

個別要素法を用いた木造家屋の破壊解析

Rupture process simulation for frame houses using Discrete Element Method.

○山田雅行¹, 白井義朗², 香川敏幸³
Masayuki YAMADA¹, Yoshiro SHIRAI² and Toshiyuki KAGAWA³

¹株式会社NEWJEC

NEWJEC Inc.

²株式会社エヌ・イー・エス

NES Inc.

³香川調査事務所

Kagawa Survey Office.

Abstract: Rupture process is simulated for frame houses simply modeled using Discrete Element Method, to aim at prediction of seismic disaster in the wide area. Simulated rupture process and its consequence for a frame house correspond to actual phenomenon. Simulated rupture process for 100 frame houses illustrate that input ground motions greatly influence on the distribution of collapsed houses and isolated paths for evacuation, otherwise input parameters for seismic response characteristics, such as mass, stiffness and strength, are varied by random numbers.

Key Words : Rupture process, Frame house, Input ground motion, Discrete Element Method, Isolated path

1. はじめに

自治体などの被害想定¹を行う場合、入力となる地震動に関しては、統計的グリーン関数法やハイブリッド法などの震源・伝播・サイト特性を考慮できる手法を用いて、500m×500m程度のエリアに対して時刻歴波形が予測される事例が多くなってきた。しかし、家屋の倒壊や人的被害などの「被害」の算定には、最大加速度などの地震動強度と被害率の関係式が今日でも用いられている。

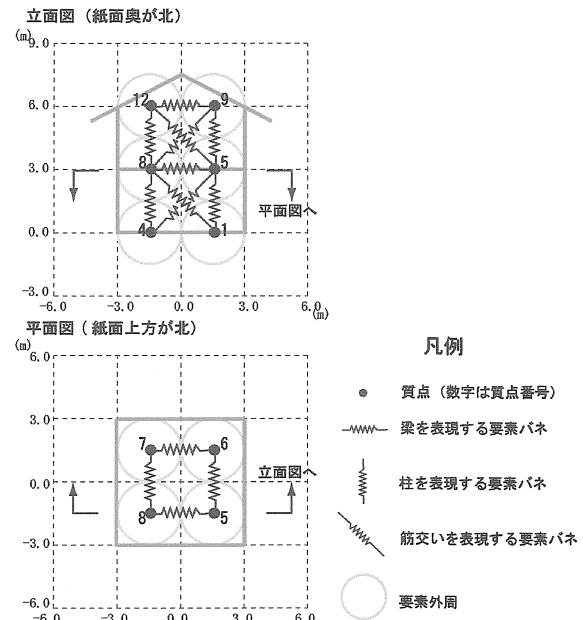
個々の建物について、詳細にモデル化し、世界有数の計算機を用いて、被害が算定される例も見られるようになってきた²。しかしながら、このようなシミュレーションは、広域の計算のために莫大な計算を行わなければならないだけではなく、有限要素法を用いる場合には破壊後の状況を直感的に把握することが難しい。

そこで、広域の被害予測を念頭に、木造家屋を簡便なモデルで表現することにより計算量を低減し、破壊後の状況把握に着目するために個別要素法(DEM)³を用いて木造家屋の破壊解析を試みた。

2. 解析手法

代表例として、比較的普及率の高い二階建て木造家屋の要素配置図を図-1に示す。モデル化にあたっては、6m×6mの正方形で、建築面積36m²の家屋を想定した。

DEMでは、物体は質点と、質点どうしを結ぶ要素バネでモデル化される。各々の質点に力を加えると、要素バネはあらかじめ設定したバネ定数に応じて変形する。さらに大きな力を加えて、引張・圧縮・せん断のいずれかで、強度限界値を超えると要素バネは破断する。表-1に各要素バネの剛性、強度限界値などの物性値一覧を示す。なお、要素バネの剛性は、二階建て木造家屋の一般的な固有周期0.25秒となるように設定している。また、各質点の質量は1tonとした。したがって、この二階建て木造家屋モデルの総重量は12tonとなる。



3. 地震応答計算

この二階建て木造家屋モデルに地震動を入力し、応答計算を実施する。入力地震動は平成7年兵庫県南部地震のJMA神戸で観測されたものである。最大加速度値は南北成分が812.020gal、東西成分が765.884galであった。

