

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18149

研究課題名(和文)動的・多方向載荷実験に基づく柱の残留傾斜角を用いた建物の残存耐震性能の解明

研究課題名(英文)Development of evaluation of buildings by residual deformation angle of column

研究代表者

島田 侑子 (SHIMADA, Yuko)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90586554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地震動を受ける鉄骨造建物に生じる被害状況から各被害レベルに対応する建物の残留変形角の関係を詳細かつ明快に示すこと、またそのツールについて検討を行うことを目的とする。前者については応答解析の結果、(1)FAランクであっても50kine、75kineの入力に対して大きな残留変形角が生じた、(2)BMu/Mpc=1.3や1.1の場合、比較的大きな残留変形角が生じた、(3)大きな残留変形角を生じる入力波に明確な傾向はない、ことが判明した。後者に関しては、応力発光塗料が大きな応力を生じた瞬間に発光し、それを保持することが難しいこと、カメラ等の検出システムや発光状況の数値化が必要と思われる。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed that evaluation of relationship between residual deformation angle and damage of steel building by response analysis and basic consideration of easy visual tool for showing deformation angles. By parametric analysis of steel frames, we gained followings; (1)In the frames with FA members, large residual deformation angles are occurred by input wave in 50kine and 75kine, (2)If the maximum bending moment of column base is 1.1-1.3 times to full-plastic moment of column, large residual deformation angles are occurred, (3)The residual deformation angles are varied by earthquake waves. As easy visual tool for deformation angles, luminescent paint is used. It illuminates the moment that metal recieved large strain, but the luminescent is not keep over 1-2 sec. Therefore, high-brightness visual detection system for evaluate the damage of member or structure, and the high-quantitative evaluation of luminescent are needed.

研究分野：鋼構造

キーワード：残留変形角 損傷評価 応答解析 応力発光塗料

1. 研究開始当初の背景

被災した建物の直接的な危険度を判断する応急危険度判定や、修復まで考慮した被害程度を判断する被災度区分判定¹⁾において、写真1に示すように計測される柱の残留傾斜角は地震による建物の損傷を直接表現する指標の1つとして用いられている(図1)。しかし、上記に示したような被災後の損傷判断で設定されている残留傾斜角の値が建物全体の被害程度を正確に評価しているかどうかは明確ではない。これは被災した建物全ての残留傾斜角を計測している訳ではなく、実際にどれくらいの残留傾斜角が生じたのかという情報は得られにくいことによる。また、既往の研究において、応答解析による検討や被災した建物についてコスト面から修復限界となる残留変形角を示した検討、居住性や施工性、安全性の観点からの修復限界となる残留変形角を示した研究など、おおよそ建物が塑性化し始めた段階での層としての残留変形角について検討したものに留まっていることによる。このため、建物が地震動を受けて大きく塑性変形した場合にどの程度の柱の残留傾斜角が発生するか、建物の崩壊型や部材種別等も含めた詳細ははっきりしておらず、被災した建物が更なる地震に耐えうるのか、そうでないのか判明していない(図2)。被災した建物の残存耐震性能を正確に評価できていないと断定できない判断指標を使用したままでは、被災後の建物の継続使用の可否や復旧に大きな影響が生じる。

筆者らは層モデルにMSSモデルを用い、倒壊に至らしめるまで追跡可能な多質点応答解析を用いて、ある程度建物の塑性化が進行すると最も被害の大きい層の水平変形が1方向に偏ることや、最大耐力時および骨格曲線に応じた層の残留変形角がどのようになるかを検討してきた。これらはあくまでも質点系での検討のため、骨組において、梁端や柱脚など部材端での挙動と残留変形角の対応関係は明らかになっていない。なおかつ上記の解析では、入力地震動の特性による層の残留変形角のばらつきが大きいので、層崩壊型を反映した質点系であっても柱の残留傾斜角と建物の残存耐震性能の関係性は明確になっていない。より現実的かつ総合的に柱の残留傾斜角で建物の被害程度を判断し、残存耐震性能を評価するためには、骨組での損傷と残留変形角の関係性を明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

柱の残留傾斜角は建物の損傷を直接表す計測しやすい項目であり、被災度区分判定などでも、過去の研究例や地震被害事例をふまえて設定された柱の残留傾斜角の値により、建物の被害状況を判断する指標の1つとして使用されている。しかし、実のところ柱の残留傾斜角の値が建物全体として

