

# PIVを用いた脆性物体の衝撃破壊に関する基礎的研究

Fundamental Studies on shock-failure behaviors of brittle bodies by using the PIV analysis

主任研究員名:玉野 富雄

分担研究者名:金岡 正信

## 1. 本研究成果の査読付き論文への公表

- ① T.Tamano, M.Kanaoka, K.Takehara, N.Mizutani: Crack Propagation Velocity of Granite by Impact Splitting Tests, Proceedings of the 17th International Conference on SMGE, ISSMGE, pp.356-359, 2009.10
- ② 金岡正信, 玉野富雄, 竹原幸生, 水谷夏樹, 松本修司, 森川勝史: 衝撃载荷時における基礎支持力に関する模型実験, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, 材料学会, pp.357-365, 2010.11
- ③ T.Tamano, M.Kanaoka, H.Ishikawa, H. Tsuboi, K. Morikawa: Brittle failure in impact tension tests using steel wires, Proceedings of the 23th International Offshore and Polar Engineering Conference, PaperNo.TPC-0142, 2012.6

## 2. 共同研究組織全体の研究成果の最終総括

都市防災の点から、直下型大地震時での構造物や岩盤基礎の衝撃破壊に関する研究は、看過できない緊急研究課題といえる。特に、兵庫県南部地震では、ピアのX状せん断破壊や鋼・铸铁製円柱の圧壊・座屈・脆性破断が確認された。また、平成15年の新潟県中越地震では、従来比較的安全とされてきたトンネル構造物でも衝撃破壊が生じたことは記憶に新しい。こうした観点から、本研究では、構造物や岩盤基礎の衝撃破壊時の力学挙動の解明を目指し、“PIVを用いた脆性物体の衝撃破壊に関する基礎的研究”を行った。

物体の衝撃破壊挙動を力学的に把握する計測方法として、従来、光弾性実験方法などが行われてきた。しかしながら、こうした計測方法では、超高速でのクラック伝播現象やその時のひずみ状態を面域として詳細に把握するには、実験・計測・解析上で限界があるといえる。

本研究では、近年、研究の進展が著しい超高速ビデオカメラを用いた画像解析による可視化手法、相関法により求めた変位ベクトルの変化より面的にひずみ解析を行うPIV(Particle Image Velocimetryの略)解析法を用い以下の研究展開を行った。

### 3.1 脆性物体の衝撃破壊挙動に関する実験的研究

#### (1)「花崗岩におけるクラック伝播速度に関する衝撃実験」に関する研究(論文番号①)

地震動を生じさせる断層面におけるクラックの伝播速度は、2.5 km/sec程度であると言われている。

この伝播速度については、地震動の発生メカニズムをより明らかなものとするための詳細な研究が求められる。しかしながら、岩盤のような脆性体中に生じるクラック伝播は、超高速で生じるものであり、実験的に確かめた研究事例は見当たらない。

研究分担者らは、毎秒 100 万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを使用し、種々の物理現象および力学現象を可視化することで、それらの現象を明らかにする研究を進めている。また、高精度での衝撃実験が可能な衝撃実験機を研究製作し、花崗岩における圧縮载荷時および引張载荷時の材料物性が静的破壊時と衝撃破壊時で大きく異なること、さらに、衝撃破壊時においても実験時の力積によって破壊形態が大きく異なることを示してきている。

本研究では、この研究を発展させ、花崗岩の円筒形供試体（以下、円筒形供試体を単に供試体と呼ぶ）を横にして衝撃载荷する衝撃割裂実験法（図-1 参照）を研究開発した。実験時の計測には、世界最速の毎秒 100 万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを用い、得られた画像解析結果を PIV 解析し、クラック伝播形態およびクラック伝播速度の力学現象（図-2 参照）を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 衝撃割裂実験におけるクラックの伝播形態は、クラックの伝播現象であると考察でき、“静的割裂破壊の力学仮定”が衝撃割裂実験では成り立たないことが分かった。
- ② 衝撃割裂実験時の力積とクラック伝播速度