図-2に2階の代表要素の応答変位値を示す。この代表要素では、揺れ始めから10秒前後で要素バネの破断が発生し、急激に変位が大きくなり始めている。この要素は最終的に元有った位置より北約4m、西約4mの位置に落下している。

表-1 採用した各バネの物性値(二階建て木造家屋)

部材	要素番号	ばね定数 (kN/m)		粘性定数 (kN/m·s)		限界力 (kN)		
		軸方向	せん断	軸方向	せん断	圧縮	引張	せん断
2階	柱	5 - 9	9900	710	9.94	2.66	133	276
		6 - 10						22
		7 - 12						
		8 - 12						
		9 - 10						
	梁	10 - 11	19800	1410	14.06	3.76	267	551
		11 - 12						44
		12 - 13						
		13 - 14						
	筋交い	14 - 15						
1階	柱	5 - 8	3500	250	5.91	1.58	33	138
		6 - 11						11
		7 - 12						
		8 - 12						
		9 - 12						
		10 - 11						
	梁	11 - 12						
		12 - 13						
		13 - 14						
	筋交い	14 - 15						

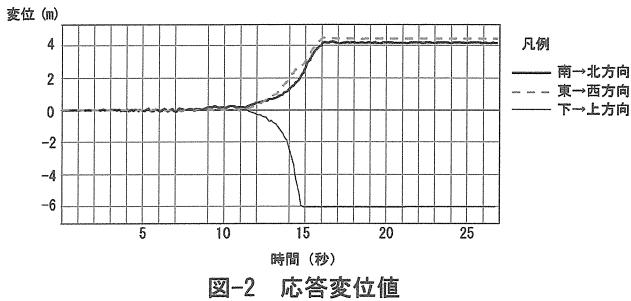


図-2 応答変位値

表-2に破壊した要素バネの破壊形式と時刻を示す。表-2によると、揺れ始めから5.1秒までに一階、二階の南北を長手方向する筋交いが圧縮力により全て破壊されている。実際には、この時点で東面、西面の壁も相当な損傷を負っていると推察される。一方、東西方向の筋交いは、その間一つも失われておらず、5.4秒で初めて一つ破壊する。その後、揺れ始めから7.3秒で同一角の一階と二階の柱が立て続けにせん断破壊する。いわゆる通し柱が折れた状態である。通し柱を一本失ったことで建物全体の傾斜が大きくなる。図-2で二階要素の10秒付近の変位は南北方向が特に大きく約0.2mである。一層高さが3mであるから、これは層間変位角にして約1/15ラジアンにあたる。その後、揺れ初めから14.7秒で梁が折れ始め、家屋は倒壊に至る。

図-3に、家屋が倒壊した後、最終定常状態での各要素の平面的な位置関係を示す。2階の要素ほど、元々高い位置に有ったため遠くに落下する傾向がある。最も大きく移動しているのは要素9番であり、実際に元の位置より9.2m北西方向に移動していることがわかる。これらの要素が落下した位置が隣接する家屋であった場合、衝突荷重となって、隣家を破壊する要因となり得る。いわゆる、隣接家屋の倒れ込みによる被害である。また、落下位置が道路上であった場合は、道路上に散乱する瓦礫となり、交通を阻害する原因となる。

4. 複数家屋の破壊解析

次に複数家屋をDEMでモデル化し、破壊解析を試みる。家屋は南北10行、東西10列の計100棟で、基盤の目状に配置した。家屋の建築面積は、これまで同様 $6m \times 6m = 36m^2$ とした。また敷地面積は $8m \times 8m$ とし、家屋は敷地の中央部に建てられているものとした。各家屋の敷地は、接しているか、大小の道路で区切られている。南北二行と三行の間に配置したような、狭いほうの道路の幅員は4mである。一方、東西2列3列の間を隔てる広