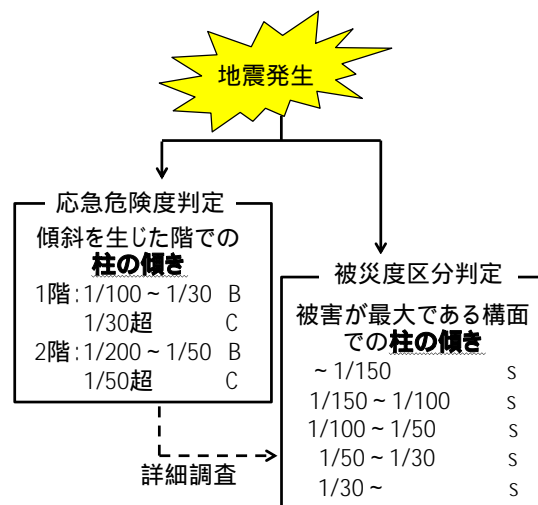


図1 被災建物における柱の残留傾斜角

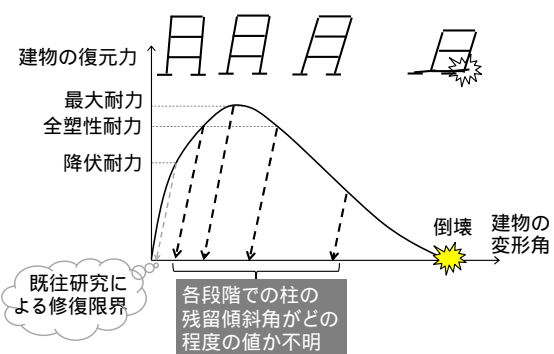


図2 残留傾斜角と建物の残存耐震性能

どのくらい深刻な被害程度を示しているのかはよくわかっていない。より正確に建物の被害程度を見極め、速やかで的確な復旧に資するためには柱の残留傾斜角の値がどの程度の建物の残存変形性能を表すのかを明確にする必要がある。本研究は両者の相関関係を詳細かつ明快に示すこと、またそのツールについて検討を行うことを目的とする。前者については、鋼部材の現実的な復元力特性を反映し、アンカーボルト降伏型の露出型柱脚を有する鉄骨造建物の地震応答解析を用いる。柱脚の塑性化により第1層上部に損傷が集中する場合には、残留変形角がどのような値をとるのか、またその値に入力地震動がどのように関係するのかを主に検討する。後者については、応力発光塗料を用い、変形量と発光輝度の対応関係を検討し、最大変形角や残留変形角の表現方法として、使用可能かどうかを検討する。

3. 研究の方法

3.1 解析による残留変形角の検討

階高 3.5m, スパン 7m, 各層の1スパンあたりの重量を 400kN とした, 3層, 6層または9層の無限均等ラーメン骨組である(図3)。柱は鋼種に建築構造用冷間ロール成形角形鋼管(BCR295)を想定した箱形断

面部材、梁は建築構造用鋼材(SN400)としたH形断面材とした。解析骨組の設計では現行の耐震設計法のルート3による必要保有水平耐力に対する塑性設計のみを行い、部材断面を算定した。保有水平耐力は節点振り分け法により計算した。解析における条件は以下の5つを設定した。

解析骨組の崩壊型は梁崩壊型となるように設計し、各節点の柱梁耐力比は1.5以上を満足させる

骨組に一般性を持たせるために3層ごとに柱の断面を同一とし、梁については柱の断面が切り替わる節点ごとに断面を変化させる

柱及び梁の種別は骨組全体において同一とし、各部材の幅厚比は部材種別の区分値となるように設計する、

梁のフランジ板厚 t_f とウェブ板厚 t_w の比 t_f/t_w を1.5とする、

保有水平耐力の算定並びに地震応答解析に用いる各部材の降伏応力度は基準強度(F値)×1.1とする

解析骨組に関するパラメータは、層数、柱及び梁の種別、柱脚耐力比($B M_u / M_{pc}$)である。部材種別はFA, FB, FCとし、柱脚耐力比は1.3として保有耐力接合とした場合と、1.1, 0.9, 0.7の非保有耐力接合とした場合の4種とした。また柱脚部が非保有耐力接合となる場合は、第1層の D_s 値の割増し分もパラメータとし、 D_s 値の割増し分を0.05, 0.04, 0.02, 割増し無の4種設定した。

解析方法について、数値積分には平均加速度法を用い、減衰は1次と2次の減衰定数を2%としたRayleigh型とし、骨組のP- Δ 効果については、負の剛性効果¹⁾として考慮した。

