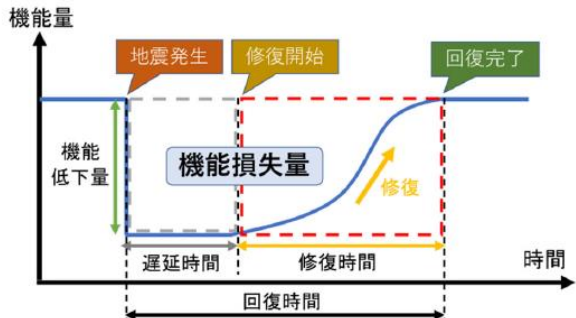


地震後の復旧性の評価

- 衣笠・向井らが提案している理想修復時間(IRT)の概念に基づいた評価を実施。
 - ← 工学的な評価を行うため、修復に掛かる時間のみを集計し、調査・設計・材料手配に掛かる時間等、建物固有の状況や社会情勢に依存する時間は除外
- 修復時間は、構造形式や建物規模等によって異なるため、相対的な指標(修復限界に対する修復時間の比率等)についても検討。

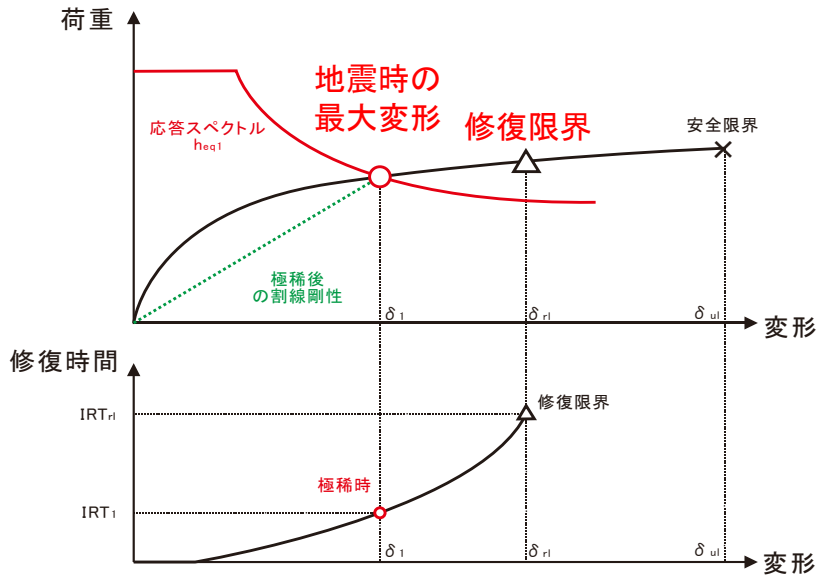
国土技術政策総合研究所が実施している総合研究開発プロジェクト「社会環境の変化に対応した住宅・建築物の性能評価技術の開発(R4~8)」と連携して、評価方法の検討を実施。

地震時における建物機能と回復時間の関係(衣笠・向井ら)



衣笠秀行: 損傷と地震時の経済損失評価, RC構造の性能規定型耐震設計の現状と将来, 日本建築学会大会PD, 2021.9

修復限界に対する余裕はどの程度?



