

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04768

研究課題名（和文）工程ネットワークの自動生成による地震後の建物修復期間の評価

研究課題名（英文）Evaluation of repair time of building damaged by earthquake using automatic generation of logic network of repair schedule

研究代表者

岡野 創（OKANO, HAJIME）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40416863

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：地震によって損傷した建物の修復期間の評価法の検討を行った。修復期間の評価では、地震による建物の応答と、応答に伴って発生する損傷の予測のばらつきを考慮する必要がある。これらの変動要因を考慮するためには、応答と損傷発生の変動を考慮したモンテカルロシミュレーション（以下、MCS）で修復期間を評価する必要がある。MCSの試行の中で修復期間を評価するために、本研究では、修復工程の論理ネットワークの生成を自動化し、投入作業員数の制約の下で作業員配置を最適化して最短工期を算出した。開発した手法は、仮想および実在の被災建物に適用し、稼働することを確認するとともに、妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物の耐震性能評価では、地震動に対する損傷度で性能が示されてきた。しかし、損傷度で提示されても、施主にはその影響が把握できないという問題があり、現在では損傷を損失として評価する研究が行われている。この種の研究で先行しているのは、米国のFEMA P-58である。P-58では損失指標として、修復費と修復期間を掲げている。このうち、修復費については具体的な評価法が提示されているが、修復期間の評価法は未提案となっていた。これは、修復期間の評価では工程を考慮する必要がある、数理的な取扱いが難しかったためと考えられる。本研究ではこの問題を修復工程の論理ネットワークを自動生成することにより解決した。

研究成果の概要（英文）：A method for evaluating the repair time of buildings damaged by earthquakes was studied. In the evaluation of the repair time, it is necessary to take into account the variation in the response of the building due to the earthquake and the variation in the prediction of damage that occurs as a result of the response. In order to account for these variables, it is necessary to evaluate the repair time in a Monte Carlo simulation (MCS) that accounts for the variability of response and damage occurrence. The minimum time required was calculated by optimizing the allocation of workers under the constraint of the number of workers to be deployed. The developed method was applied to both virtual and existing damaged buildings, and it is confirmed that the proposed method actually works and the evaluated result is valid.

研究分野：耐震工学

キーワード：地震被害 性能設計 修復期間 修復工程 論理ネットワーク モンテカルロシミュレーション PERT/CPM

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1990年代に米国において研究され、2000年前後に日本にも導入された耐震性能設計法は、地震動に対する損傷度を性能指標とするものであった。しかし、損傷度は構造的な観点と歴史的な経緯により構造種別毎に定められたものであって、専門的な知識を持たない施主には損傷度の持つ意味とその影響度は把握し難いものであった。設計者そのものも、損傷が与える影響を定量的に把握できていたとは言い難い。このような観点から、現在では損傷による損失の評価を指向する研究が行われている。

この種の研究で先行しているのは、米国の FEMA P-58 であるが、FEMA P-58 では損失指標として、修復費と修復期間を提示している。このうち、修復費については具体的な評価手法が提示され、評価に必要なデータベースも整備されているが、修復期間については具体的な評価手法が提示されていない。これは、建物の修復費は、概ね部材修復費の総和として評価できるのに対して、建物の修復期間の評価では、修復工程を考慮する必要があり数理的な取扱いが困難だったためと考えられる。

2. 研究の目的

前節で述べたように、地震被害による損失としては修復費と修復期間が考えられるが、米国の先行研究では修復費の評価法は具体的に整備されているのに対し、修復期間の評価法が未提案のままとなっている。しかしながら、経済的な損失として捉えた場合、修復期間は修復費より影響が大きい場合もあると考えられることから、修復期間の評価法の研究は重要と考えられる。そこで、本研究では修復期間の評価法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

地震応答解析に基づいて修復期間を評価する場合、地震応答の不確定性と、応答に対する損傷発生の不確定性が問題となる。これは修復費の評価でも同様であって、この問題を克服するために FEMA P-58 ではモンテカルロシミュレーション(以下、MCS)を用いることを提案している。具体的な手順は以下の通りである。まず、地震動強さ(i.e.応答スペクトル)が同等な複数地震動に対して地震応答解析を行う。地震応答解析のサンプル数が MCS に必要な試行数より少ない場合は、応答値の中央値と共分散に適合する応答値を必要とする試行数だけ生成する。各試行毎に置いて、応答値に対する損傷を部材フラジリティと乱数を用いて損傷を決定する。各部材の損傷に対する修復費を(必要ならば確率的変動を考慮して)決定し、その総和として建物の修復費を求めるとする。