解析における入力地震波はEl Centro波、Taft波、八戸波、神戸波、2011年仙台波(NS, EW)とし、入力加速度に係数を掛けて最大地動速度をそれぞれ25, 50, 75cm/sに基準化した上で解析を実施した。

3.2 応力発光塗料による変形量の検討

地震後には確認しにくい最大変形角の確認や、残留変形角をはっきりと目視で確認しやすくするため、応力発光塗料を部材表面に塗布することで、これらのデータを目視確認できるのかどうかを確認する。応力発光塗料として、土木分野や機械分野などで使用例があるエポキシ系塗料ML-F2ET-3(堺化学工業製)を用いる。塗布に際しては、メーカーに規定された主剤と硬化剤の重量比を守り、アセトンで表面を拭いた上で、筆により応力発光塗料を塗布した。塗布対象は図4に示したアルミ合金A6063の部品を溶接接合で製作した小型骨組であり、柱や梁の端部約20mmの範囲外側に塗布した。塗布した部分の塗料厚みは表1に例示する。この塗料塗布位置の内側に対応するように1軸塑性歪ゲージ(東京測器製YEFLA-5-5LT)を貼付し、応力発光塗料での発光状況と歪による変形量が1対1に対応するようにした。このようにしたア

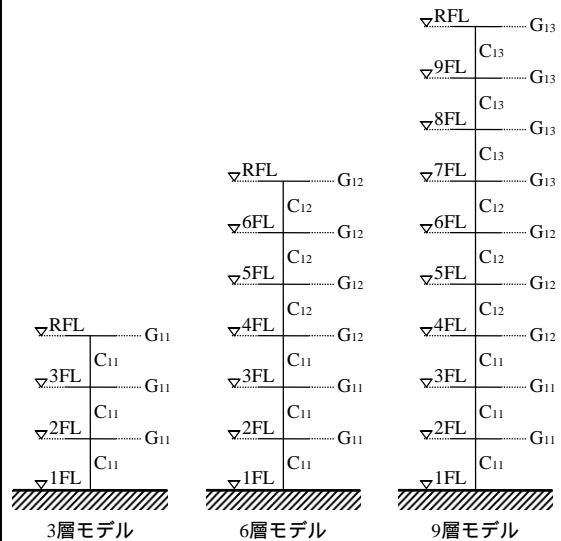


図3 解析モデル

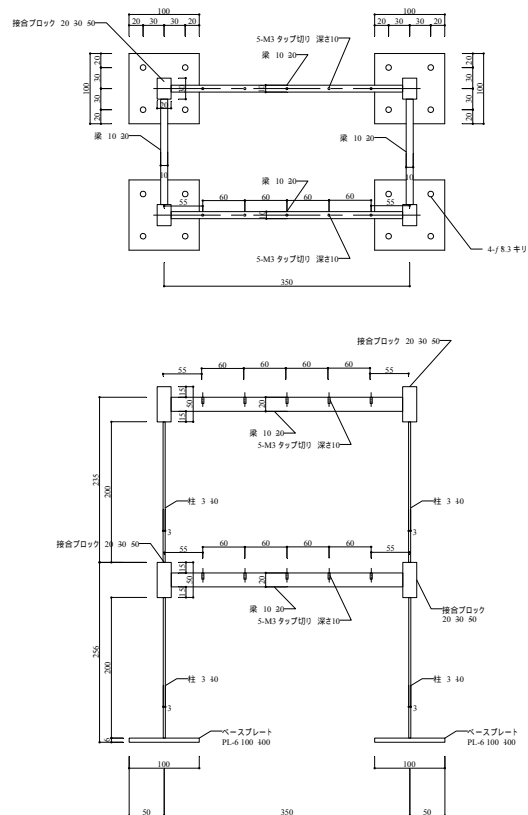


図4 アルミ小型骨組試験体

ルミ骨組の頂部に手で水平方向に力を加え、骨組全体を変形させて、歪ゲージと部材端部の発光状態をカメラおよび輝度計(コニカミノルタ製LS100)で確認した。

4. 研究成果

4.1 解析結果による残留変形角の値

ここでは1層の残留変形角(以下、 θ_{res} と記す)を評価する。図5に3層モデルにおける残留変形角の分布、図6に6層モデルにおける残留変形角の分布を例示する。入力波25kineの場合は層数、部材の構造種別の区別