修復時間のイメージ



鉄筋コンクリート造における検討内容

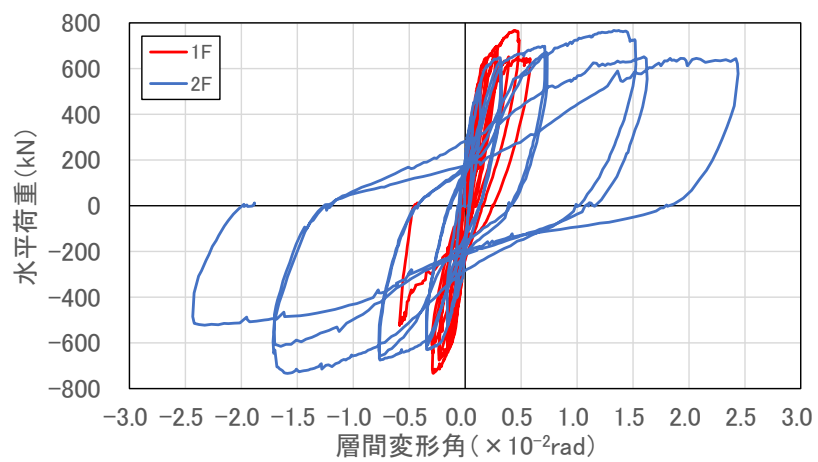
(1) 損傷データの収集を目的とした 連層耐力壁の載荷実験

共同住宅で採用される連層耐力壁を対象とした載荷実験を行い、耐力壁の**損傷データの収集**を行った。

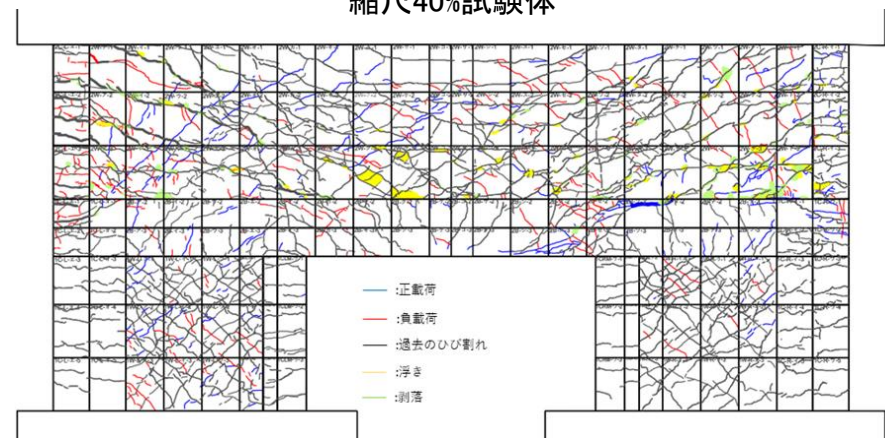
また、下階壁抜け部分の枠梁に配慮した設計を行うことで、設計時の想定通りの崩壊機構が形成されることを確認した。



縮尺40%試験体



各階の荷重変形関係



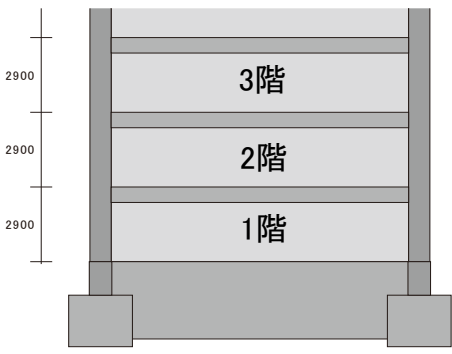
ひび割れ長さ、浮き・剥落面積等の損傷データの収集

鉄筋コンクリート造における検討内容

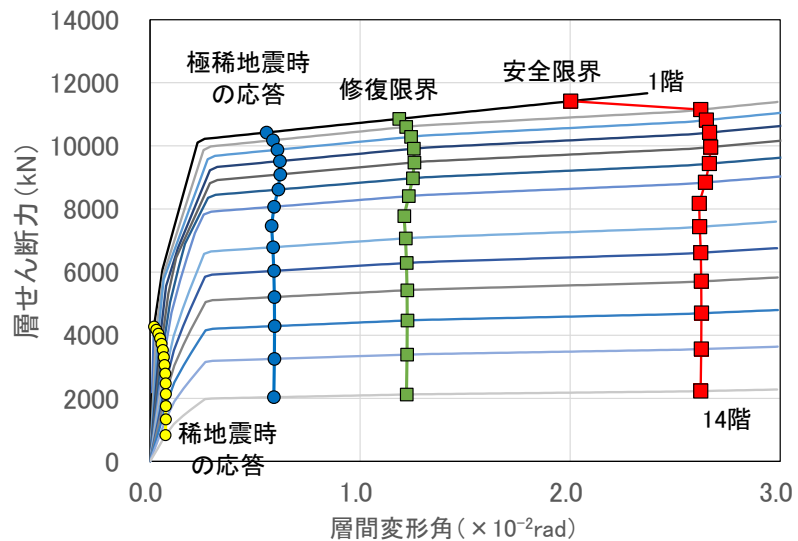
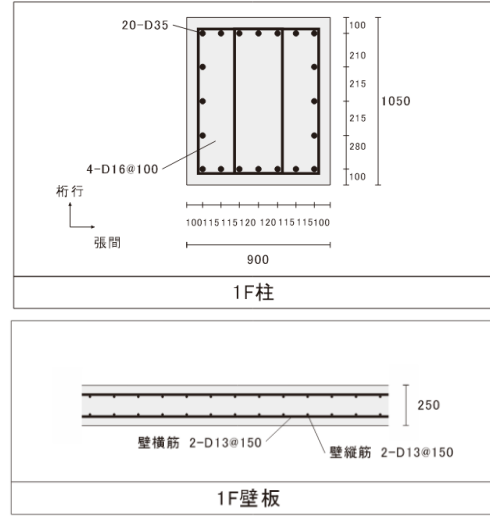
(2) 連層耐力壁架構を対象とした試算

14階建ての連層耐力壁架構の設計例を作成し、極稀地震時に生じる最大変形や残留変形等を求めた。

また、各部の損傷状況を基に、極稀地震時以外の状態も含めて、架構の代表変形、耐震性能残存率R、修復時間の関係を求めた。



検討対象となる構面
(1階が曲げ降伏)



各階の層せん断力－層間変形関係

損傷度	I	II	III	IV	V
クライテリア	ひび割れ発生	ひび割れ幅 0.2mm以上	ひび割れ幅 1.0mm以上	ひび割れ幅 2.0mm以上	曲げ破壊もしくはせん断破壊
η	0.95	0.7	0.4	0.1	0