修復期間の評価では、部材修復費を評価してその総和を求める部分が修復期間の評価に置き換わるが、基本的な枠組みは同様であり、MCS の試行の中で修復期間を評価する必要がある。修復工期は、工程を論理ネットワークとして表現すれば、PERT/CPM により最短工期を求めることができるが、PERT では工程論理ネットワークが作成されていることが前提となっている。また、CPM(Critical Path Method)で最短工期を算出する際には、ノードで結ばれる各アクティビティの所要日数が所与であることが前提となっている。MCS の試行の中に組み込むためには、修復工程の論理ネットワークを自動生成する方法を確立する必要がある。また、工種毎の投入作業員数を設定することはできるが、作業の重複を考慮すると任意の時刻に実行されるアクティビティの所要日数(i.e.投入可能な作業員数)を予め決定することはできないので、簡単に最短工期を決定することはできない。

以上より、まず、単位部材の修復工程が所与という条件の下で、フロアの修復工程の論理ネットワークを自動生成する手法を検討する。次に、工種毎の投入作業員数が所与という条件の下で、アクティビティ間の重複実行を考慮しながら、各アクティビティへの作業員割付数を最適化して最短工期を決定する手法を検討する。

以上の基礎記述が確立したら、MCS の試行の中に修復期間評価を組み込んで、地震応答解析評価に基づく修復期間の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 工程論理ネットワークの自動生成

MCS の中で修復期間の評価を行うためには、修復工事の工程論理ネットワークが自動生成できるかどうか鍵となる。そこで、まず、部材の修復工程を所与としてフロアの修復工程の論理ネットワークを自動生成する手法の検討を行った。

工程は既知の場合、工程はあるアクティビティの先行アクティビティ(直前に実行するアクティビティ)のリストとして書くことができる。論理ネットワークでは、アクティビティはソースノード(出発する節点)番号とターゲットノード(向かう節点)番号によって規定される。したがって、論理ネットワークの生成はアクティビティのアクティビティはソースノード番号とターゲットノード番号を決定することと同義である。本研究では、途中まで出来上がっている論理ネットワークに新しいアクティビティを追加する場合、追加するアクティビティの先行アクテ

イビティが既知であれば、図 1 に示すように 5 つに場合分けすることにより、一意にノード番号が決定できることを示した。図 2 に、Case2~Case4 の検証結果を示す。なお、Case1 と Case5 は全ての例題に含まれている。

フロア内の作業は、2 次部材の撤去・養生やコンクリート打設など同期して実施することが必要になる場合があるが、作業の同期は先行アクティビティをあらかじめ操作しておくことで実現することができる。