表-2 部材破壊状況

破壊形式	要素番号	部材	時間(秒)	作用力	限界力
圧縮	2 - 5	1階筋交	4.6	50.05	50.00
圧縮	6 - 9	2階筋交	4.6	33.01	33.00
圧縮	7 - 12	2階筋交	4.6	33.02	33.00
圧縮	3 - 8	1階筋交	4.6	50.05	50.00
圧縮	5 - 10	2階筋交	4.7	33.04	33.00
圧縮	8 - 11	2階筋交	4.7	33.01	33.00
圧縮	1 - 6	1階筋交	4.8	50.01	50.00
圧縮	4 - 7	1階筋交	5.1	50.02	50.00
圧縮	2 - 7	1階筋交	5.4	50.03	50.00
せん断	4 - 8	1階柱	7.3	33.01	33.00
せん断	8 - 12	2階柱	7.3	22.00	22.00
せん断	4 - 5	1階筋交	7.3	17.00	17.00
せん断	7 - 10	2階筋交	7.4	11.00	11.00
圧縮	3 - 6	1階筋交	8.0	50.00	50.00
圧縮	6 - 11	2階筋交	8.2	33.02	33.00
せん断	5 - 9	2階柱	8.7	-22.00	22.00
せん断	5 - 12	2階筋交	8.9	11.00	11.00
せん断	8 - 9	2階筋交	8.9	11.01	11.00
せん断	1 - 5	1階柱	8.9	33.00	33.00
せん断	3 - 7	1階柱	11.5	33.00	33.00
せん断	7 - 11	2階柱	14.7	-22.13	22.00
せん断	6 - 10	2階柱	14.7	-22.12	22.00
せん断	6 - 7	1階梁	14.7	66.00	66.00
せん断	1 - 8	1階筋交	14.7	17.01	17.00
せん断	11 - 12	2階梁	14.8	-44.13	44.00
圧縮	10 - 11	2階梁	14.9	267.73	267.00
せん断	2 - 6	1階柱	16.2	33.09	33.00
せん断	5 - 6	1階梁	16.3	-66.03	66.00
せん断	5 - 8	1階梁	16.3	-66.01	66.00

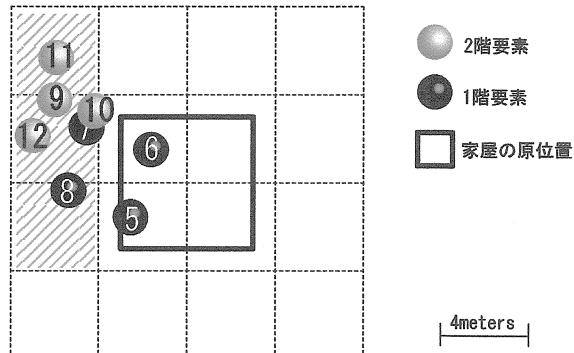


図-3 倒壊後の要素位置平面図

い道路の幅員は8mである。

100棟の家屋は平屋建て、二階建て、三階建ての木造家屋より構成されている。階数の違いは倒壊した際に瓦礫を撒き散らす範囲にも差異を生じさせるが、質量および剛性の違いにより家屋の固有周期にも影響する。なお、剛性は、平屋建て家屋の固有周期は0.14秒、三階建て家屋の固有周期は0.38秒に設定した。それぞれの配置は無作為としたが、その棟数は平屋建てと三階建てが25棟で、二階建ては50棟とした。

家屋単体の破壊解析の場合、各要素に働く水平力は地震荷重だけであるが、複数家屋の場合は隣接家屋からの衝突荷重も考慮することとなる。また、木造家屋は一部の新興住宅を除いて、設計法、材質、経年劣化、手入れの頻度など様々な多様性を内在している。この多様性のため家屋としての剛性や強度は不均一なものとなる。そこで、表-1に示した物性値を平均値とし、その1割を標準偏差とする正規乱数を発生させ、各家屋の剛性・強度および各階の質量にバラツキを持たせた。

図-4および図-5に、剛性・強度に多様性をもたせた100棟の破壊解析結果を示す。図-4、図-5とともに被害率

で整理したが、ここで言う被害率は全ての部材要素に対する破壊した部材要素の割合で定義している。入力地震動は、図-4 については家屋単体の破壊解析同様、平成 7 年兵庫県南部地震の JMA 神戸のものである。一方、図-5 は同じく兵庫県南部地震の JR 鷹取で観測された地震動を使用している。JR 鷹取の地震波は最大加速度値が南北成分 686.831gal、東西成分 672.639gal と JMA 神戸のものに比べて、やや小さいが、厚い堆積層の上で観測されたため振動周期が長いことも特徴的である。