損傷度と耐力低減係数 η の関係

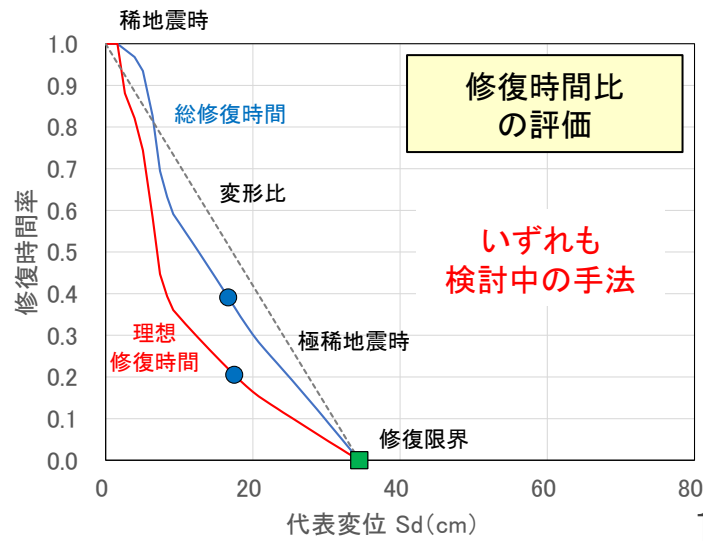
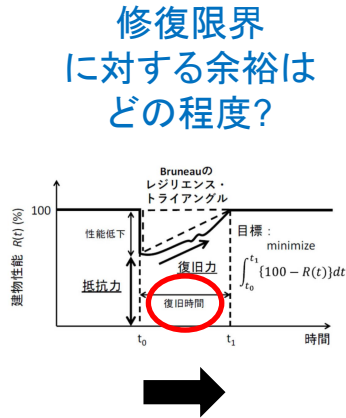
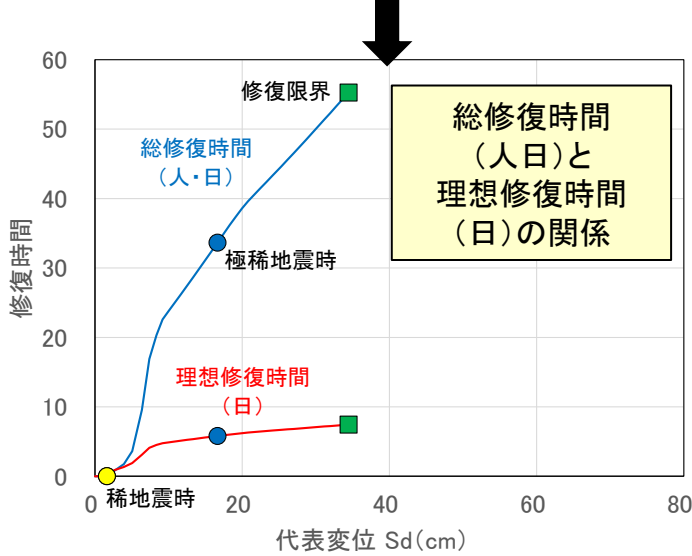
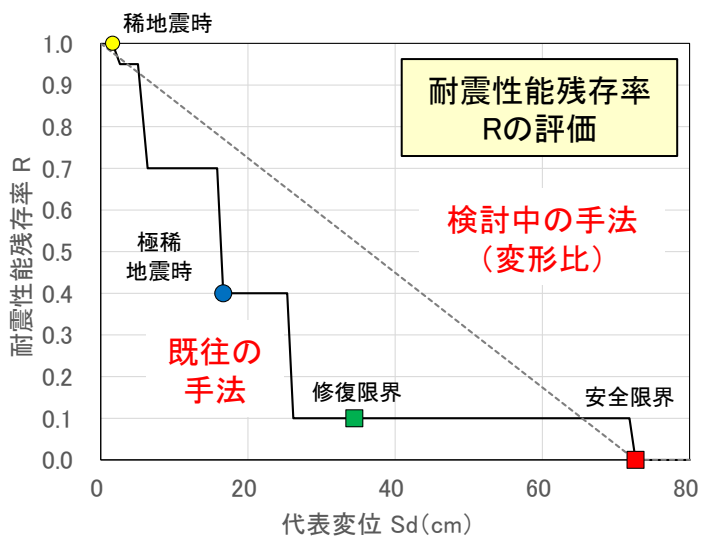
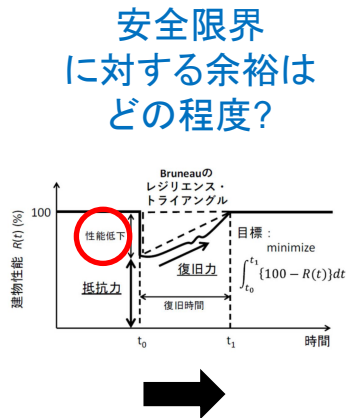
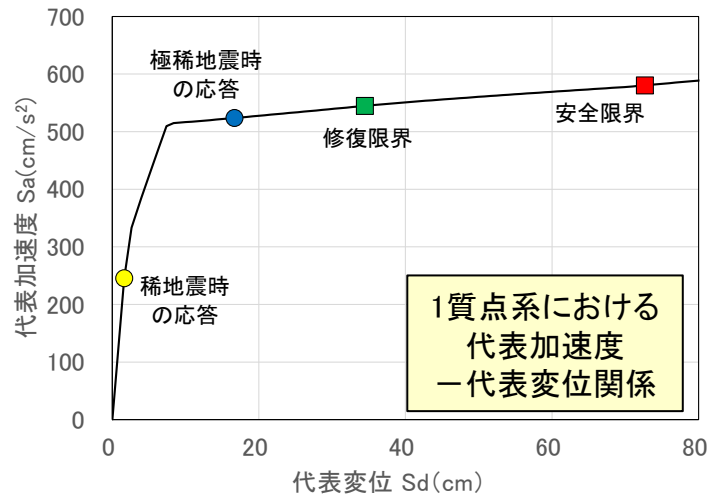
ひび割れ幅	修復時間		工法
	人・日/mまたは人・日/m ²		
0.2mm以下	0.029		シール工法
0.2mm以上	0.238		低圧樹脂注入工法
剥落	7.10		RCパッチング工法