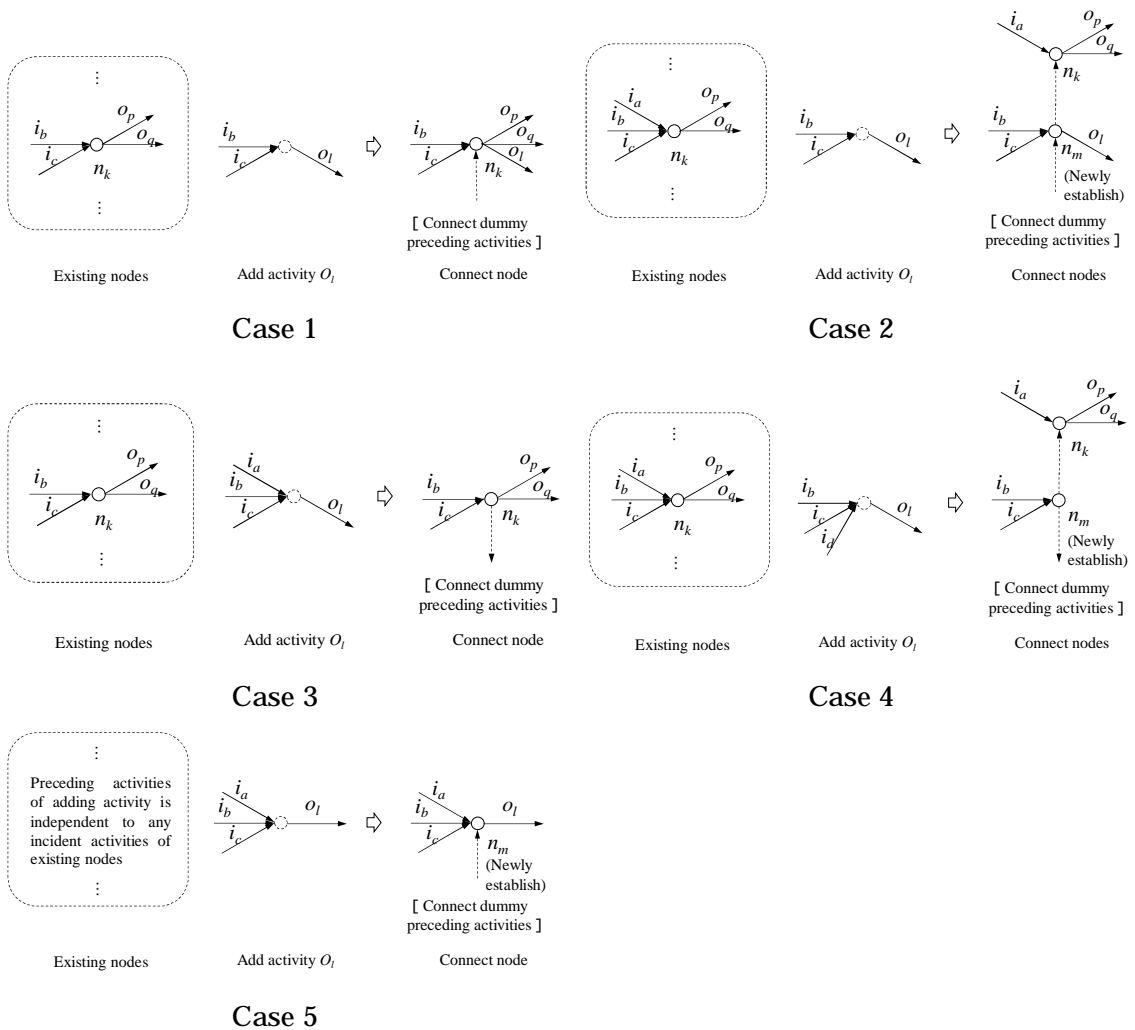
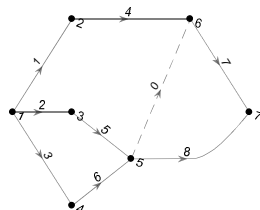
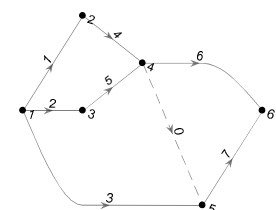


図 1 ノード番号決定の場合分け

Activity	Preceding activities		
1	0		
2	0		
3	0		
4	1		
5	2		
6	3		
7	4	5	6
8	5	6	



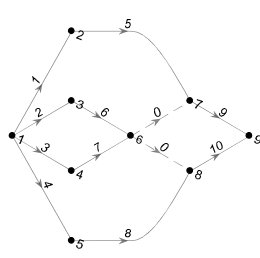
Activity	Preceding activities		
1	0		
2	0		
3	0		
4	1		
5	2		
6	4	5	
7	4	5	3



Case2 : (アクティビティ 8 の追加)

Case3 (アクティビティ 7 の追加)

Activity	Preceding activities		
1	0		
2	0		
3	0		
4	0		
5	1		
6	2		
7	3		
8	4		
9	5	6	7
10	6	7	8



Case4 (アクティビティ 10 の追加)

図 2 工程論理ネットワークの自動生成の検証

(2) 工種別投入作業員数の制約の下での作業員割付の最適化による最短工期の決定

PERT/CPM では、各アクティビティの所要日数が既知であれば最短工期を求めることができる。しかし、全体として投入可能な作業員数だけが既知の場合は、アクティビティに割付可能な作業員数は、同時に実行されるアクティビティによって依存して変動することから、一意に決定できない。すなわちアクティビティの所要日数は一意に決定できない。工種毎の投入作業員数が所与という条件の下で、作業員割付を最適化して最短工期を求める手法を検討した。

基本的な考え方は、クリティカルパス上のアクティビティに対して、同時実行されているアクティビティから作業員数(具体的には作業員占有率)をエクスポートすることで最適化を行っている。しかし、作業員占有率をエクスポートすることで、クリティカルパスが変化する場合があり、その場合は最適化の操作が無意味になるという問題がある。そこで、クリティカルパスの変動を許容しながら最適解の候補を選定し、次に各候補に対してクリティカルパスが変化しない限りでエクスポートによる最適化を行うという手法を用いた。