の関係で、力積が大きくなればクラック伝播速度が速くなるが、それ以上に衝撃力を大きくしてもクラック伝播速度が増大しないという限界状態があり、モルタル供試体および花崗岩供試体で 2.6 km/sec に収斂した。

- ③ 花崗岩供試体における力積 97.0 N/sec の衝撃実験でのクラック先端部の水平方向引張ひずみは 196 $\mu$  から 360 $\mu$  であることがひずみ計測値より分かった。また、その時のクラック伝播速度は 1.07km/sec であり、画像解析より求めたクラック伝播速度とよく一致した。

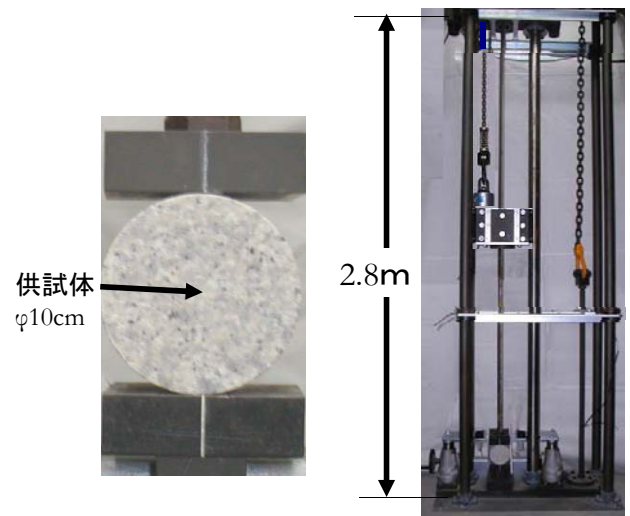


図-1 製作した衝撃割裂実験機と供試体

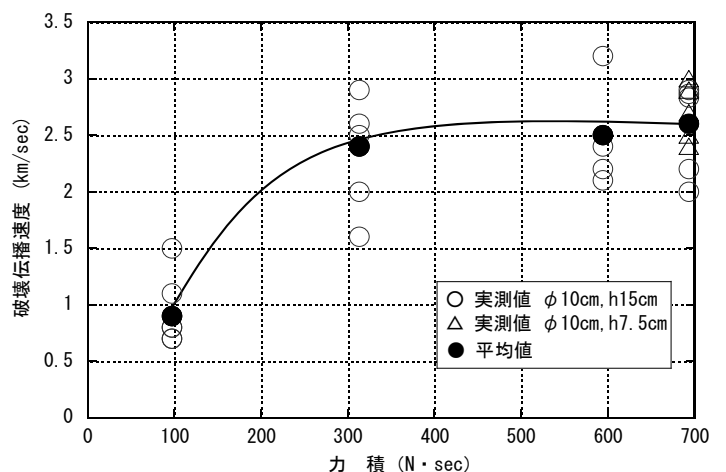


図-2 力積とクラックの伝播速度の関係 (花崗岩供試体)

## (2) 「針金を用いた衝撃引張実験における脆性破断現象」に関する研究 (論文番号③)

1995年に発生した阪神淡路大震災時に高層鉄骨建物鋼製柱において、破断面がずれていない状態で、幅50cm四方の角柱が水平方向に脆性破断が生じた。また、破断面では脆性破断の特徴であるChevronパターン破面が観察された。こうした鋼製柱の水平方向での脆性破断現象は、今までの地震時で経験したことのない破断現象であり、その原因の一つとして、地震時衝撃上下動による引張脆性破断が考えられた。しかしながら、脆性破断した鋼製柱における強震動記録やひずみ計測値がないため、脆性破断の力学的原因が明確にできない状況にある。

こうした衝撃破断現象を明らかにするための金属材料の物性に関する基礎的研究課題として、作用する衝撃引張力の大きさと延性から脆性に移行する破断現象との関連性がある。ところで、金属材料の衝撃引張破断試験法には、曲げ引張現象を調べるためのSharp impact testがある。Sharp impact testは、振り子の錘の振り抜きにより試験片を切断する試験方法である。しかしながら、地震時衝撃上下動による衝撃引張時の金属材料の延性から脆性への変化を追跡するには衝撃引張試験機の製作が必要であった。