乱数により質量・剛性・強度に多様性を与えていたため、多少結果にはばらつきはあるが、図-4 の JMA 神戸の破壊解析結果では、平屋建てや二階建て家屋のほとんどが 50% を超える被害率となっている。にもかかわらず、高さ 9m と固有周期が長い三階建て家屋では比較的軽い被害となっていることが見て取れる。一方、図-5 の JR 鷹取を入力地震動とした場合では、特に二階建て家屋の被害が軽微であるのに対して、ほとんどの三階建て家屋は重篤な被害となっている。これは先に述べた地震動の振動周期と、家屋の固有周期の関係が的確に反映されている結果と考えることができる。

この傾向は試行数が 10 回(両図とも上側)よりも試行数を 100 回(下側)とした場合に、より顕著となる。例えば図-4(上)で二行 10 列の平屋建て家屋の被害率は 20% 以下となっているが、試行数を 100 回にすれば全ての平屋建て家屋の被害率は 40% を超えるものとなり、かつ、そのほとんどは 50% を超える被害率となっている。同様に図-5(上)でも一行 7 列、一行 9 列、二行 1 列、四行 1 列、七行 3 列の二階建て家屋の被害率は 20% を超えているが、試行数を 100 回とすると、全ての二階建て家屋の被害率は 20% 以下となっている。また、図-5 の JR 鷹取を入力地震動とした場合で、平屋建ての多くが軽微な被害となっている中、周囲に三階建て家屋が多い四行 8 列と五行 7 列の平屋建ての被害率は、特に高い値となっている。これは、周囲で倒壊した三階建て家屋から落下してくる部材によって、衝突が生じて破損する回数が多かったためと考えられる。

図-6、図-7 に各階数ごとに被害ランク別棟数を示した(それぞれ入力地震動は JMA 神戸、JR 鷹取)。上述の通り、入力地震動が JMA 神戸の場合は、平屋、二階建ての被害が著しく、三階建てはやや軽微であり、JR 鷹取の場合は、平屋建てや特に二階建ての被害が軽いのに対して、三階建ての被害が重篤なものとなっている。

被害が重篤な、JMA 神戸の平屋建て、二階建てと、JR 鷹取の三階建てに着目すると、試行数を増すにつれて、ほとんどあるいは全ての家屋の被害率が 50% 以上のランクに収束する傾向が見られる。JMA 神戸の三階建て、JR 鷹取の平屋建て、二階建てに関しても、各ランク別の棟数は試行数を増すにつれて、ある一定の比率に近づく傾向を示している。これより、100 回程度の試行数を重ねれば、その被害の様相は概ね収束する傾向を示すことがわかる。

5. 道路閉塞状況

道路閉塞の大きな要因となる、道路上への瓦礫の散乱状況について検討を行った。ここでは、閉塞危険度 β を路面に落下した要素が占める面積の割合で定義している。すなわち、家屋が倒壊して図-3 のような要素配置となったとき、ハッチングを施した区画で閉塞の危険度が高くなる。図-8 に算出された道路閉塞危険度を示す。入力地

震動は JMA 神戸、家屋の配置は複数家屋の破壊解析と同じである(上: 試行数 10、下: 試行数 100)。

入力地震動を JMA 神戸のものを使用した図-4 で被害が重篤と予測された、平屋建ておよび二階建て家屋の周辺は高い閉塞危険度を示していることが認められる。特に、家屋倒壊後に要素が遠くまで移動する二階建て家屋では、このことが顕著に現れている。ただし、試行数 10 回では三行 7 列の二階建て家屋の北側、あるいは三行 5 列や五行 7 列の西側の道路のように、二階建て家屋が集中しているにも関わらず比較的低い危険度であったものが、試行数を 100 回に増やすと閉塞危険度が高くなっている。このように道路閉塞に関しても試行数を増すにつれて、被害の様相が一定値に収束する傾向は強くなっている。

6. おわりに

広域の被害予測を念頭に、木造家屋を簡便なモデルで表現することにより計算量を低減し、破壊後の状況把握に着目するために個別要素法(DEM)を用いて木造家屋の破壊解析を試みた。

①二階建て木造家屋モデルに、平成 7 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の地震動を入力し、応答計算を実施した結果、家屋の倒壊過程や最終的な要素位置など、実現象によく対応したが挙動を再現できた。