(3) モンテカルロシミュレーションによる応答・損傷・修復期間の一貫評価

(1)(2)の基礎技術を、モンテカルロシミュレーション(MCS)による応答・損傷評価と組み合わせ、修復期間の評価法を構築し、12階建てS造建物を対象として検証を行った。建物には、告示波の2倍相当の強さの地震動を水平2方向同時入力した。

図3に試行毎の各階の修復終了日2を、図4に修復期間のヒストグラムを示す。MCSの試行数は100である。修復期間には大きな変動が認められ、修復期間のヒストグラムは2つの山に分かれているように見える。そこで、修復期間が短い試行と長い試行を取り出してみる。

図5は修復期間が短い試行32の、図6は修復期間が長い試行23の結果である。各図で、左側に横軸を経過日とした各階の修復工程を、右側に工種別の作業員の移動の様子を示してある。両者を比較すると、試行32では鉄骨工が表れないのに対して、試行23では鉄骨工が2階から6階の修復で鉄骨工が使われているという違いがあることが分かる。これは、試行32では鉄骨が損傷していないのに対し、試行23では鉄骨が損傷していることを示している。以上より、鉄骨の損傷の有無が修復期間に大きな影響を与え、修復期間のヒストグラムに2つの山に分かれたと考えられる。

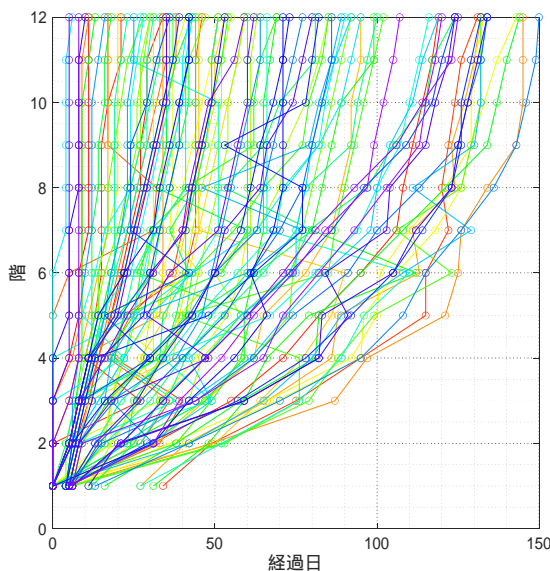


図3 試行毎の各階修復終了日

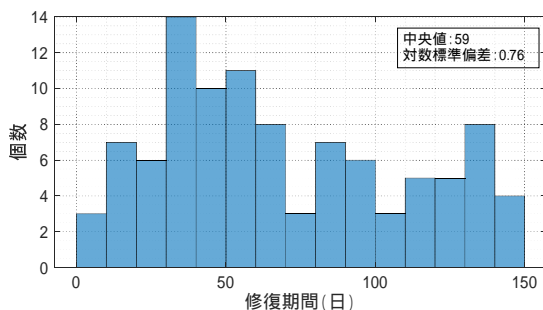
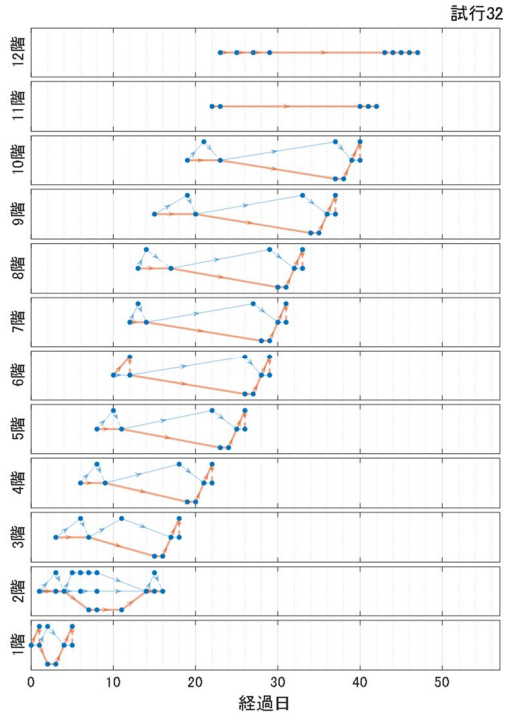
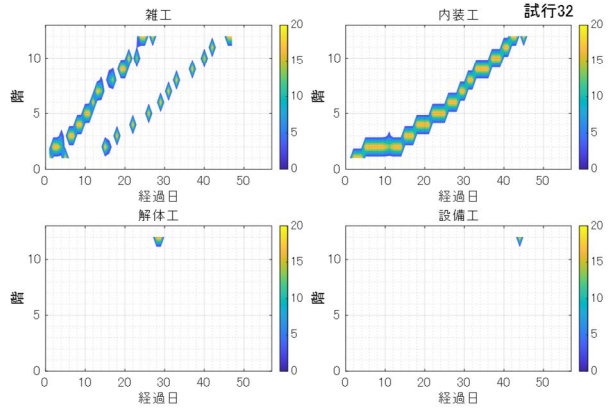