修復方法と修復に必要な時間



鉄筋コンクリート造における検討内容

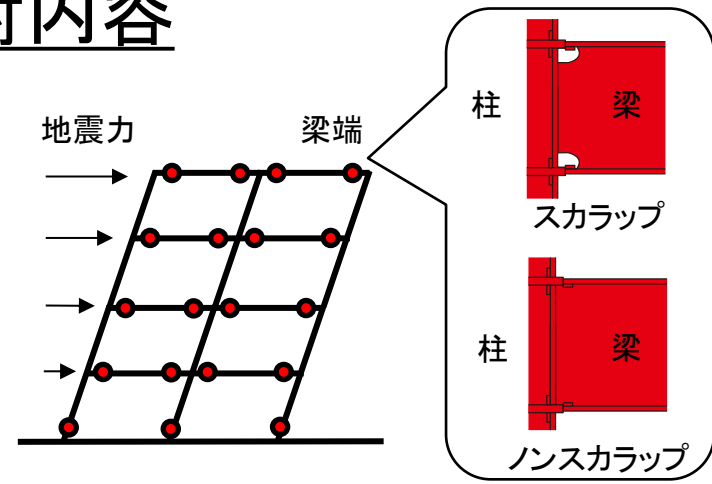
(2) 連層耐力壁架構を対象とした試算



鉄骨造における検討内容

事務所ビルの梁端部を対象に、地震時の**損傷と修復方法**を検討し、修復方法ごとに修復時間やコストの計算方法を提案した。

また、試設計建物を対象に、**地震後の継続使用の可否や修復コスト**等を試算した。



(1) 梁端部の損傷度Dと被災度区分の関係調査及び補修方法提案

スカラップ梁端部及び**ノンスカラップ梁端部**について、既往の研究の実験データを調査して、梁端部の損傷度D値と被災度区分との関係を整理し、補修対象である**II_s、III_s、IV_s**に対応する**6通りの補修方法**を検討し、提案した。

損傷度Dの区分	構造に関する被災度区分判定 ²⁾	予想される梁端部の損傷の状況	梁端部の補修方法
D=0 (緑)	0s (無被害、軽微)	梁端部は概ね弾性挙動の範囲内であり、構造的な被害はほとんど無い状態。	補修不要。
0<D<0.2 (黄)	I _s (小破)	梁端部は降伏している状態であるが、亀裂は生じていない状態。	補修不要。
0.2≤D<0.5 (オレンジ)	II _s (小破～中破)	梁端部のスカラップ底から亀裂等が生じ、それがやや進展している状態(板厚方向に亀裂は貫通していない)。フランジ部材で少し曲がりが生じている状態。	スカラップを少し拡大して、亀裂部分をガウジングし、そこを溶接する補修。
0.5≤D<1.0 (ピンク)	III _s (中破)	スカラップ底の亀裂が板厚方向に進展して貫通、または、部分的に破断している状態。フランジで局部座屈(小)が生じている状態。	スカラップ拡大による補修。対象部分のフランジは切断し、幅広の裏当て金による補修。局部座屈の状況によっては、下記IV _s と同様の補修。
1.0≤D<1.5 (赤)	IV _s (中破)	梁端部の下フランジが全断面破断し、ウェブにも少々亀裂が進展している状態。フランジで局部座屈(中)が生じている状態。	損傷部位のフランジとウェブを切断して、T形の部材を切断部分に溶接接合する補修方法。
1.5≤D (紫)	V _s (大破)	梁端部の下フランジで全断面破断が生じ、ウェブにも亀裂が進展し、部分的に破断している状態。フランジ等で局部座屈(大)が生じている状態。	上記IV _s の補修方法または、床スラブを含め梁ブラケット部分からの取り替えによる補修。床スラブコンクリートは打ち直し。

継続使用可能
補修対象
補修不可

スカラップ梁端部の損傷度Dと被災度区分



鉄骨造における検討内容

(2) 梁端部の被災度に応じた補修方法の作業工程等に基づく、工数、コストの計算方法の提案と計算プログラムの開発

スカラップ梁、ノンスカラップ梁について、被災度区分(Ⅱs、Ⅲs、Ⅳs)に応じた補修方法の作業工程、作業内容に基づく補修時間、コストの計算方法を提案し、任意のH形断面梁部材に関して、これらを自動計算し、集計するプログラムを開発した。