こうした観点より本研究では、まず、広範囲の実験条件での実験が可能なコンパクトな引張衝撃破断実験機を研究製作(図-3参照)した。次に、針金供試体を用い、衝撃引張力の大きさと温度をパラメーターとした各種の実験条件下で衝撃引張実験を行った。実験時には、詳細なひずみ計測を行い、衝撃引張脆性破断の力学現象(図-4参照)を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 温度ごとの力積と伸び率の実験結果では、力積と伸び率には高い相関性をもった線形回帰関係、すなわち、 $-50^{\circ}\text{C}$ で $-0.014\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ 、 $38^{\circ}\text{C}$ で $-0.016\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ で $-0.018\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ であった。
- ② 力積ごとの温度と伸び率の関係では、 $38^{\circ}\text{C}$ に比べ、 $100^{\circ}\text{C}$ で伸び率は1.6倍に増大、 $-50^{\circ}\text{C}$ で0.7倍に減少した。これらのことより、鋼製針金は、力積の増大および温度を低下させることにより、脆性を呈していくことがわかった。
- ③ 力積 $641\ \text{N}\cdot\text{sec}$ および $-50^{\circ}\text{C}$ の実験条件で伸び率0%の脆性破断を確認できた。最大の伸び率は力積 $140\ \text{N}\cdot\text{sec}$ および $100^{\circ}\text{C}$ の実験条件で20.2%であった。
- ④ 力積を増大および温度を低下させると、延性破断であるDimpleパターン破面から脆性破断であるChevronパターン破面に変化していくことを明らかにした。

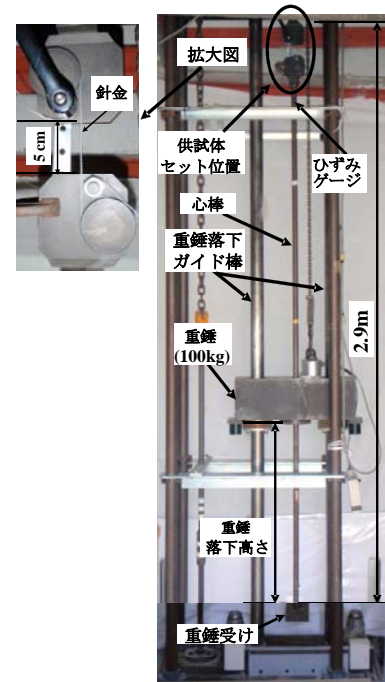


図-3 製作した衝撃引張実験機

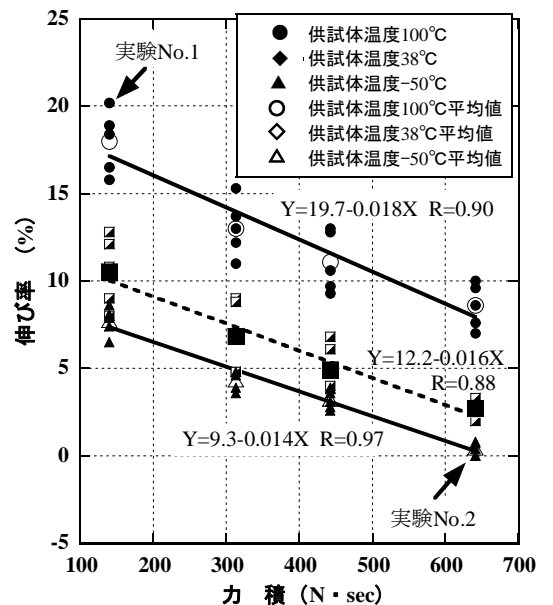


図-4 力積と伸びの関係

### 3.2 衝撃载荷時の2次元モデル地盤支持力に関する実験的研究 (論文番号②)

1995年に発生した兵庫県南部地震時において多くの構造物で非常に大きい鉛直成分をもった地震動によると考えられる破壊形態が生じた。その中で、地中部においても衝撃上下動によると考えられるせん断破壊や引張破壊の破壊形態が観察された。こうしたことより、衝撃载荷時の基礎支持力に関する研究の重要性が認識された。