②100 棟の木造家屋の破壊解析を行った結果、乱数により質量・剛性・強度に多様性を与えたにもかかわらず、入力地震動の違いによって、明らかに異なる被害状況が生じ、かつ、100 回程度の試行数を重ねれば、その被害の様相は概ね収束する傾向を示すことがわかった。

③100 棟の木造家屋の破壊解析結果を用いて、道路閉塞の主要因となる道路上への瓦礫の散乱状況について検討を行った結果、被害状況と同様に入力地震動の違いによって、明らかに異なる閉塞危険度が表現できることがわかった。

個々の家屋について、物性値の合理的な評価方法の検討や解析結果の実現象(実被害)との対応付けによる検証を進めることによって、地域の被害予測が可能であることが示唆されたものと考えられる。

最後に、DEM や木造家屋破壊解析に関して、埼玉大学 谷山尚准教授、新潟大学 中村友紀子講師にご指導をいただいた。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 大阪府(2007) : 大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)。
- 2) 市村強、伊丹洋人、佐茂隆洋、堀宗朗、山口直也、デジタルシティ神戸の構築とその震災シミュレーションへの応用に関する基礎検討、構造工学論文集 JSCE, Vol.51A, pp.513-520, 2005.
- 3) 伯野元彦(1997) : 破壊のシミュレーション、森北出版。

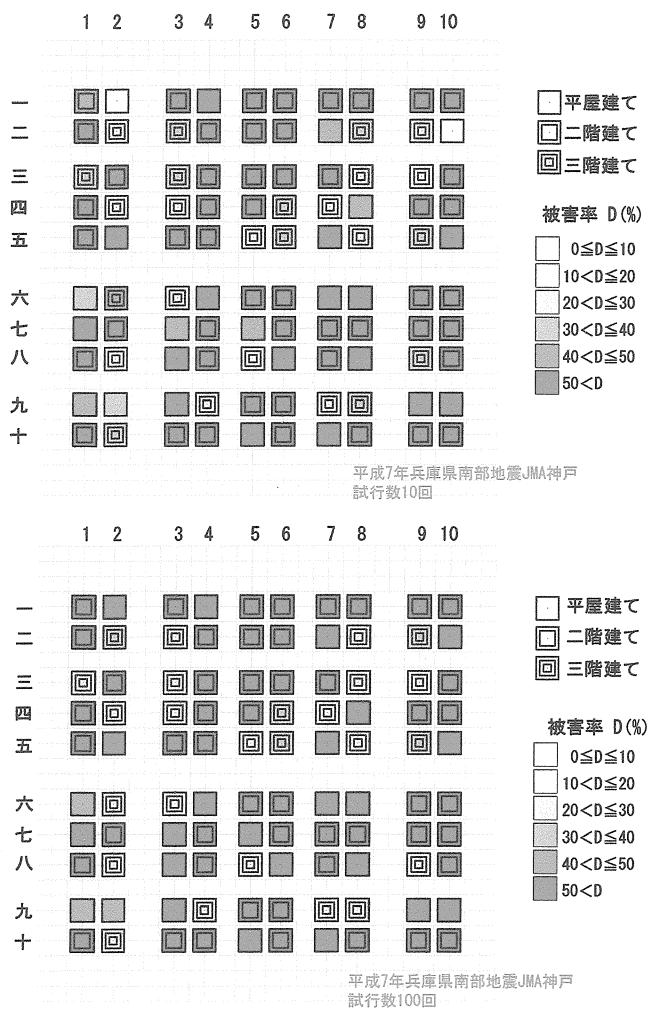


図-4 100棟の破壊解析結果 (JMA 神戸)