被災度Ⅱs

スカラップ梁Ⅱsの補修 (H-400x200x9x12)

作業過程	作業内容	使用材料とその数量	材料費(円)	作業時間(min) 工数(人日)	単価(円) 人件費(円)
1	スカラップ加工	エアガス切断: 9tx90L	酸素が 115 ℓ, アセチレンが 2 ℓ	11.2 0.023	30,000 700
2	ガウジング	深さ10mm, 長さ130mm	ガウジング棒, パル金属量 82g	13.3 0.028	40,000 1,105
省略					
7	塗装	錆止め塗装	さび止め塗料, 面積 520cm ²	3.3 0.007	30,000 208
合計			材料費: 384円	工数: 0.215人日	人件費: 9,005円

被災度Ⅲs

スカラップ梁Ⅲsの補修 (H-400x200x9x12)

作業過程	作業内容	使用材料とその数量	材料費(円)	作業時間(min) 工数(人日)	単価(円) 人件費(円)
1	損傷部切除(開先含む)	エアガス切断, フランジガス切断	酸素が 1175 ℓ, アセチレンが 29 ℓ	24.4 0.051	30,000 1,525
省略					
5	超音波検査	検査		0.057	2,847
6	塗装	錆止め塗装	さび止め塗料, 面積 996cm ²	6.4 0.013	30,000 398
合計			材料費: 1,598円	工数: 0.46人日	人件費: 16,295円

被災度Ⅳs

スカラップ梁Ⅳsの補修 (H-400x200x9x12)

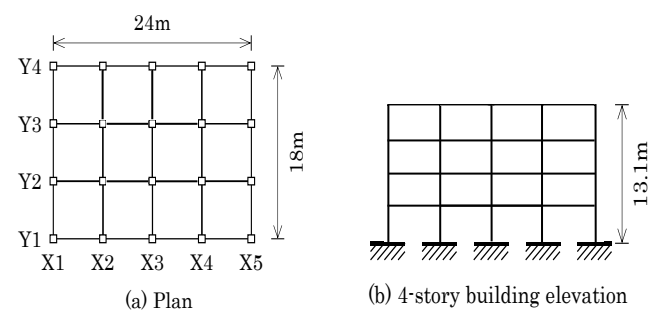
作業過程	作業内容	使用材料とその数量	材料費(円)	作業時間(min) 工数(人日)	単価(円) 人件費(円)
1	損傷部切除	エアガス切断, フランジガス切断	酸素が 1342 ℓ, アセチレンが 56 ℓ	68.3 0.142	30,000 4,270
	G仕上	エアG仕上, フランジG	研削砥石, 仕上げ面	41.7	30,000
省略					
5	超音波検査	検査		0.236	11,819
7	塗装	錆止め塗装	さび止め塗料, 面積 5,076cm ²	32.5 0.068	30,000 2,030
合計			材料費: 4,986円	工数: 1.43人日	人件費: 49,271円

スカラップ梁端部の被災度区分に応じた補修方法の作業工程と工数等の計算

鉄骨造における検討内容

(3) 試設計建物(4層、9層事務所ビル)を用いた復旧性評価の計算事例の作成

4層、9層の試設計建物を対象に、梁端仕様(スカラップ、ノンスカラップ)をパラメータとした地震応答解析により梁端部の損傷度Dを計算し、耐震性能残存率Rや復旧性(修復工数、コスト)の評価、地震動特性や梁端仕様による建物性能の比較を行った。



試設計建物の概要

4-ER1.0-MC4										最大層間変形角(rad)					
Y1、Y4通り					Y2、Y3通り										
0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.013	
0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.17	0.14	0.16	0.16	0.16	0.14	0.17	0.017	
0.15	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.37	0.32	0.36	0.36	0.36	0.36	0.32	0.37	0.016
0.13	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.44	0.37	0.40	0.40	0.40	0.40	0.37	0.44	0.014

スカラップ梁

4-ER1.0-MC6										最大層間変形角(rad)					
Y1、Y4通り					Y2、Y3通り										
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.013
0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.017
0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.14	0.016
0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.16	0.13	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14	0.16	0.014

ノンスカラップ梁

極稀地震時の損傷度Dの分布

- 入力地震動は
- ・極希地震
- ・長継続時間地震
- ・断層近傍地震(2倍)の3通り

集計結果

地震動	スカラップ梁(MC4)の建物					ノンスカラップ梁(MC6)の建物				
	損傷度(D値の最大)	被災度区分	補修箇所数	補修工数、コスト	耐震性能残存率R	損傷度(D値の最大)	被災度区分	補修箇所数	補修工数、コスト	耐震性能残存率R
極希地震 ER1.0	0.44	Ⅱs (小破~中破)	Ⅱs: 32箇所	9人日、382,788円	71%	0.16	Ⅰs (小破)	無し	そのまま継続使用可能	89%
長継続時間地震 LD1.0	0.93	Ⅲs (中破)	Ⅱs: 24箇所 Ⅲs: 32箇所	25人日、994,819円	38%	0.34	Ⅰs (小破)	無し	そのまま継続使用可能	77%
断層近傍地震 NF2.0	2.83	Vs (大破)	Ⅱs: 4箇所 Ⅲs: 20箇所 Ⅳs: 4箇所 Vs: 32箇所	修復不可、取り壊し	0%	1.03	Ⅳs (中破)	Ⅱs: 20箇所 Ⅲs: 12箇所 Ⅳs: 4箇所	36人日、1,276,060円	31%