なく θ_{res} は概ね 0.004 以下を示している。また入力波によるばらつきも見られない。一方、入力波 50kine の場合、3 層の構造種別 FA では θ_{res} が最大でも 0.004 程度であったのに対し、FB、FC の $B M_u / M_{pc}=1.3$ のプロットでは、一部 θ_{res} が 0.1 程度示した。6 層の構造種別 FA で示した θ_{res} の値に対し、FB、FC では全体的に θ_{res} の値がやや小さめになっており、0.005 を超すようなものはない。この時、大きな値を示す入力波は神戸波、八戸波、仙台波など明確な傾向は見られない。更に入力波 75kine の場合、3 層、6 層共に構造種別 FA の $B M_u / M_{pc}=1.3$ 、1.1 などの一部のプロットで θ_{res} の値が 0.01 程度かそれ以上の値を示す。FB になると θ_{res} の値は全体的に抑えられるが、FC では $B M_u / M_{pc}=1.3$ の大半と $B M_u / M_{pc}=1.1$ 、0.7 の一部のプロットで非常に大きな値を示す。このように入力波と部材バランスにより θ_{res} の値が大きくなる場合があり、特に柱脚が保有耐力接合である $B M_u / M_{pc}=1.3$ で多くみられる点に関しては、柱脚でエネルギーを吸収できるために 1 層に損傷が集中するためと考えられる。75kine の超大地震荷重下では、部材種別 FA であっても 1/100 程度の θ_{res} を示す場合があることは、今後残留変形で建物の残存耐震性能を評価する場合に留意しなければならない。

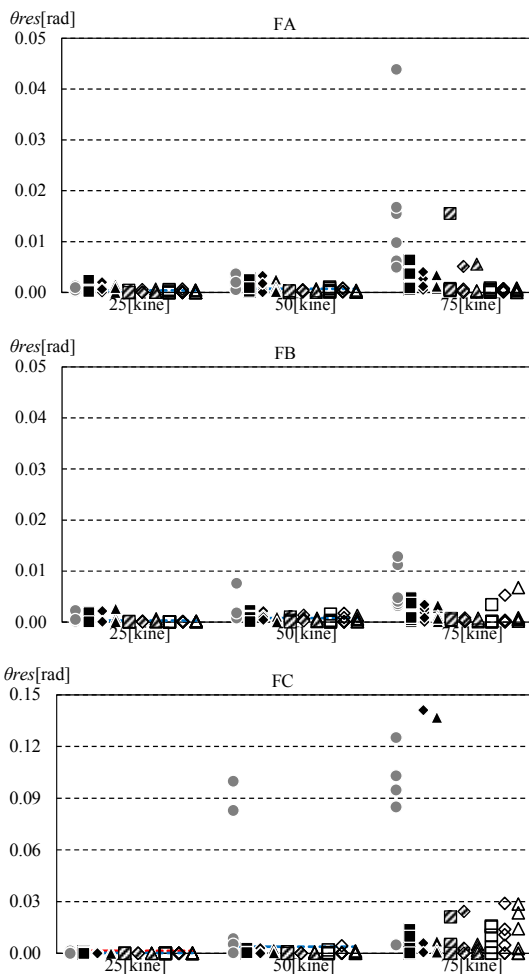


図5 1層の残留変形角分布(3層)

表1 応力発光塗料部材端部の厚み(mm)

NW			NE		
2F	L側	R側	2F	L側	R側
梁端	0.05	0.07	梁端	0.05	0.06
柱端	0.02	0.07	柱端	0.06	0.05

SW			SE		
2F	L側	R側	2F	L側	R側
梁端	0.11	0.10	梁端	0.11	0.09
柱端	0.01	0.06	柱端	0.07	0.08

NW			NE		
1F	L側	R側	1F	L側	R側
梁端	0.05	0.07	梁端	0.08	0.05
柱端	0.06	0.08	柱端	0.06	0.05

SW			SE		
1F	L側	R側	1F	L側	R側
梁端	0.08	0.09	梁端	0.08	0.14
柱端	0.08	0.09	柱端	0.07	0.06

		M_u / M_{pc}			
		1.3	1.1	0.9	0.7
Increment of D_s value	none	●	●	⊗	○
	0.02	▲	▲	△	△
	0.04	◆	◆	◇	◇
	0.05	■	■	□	□