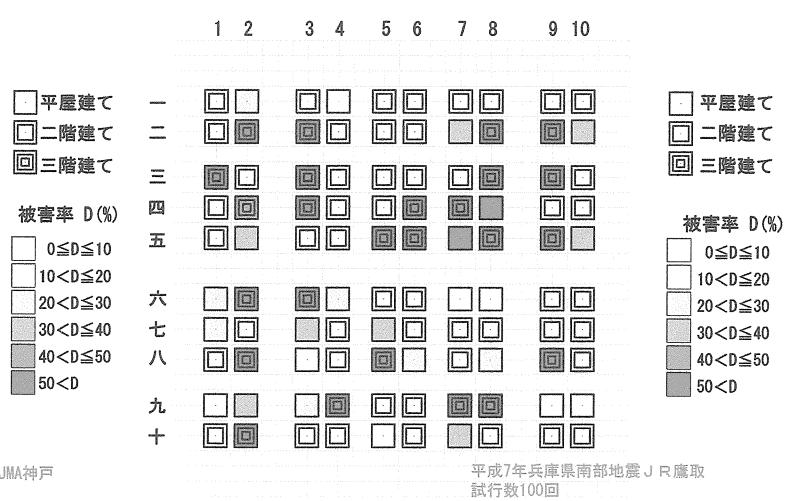


図-5 100棟の破壊解析結果 (JR 鷹取)

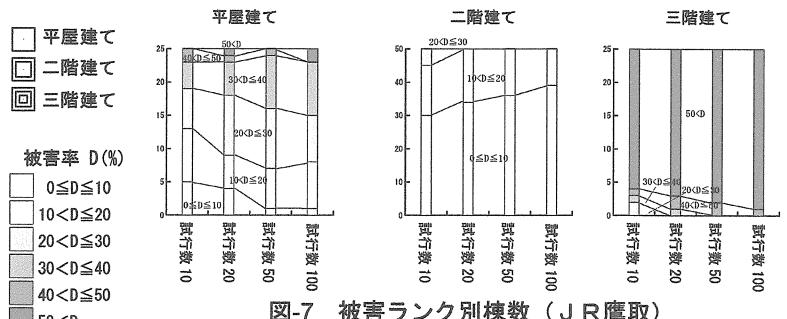


図-7 被害ランク別棟数 (JR 鷹取)

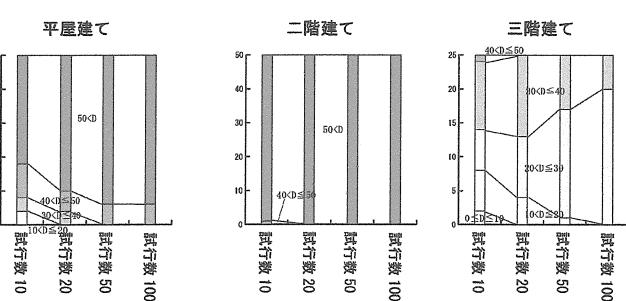


図-6 被害ランク別棟数 (JMA 神戸)

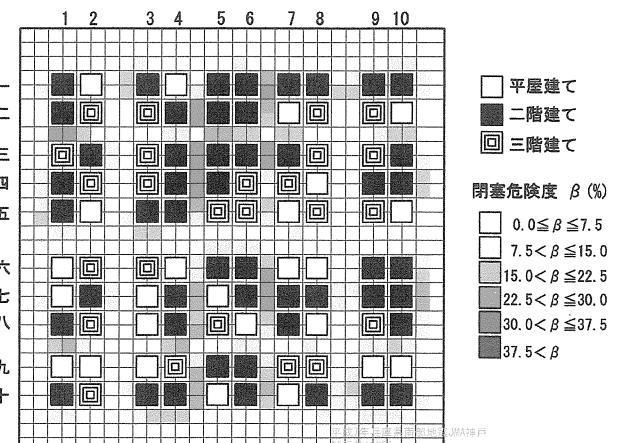
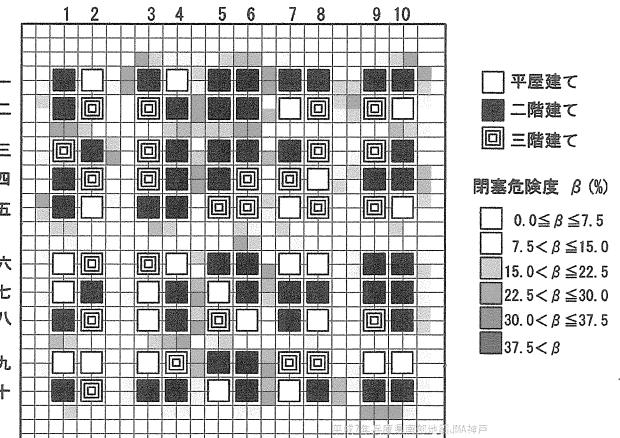


図-8 道路閉塞危険度(上：試行数 10, 下：試行数 100)