衝撃载荷時の基礎支持力発生時の基礎と地盤との動的相互力学作用に関する模型実験法については、実験や計測の方法に難しさがあるため、構造物に対する衝撃実験などに比べてほとんど行われていないのが実情である。特に、衝撃極限支持力発生時の基礎設置下の地盤変形挙動や基礎体に発生する力学状態の変化を $\mu\epsilon$ や $\mu\text{sec}$ のオーダーで議論する必要があり、計測上の課題となっている。

本研究では、こうした観点より、衝撃支持力実験機を研究製作(図-5参照)し、衝撃载荷時における基礎支持力の発生力学現象に関する2次元砂地盤モデル模型実験を行なった。実験時には、詳細なひずみ計測を実施した。また、世界最速の毎秒100万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを用い、得られた画像解析結果をPIV解析し、衝撃载荷時の基礎支持力発生時の基礎と地盤との動的相互力学作用(図-6参照)を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 衝撃極限支持力は基礎下面の沈下がほぼゼロで生じた。すなわち、衝撃極限支持力発生時の地盤の基礎下面下の力学状態は剛体に近い挙動を示すことがわかった。
- ② 衝撃極限支持力発生時の基礎底面での基礎に生じたひずみは $90\mu\epsilon$ 程度と極めて大きいものであった。水平地盤の静的極限支持力発生時の基礎下面のひずみが $5\mu\epsilon$ 程度であり衝撃極限支持力発生時はその18倍の大きさであった。
- ③ 衝撃極限支持力発生時では水平地盤および傾斜地盤でほぼ同じ基礎底面ひずみが生じ、基礎底面下の地盤の力学状態が剛体に近いものであることが影響しての結果であることがわかった。

④ 静的極限支持力は地盤傾斜の影響を大きく受けるが、衝撃極限支持力発生時は地盤の傾斜の影響は小さいものがあることがわかった。

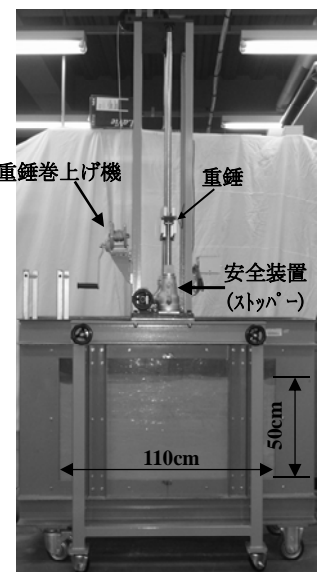


図-5 製作した衝撃支持力実験機

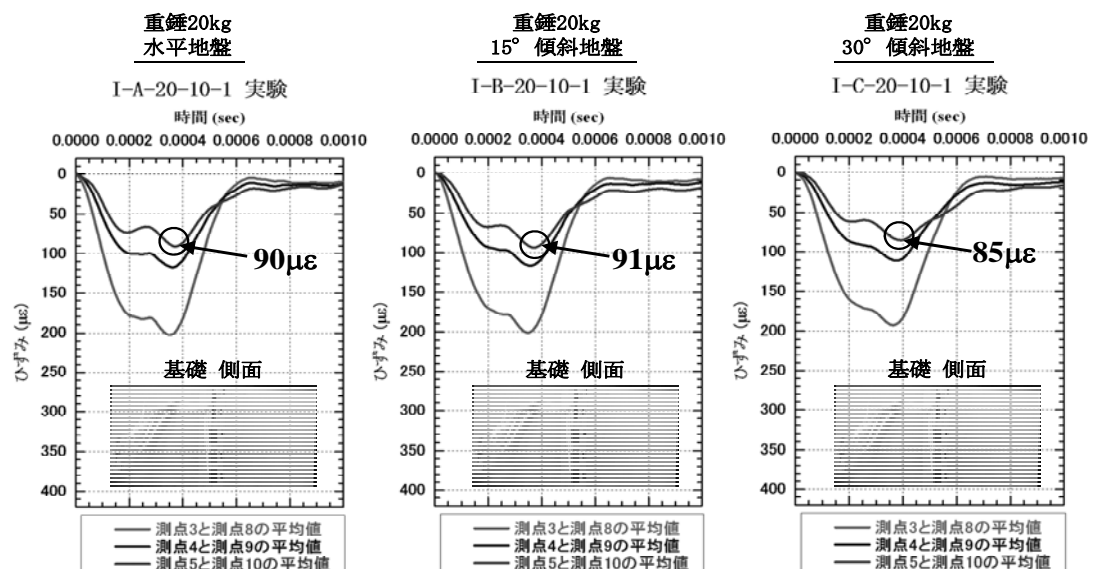


図-6 衝撃支持力実験における時間—ひずみ関係

# 脆性物体の衝撃破壊挙動に関する実験的研究

玉野 富雄(工学部)