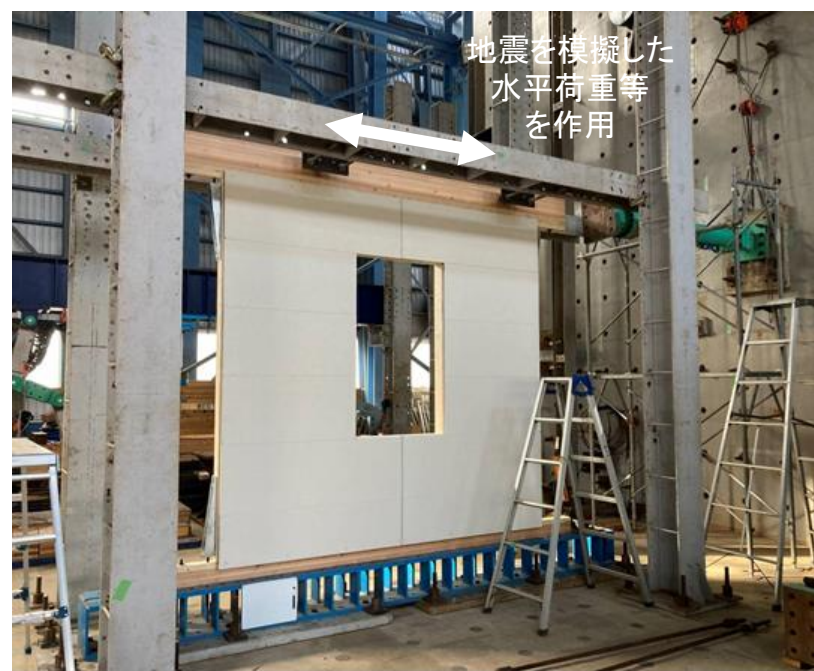


木造における検討内容

戸建住宅を対象に、耐震性能残存率Rや修復時間、コストを試算した。

(1) 変形角と仕上げ材や構造材の損傷関係の整理と対応する修復工法の整理

ヒアリングや施工実験、既往の文献等の知見に基づき、各工程に要する時間と費用を整理した。



試験体と加力の様子

経験最大層間変形角(rad)	被災度区分判定基準		損傷確認試験	
	損傷状況	修復方法	損傷状況	修復方法
1/450			・開口角より石膏ボード目地に沿って10cm程度しわが発生	E-1
1/300	開口部隅の部分的な破れ	E-1	・石膏ボード目地に沿ったしわが開口角より上下桟まで通る ・開口角の亀裂が10cm程度の亀裂が発生	E-1
1/200	開口部隅破れ拡大	E-1	・一部開口角より石膏ボード目地に沿って亀裂が上下桟まで通る	E-1
1/150	開口部隅破れ天井まで通る、ボード部分的な割れ	E-2	・開口角より石膏ボード目地に沿った亀裂が上下桟まで全面所で通る	E-1
1/120				
1/100	開口部隅破れ天井まで通る、ボード部分的な割れ	E-2	・開口角、壁端部で石膏ボードに欠けが発生	E-2
1/75			・壁端部の1/3程度で石膏ボードに欠けが発生、欠片が落下	E-2
1/60				
1/50	ボード割れ拡大	E-2	・壁端部の欠けが上下に通る	E-2
1/45				
1/30	ボード割れ天井まで通る	E-2	・開口部、壁端部から石膏ボードの欠片が多数落下	E-2
1/20				

開口隅角部の内装下地・壁紙の損傷状況比較
左:被災度区分判定基準 右:当該試験

木造における検討内容

戸建住宅を対象に、耐震性能残存率Rや修復時間、コストを試算した。

- (1) 変形角と仕上げ材や構造材の損傷関係の整理と対応する修復工法の整理
ヒアリングや施工実験、既往の文献等の知見に基づき、各工程に要する時間と費用を整理した。