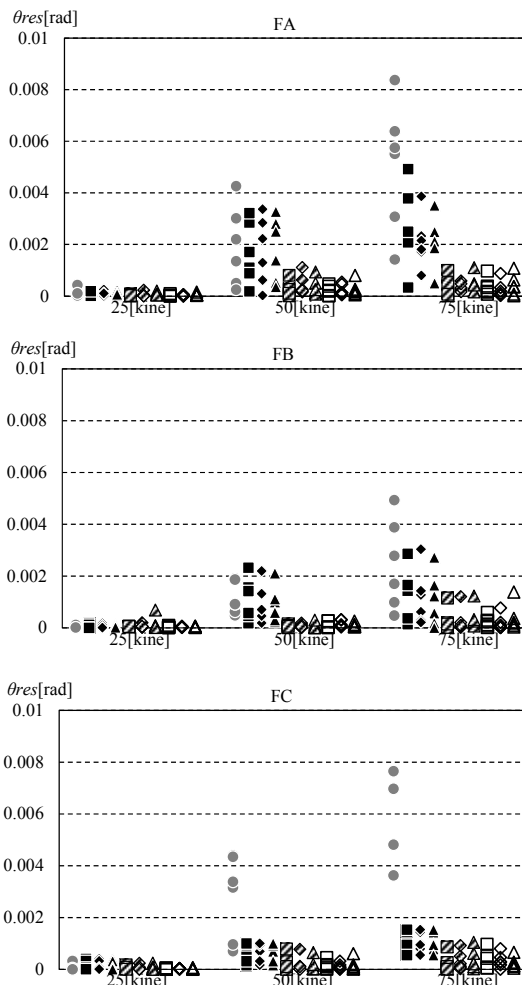


図6 1層の残留変形角分布(6層)

4.2 応力発光塗料の発行状況と変形量

アルミ骨組を手で押して大きく変形させ、発光状況を確認したが、層間変形角が 1/100 程度となっても目視で確認できるほどの発光が確認されなかった。そこで小型骨組の柱材と同一素材のアルミ棒材（板厚 1mm，幅 10mm，長さ 600mm）の中央部 10mm 四方に、応力発光塗料を塗布するとともに裏面に 1 軸歪みゲージを貼付し、素材引張試験を行うことで歪と応力発光状況との対応関係を検討した。応力発光状況は荷重を加えていく過程において、随時輝度計で測定した。応力発光塗料の塗布厚さは 5 点平均で 0.04mm であり、小型骨組試験体の部材端に塗布した塗料の平均厚み（柱：0.06mm，梁：0.08mm）より薄い。図 7 に応力度-歪関係と輝度-歪関係を併せて示す。歪が大きくなるに従い若干輝度の値も上昇しているが、蛍光灯などの照明器具（5000cd/m² 程度）に比して輝度の値自体が非常に小さい。実際、実験中に観察していたが目視でも発光の確認は難しい状況であった。別途、応力発光塗料を塗布した部分を変形させてみると、塗料塗布部分が破損する程度であれば発光が確認できるものの、瞬間的なものであり、発光状況は保持できていなかった。このためゆっくりと応力をかけていく素材引張試験では発光が確認しにくかった原因と考えられる。

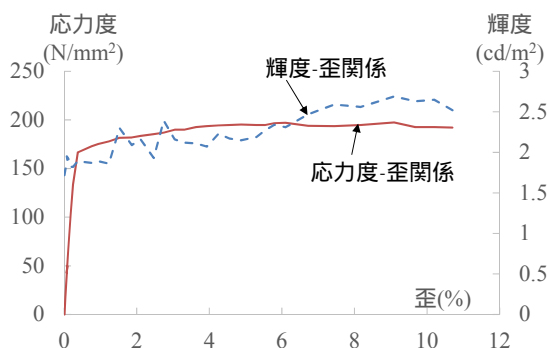


図 7 アルミ棒材の応力度・歪と輝度

また、上記のことから建物の骨組において今回用いた応力発光塗料を塗布して最大変形角や柱の残留変形角を確認するためには、瞬間的な発光を捉える高感度のカメラや輝度計測用の光センサなどを使用する必要があるが、汎用性を考えると安価なセンサやカメラで発光状況を捉えられるようなシステムを構築する必要がある。併せて、応力発光塗料の塗布厚みと発光状況が対応することから、塗布厚みと輝度の定量的評価を更に進めることで応力発光塗料を用いた目視による損傷評価への展開が見込まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

石田孝徳，久保田航平，島田侑子，山田哲：露出型柱脚を有する鉄骨造建物の Ds 値再評価 その 1，その 2，2014 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.641-648，2015.3

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 侑子 (SHIMADA Yuko)
千葉大学大学院・工学研究院創成工学専攻
・准教授
研究者番号：90586554

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

山田 哲 (YAMADA Satoshi)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
石田 孝徳 (ISHIDA Takanori)
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教