研究分担者は、「脆性物体の衝撃破壊挙動に関する実験的研究」として、「花崗岩におけるクラック伝播速度に関する衝撃実験」と「針金を用いた衝撃引張実験における脆性破断現象」の二つの研究テーマに取り組んだ。

## (1) 「花崗岩におけるクラック伝播速度に関する衝撃実験」に関する研究

地震動を生じさせる断層面におけるクラックの伝播速度は、2.5 km/sec 程度であると言われている。この伝播速度については、地震動の発生メカニズムをより明らかなものとするための詳細な研究が求められる。しかしながら、岩盤のような脆性体中に生じるクラック伝播は、超高速で生じるものであり、実験的に確かめた研究事例は見当たらない。

研究分担者らは、毎秒 100 万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを使用し、種々の物理現象および力学現象を可視化することで、それらの現象を明らかにする研究を進めている。また、高精度での衝撃実験が可能な衝撃実験機を研究製作し、花崗岩における圧縮载荷時および引張载荷時の材料物性が静的破壊時と衝撃破壊時で大きく異なること、さらに、衝撃破壊時においても実験時の力積によって破壊形態が大きく異なることを示してきている。

本研究では、この研究を発展させ、花崗岩の円筒形供試体(以下、円筒形供試体を単に供試体と呼ぶ)を横にして衝撃载荷する衝撃割裂実験法を研究開発した。実験時の計測には、世界最速の毎秒 100 万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを用い、得られた画像解析結果を PIV 解析し、クラック伝播形態およびクラック伝播速度の力学現象を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 衝撃割裂実験におけるクラックの伝播形態は、クラックの伝播現象であると考察でき、“静的割裂破壊の力学仮定”が衝撃割裂実験では成り立たないことが分かった。
- ② 衝撃割裂実験時の力積とクラック伝播速度の関係で、力積が大きくなればクラック伝播速度が速くなるが、それ以上に衝撃力を大きくしてもクラック伝播速度が増大しないという限界状態があり、モルタル供試体および花崗岩供試体で 2.6 km/sec に収斂した。
- ③ 花崗岩供試体における力積 97.0 N/sec の衝撃実験でのクラック先端部の水平方向引張ひずみは 196  $\mu$  から 360  $\mu$  であることがひずみ計測値より分かった。また、その時のクラック伝播速度は 1.07km/sec であり、画像解析より求めたクラック伝播速度とよく一致した。

## (2) 「針金を用いた衝撃引張実験における脆性破断現象」に関する研究

1995 年に発生した阪神淡路大震災時に高層鉄骨建物鋼製柱において、破断面がずれていない状況で、幅 50cm 四方の角柱が水平方向に脆性破断が生じた。また、破断面では脆性破断の特徴である Chevron パターンの破面が観察された。こうした鋼製柱の水平方向での脆性破断現象は、今までの地震時で経験したことのない破断現象であり、その原因の一つとして、地震時衝撃上下動による純引張脆性破断が考えられる。しかしながら、脆性破断した鋼製柱における強震動記録やひずみ計測値がないため、脆性破断の力学的原因が明確にできない状況にある。

こうした衝撃破断現象を明らかにするための金属材料の物性に関する基礎的研究課題として、作用する衝撃純引張力の大きさと延性から脆性に移行する破断現象との関連性がある。ところで、金属材料の衝撃引張破断試験法には、曲げ引張現象を調べるための Sharp impact test がある。Sharp impact test は、振り子の錘の振り抜きにより試験片を切断する試験方法である。しかしながら、地震時衝撃上下動による衝撃引張時の金属材料の延性から脆性への変化を追跡するには衝撃引張試験機の製作が必要であった。