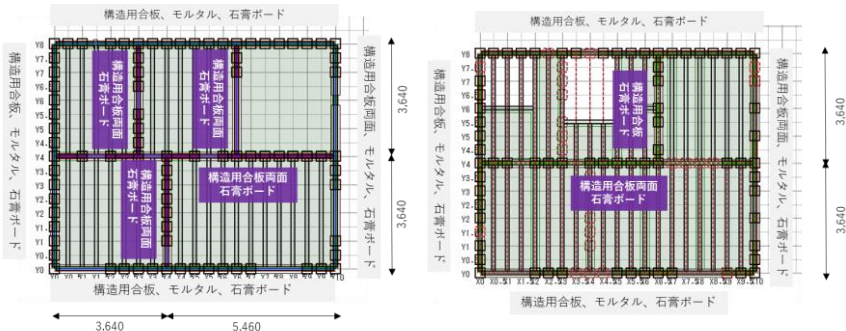
		記号	工事名	工事概要
構造 躯体		A-1	釘接合部の補強	耐力壁面材に釘を増し打ちする。(ex.CN50@100→@50)
		A-2	面材の張替え	新規面材に張り替える
外壁	湿式: モルタル	B-1	シール	幅が狭く、浅いひび割れ(0.2mm 未満)からの漏水を防止するために、ひび割れに沿ってシール材を塗布
		B-2	ひび割れ改修	モルタル層のひび割れ部(0.2mm 以上)にU字形の溝を設け、モルタル等を充填する工法。
		B-3	モルタル充填	モルタル層のはがれ、剥落が発生している比較的大きな欠損部に、モルタルまたはポリマーセメントモルタル等を充填する。
		B-4	塗替え	既存のモルタル層を取り除き、新たにモルタル塗り仕上げを行う。
		B-5	塗替え(下地込み)	既存のモルタルを下地材を含め取り除き、新たにモルタル塗り仕上げを行う。 既存のモルタル層を取り除き、新たにモルタル塗り仕上げを行う。
	湿式: 吹付	C-1	ひび割れ補修	外壁塗装剤のひび割れを補修材で埋め補修する。
		C-2	下地材補修後の塗装	塗装下地の損傷を修復後、下地修復部に塗装仕上げを施工する。
	乾式: サイディング	D-1	ひび割れ補修	サイディングに生じた微細なひび割れを補修する。
		D-2	張替え	サイディング仕上げを全面撤去し、下地から施工する。
	内装	下地・壁紙	E-1	張替え
E-2			下地材・仕上げ材の張替え	内装仕上げ材及び下地材を撤去し、新規の下地材(石膏ボード等)や仕上げ材に張り替える。