図4 修復期間のヒストグラム

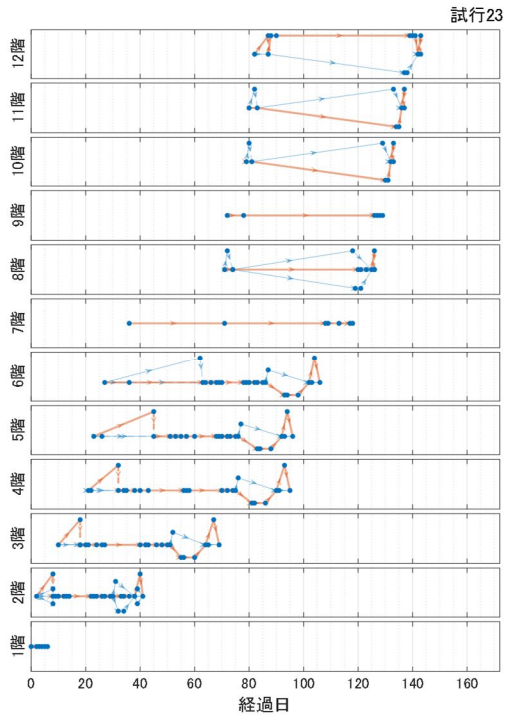


(a) 論理ネットワーク

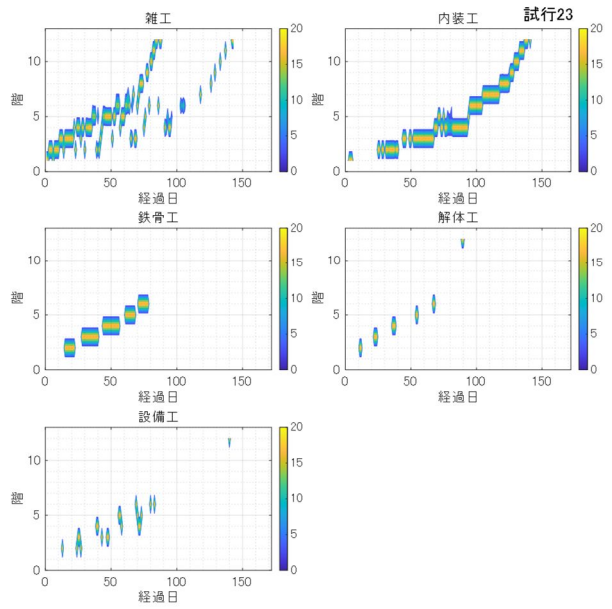


(b) 工事の進行と作業員の移動

図 5 試行 32 の修復工程の作業員割付の推移



(a) 論理ネットワーク



(b) 工事の進行と作業員の移動

図 6 試行 23 の修復工程の作業員割付の推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 OKANO Hajime、NAGAYA Kazushi、NAKAMURA Masato、HASEGAWA Kan、KUSAKA Akihiro	4. 巻 85
2. 論文標題 EVALUATION OF REPAIR TIME BY AUTOMATIC GENERATION OF LOGIC NETWORK OF REPAIR SCHEDULE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1233 ~ 1243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.1233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡野 創
2. 発表標題 地震応答解析による損傷評価と統合した工程論理ネットワークによる修復期間評価 (その1) 手法概要と地震応答・損傷評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長屋 和志
2. 発表標題 地震応答解析による損傷評価と統合した工程論理ネットワークによる修復期間評価 (その2) 修復期間の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長屋 和志、岡野 創、中村 正人、長谷川 幹、日下 彰宏
2. 発表標題 論理ネットワーク手法を用いた多層建物の修復期間に関する研究 (その1) 論理ネットワークの自動生成とアクティビティの同期
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡野 創, 長屋 和志, 中村 正人, 長谷川 幹, 日下 彰宏
2. 発表標題 論理ネットワーク手法を用いた多層建物の修復期間に関する研究 (その2) 最短工期の算出方法と計算例
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関