こうした観点より本研究では、まず、広範囲の実験条件での実験が可能なコンパクトな引張衝撃破断実験機を研究製作した。次に、針金供試体を用い、衝撃引張力の大きさと温度をパラメーターとした各種の実験条件下で衝撃引張実験を行った。実験時には、詳細なひずみ計測を行い、衝撃引張脆性破断の力学現象を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 温度ごとの力積と伸び率の実験結果では、力積と伸び率には高い相関性をもった線形回帰関係、すなわち、 $-50^{\circ}\text{C}$ で $-0.014\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ 、 $38^{\circ}\text{C}$ で $-0.016\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ で $-0.018\ \%/ \text{N}\cdot\text{sec}$ であった。
- ② 力積ごとの温度と伸び率の関係では、 $38^{\circ}\text{C}$ に比べ、 $100^{\circ}\text{C}$ で伸び率は1.6倍に増大、 $-50^{\circ}\text{C}$ で0.7倍に減少した。これらのことより、針金は、力積の増大および温度を低下させることにより、脆性を呈していくことがわかった。
- ③ 力積  $641\ \text{N}\cdot\text{sec}$  および $-50^{\circ}\text{C}$ の実験条件で伸び率0%の脆性破断を確認できた。最大の伸び率は力積  $140\ \text{N}\cdot\text{sec}$  および $100^{\circ}\text{C}$ の実験条件で20.2%であった。
- ④ 破面解析結果より、力積を増大および温度を低下させると、延性破断である Dimple パターン破面から脆性破断である Chevron パターン破面に変化していくことを明らかにした。

# 衝撃載荷時における2次元モデル基礎支持力に関する実験的研究

金岡 正信(工学部)

1995年に発生した兵庫県南部地震時において多くの構造物で非常に大きい鉛直成分をもった地震動によると考えられる破壊形態が生じた。その中で、地中部においても衝撃上下動によると考えられるせん断破壊や引張破壊の破壊形態が観察された。こうしたことより、衝撃載荷時の基礎支持力に関する研究の重要性が認識された。

衝撃載荷時の基礎支持力発生時の基礎と地盤との動的相互力学作用に関する模型実験法については、実験や計測の方法に難しさがあるため、構造物に対する衝撃実験などに比べてほとんど行われていないのが実情である。特に、衝撃極限支持力発生時の基礎設置下の地盤変形挙動や基礎体に発生する力学状態の変化を $\mu\epsilon$ や $\mu\text{sec}$ のオーダーで議論する必要があり、計測上の課題となっている。

本研究では、こうした観点より、衝撃支持力実験機を研究製作し、衝撃載荷時における基礎支持力の発生力学現象に関する2次元砂地盤モデル模型実験を行なった。実験時には、詳細なひずみ計測を実施した。また、世界最速の毎秒100万コマを撮影できる超高速ビデオカメラを用い、得られた画像解析結果をPIV解析し、衝撃載荷時の基礎支持力発生時の基礎と地盤との動的相互力学作用を明らかにした。

本研究で得られた成果を以下に要約して示す。

- ① 衝撃極限支持力は基礎下面の沈下がほぼゼロで生じた。すなわち、衝撃極限支持力発生時の地盤の基礎下面下の力学状態は剛体に近い挙動を示すことがわかった。
- ② 衝撃極限支持力発生時の基礎底面での基礎に生じたひずみは $90\mu\epsilon$ 程度と極めて大きいものであった。水平地盤の静的極限支持力発生時の基礎下面のひずみが $5\mu\epsilon$ 程度であり衝撃極限支持力発生時はその18倍の大きさであった。
- ③ 衝撃極限支持力発生時では水平地盤および傾斜地盤でほぼ同じ基礎底面ひずみが生じ、基礎底面下の地盤の力学状態が剛体に近いものであることが影響しての結果であることがわかった。
- ④ 静的極限支持力は地盤傾斜の影響を大きく受けるが、衝撃極限支持力発生時では地盤の傾斜の影響は小さいものであることがわかった。