修復手順の具体的な説明

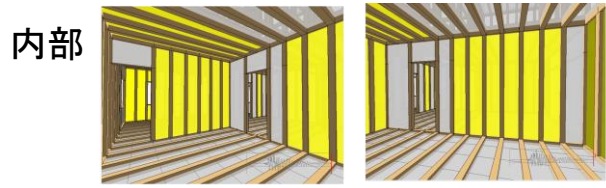
木造における検討内容

(2) 倒壊解析ソフトWallstatを用いた3階建て住宅の復旧性評価の計算事例の作成

① 実物件をモデル化



② 地震波を入力



損傷
 大: オレンジ
 中: 黄色
 小: 緑

③ 損傷程度を大中小に色分けし分類

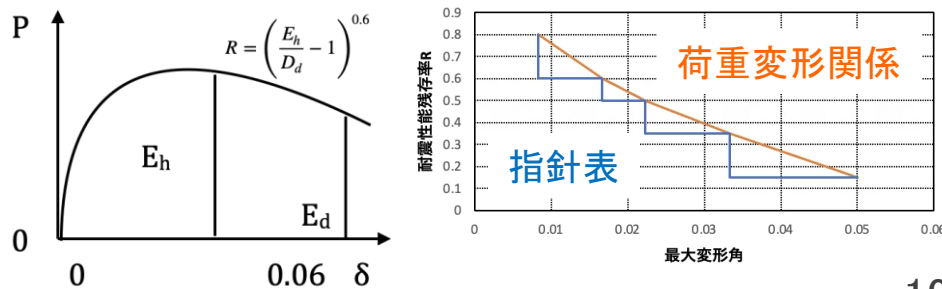
④ 損傷程度毎に損傷した壁を積算

⑤ ヒアリングデータから修復時間と費用を算出

内壁部のみ、東を1階・西を2階、南を3階に読み替え

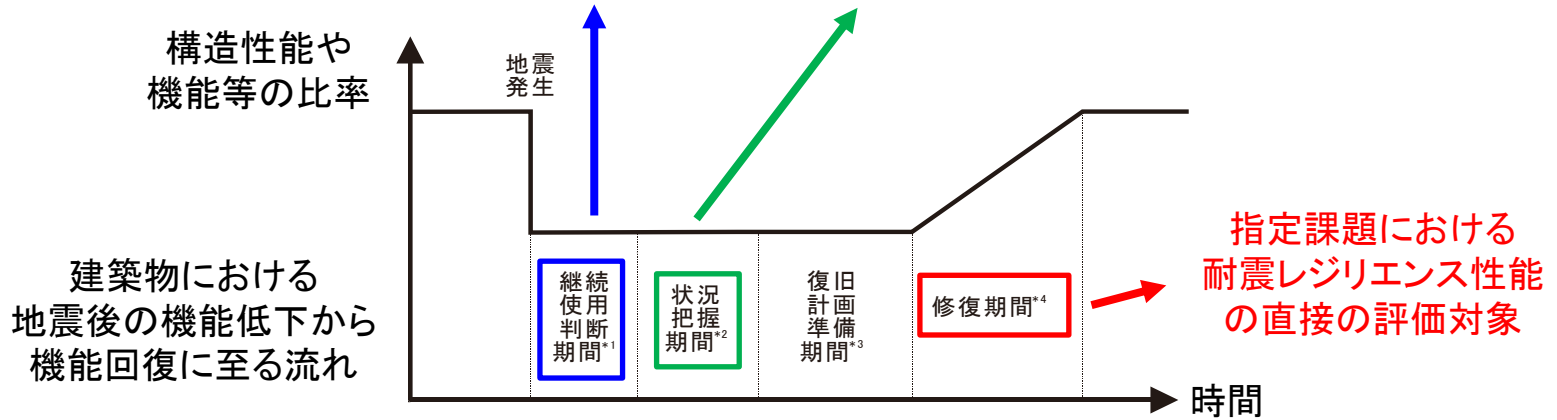
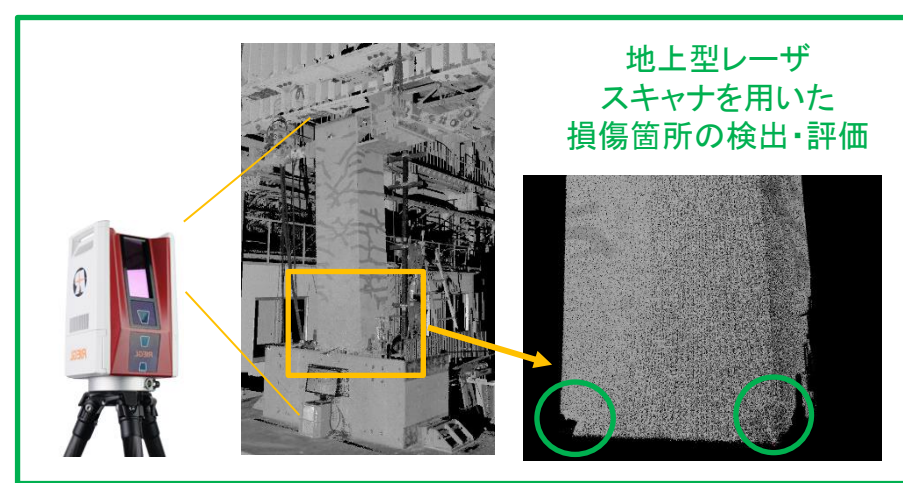
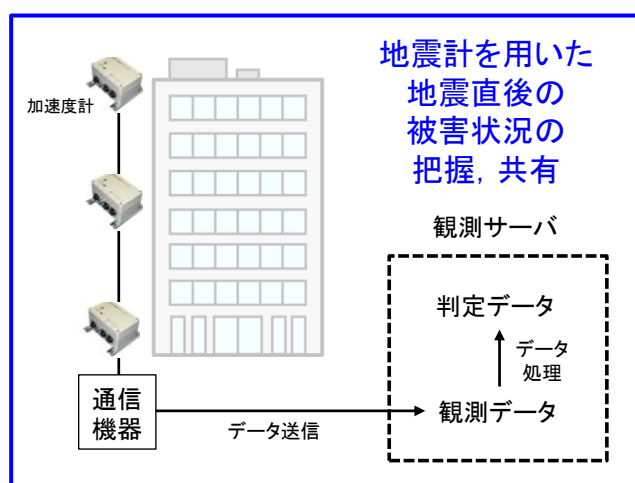
		東	西	南	北	損傷P合計数	時間 (人・日)	費用 (円)	
小(Small)	Sモル	4.5			4	1.5	10	9.14	211,006
	S吹付								
	Sサイ								
	S内	4.5			4	1.5	10	3.01	72,345
中(Middle)	S内のみ	1	3.5				4.5	1.36	32,555
	Mモル	9.5	12.5	6	8		36	18.32	406,290
	Mサイ								
大(Large)	M内	9.5	12.5	6	8		36	23.96	544,324
	M内のみ	7.5	1.5				9	5.99	136,081
	Lモル		3.5				3.5	6.96	151,283
合計	Lサイ								
	L内のみ		0.5				0.5	1.01	21,125
合計		36.5	34	20	19	109.5	69.75	1,575,009	

⑥ 耐震性能残存率Rを計算



その他の取り組み

これまでに述べてきた設計時の事前検討だけでなく、実際に地震が生じた場合に、建築物の被害状況を迅速に把握し、早期の復旧に繋げるための研究開発についても、外部の研究機関・協会・民間企業等と連携して実施している。



まとめ

地震後の継続使用や早期復旧を可能とし、建築物の所有者や利用者のニーズにあった質の高い建築物の実現や普及を進めるための方法として、「耐震レジリエンス性能」の考え方を新築建築物の設計や評価に盛り込むための手法について検討した。

鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造の各分野で、評価に必要なとなる損傷や修復時間等のデータ収集や評価手法の提案、設計例の作成等を進めると共に、地震後の建築物の被害状況を早期に把握するための研究開発も実施した。

今後は、地震後の耐震安全性と復旧性の評価指標を用いて、「耐震レジリエンス性能」を最終的にどのように評価するか議論を進めると共に、適用範囲の拡大に向けた検討を進めていく予定である。