

重錘落下を受ける落石防護柵模型の耐衝撃挙動に関する動的応答解析

Dynamic response analysis on impact resistant behavior of rockfall protection fence under falling-weight impact loading

室蘭工業大学

室蘭工業大学大学院

(国研)寒地土木研究所

(国研)寒地土木研究所

○ 学生員 服部 桃加 (Momoka Hattori)

正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)

正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)

正 員 荒木 恒也 (Nobuya Araki)

1. はじめに

我が国の道路沿いには落石から道路交通や人命を守るために、H形鋼支柱、ワイヤロープ、ひし形金網から構成される従来型落石防護柵が数多く設置されている。その設計は、落石対策便覧¹⁾に基づき、各構成部材の吸収エネルギーの総和で与えられる全体の可能吸収エネルギーが、落石の運動エネルギーを上回ることを確認することで、安全性の照査が行われている。しかしながら、実際に落石を受けた防護柵を見ると、支柱基部の局部座屈による横倒れや落石が金網を貫通するなど、設計では想定していない損傷事例も報告されている。このような背景を受けて、著者らの研究グループでは、従来型落石防護柵に関する落石衝突時の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、統一的な性能評価手法や耐衝撃設計法を提案することを最終目的とし、種々の実験を実施している^{2),3)}。

本研究では、これら一連の実験の中で、重錘がワイヤロープ間の金網に直接作用する場合を想定した重錘落下衝撃実験を対象に、有限要素法を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、実験結果と数値解析結果を比較することにより解析結果の妥当性を確認するとともに、その耐衝撃挙動を数値解析的に検討した。なお、本解析にはLS-DYNA (Ver. R9)⁴⁾を使用した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、試験体および鋼製型枠の形状寸法を示している。試験体は、支柱間隔が3mの従来型落石防護柵を模擬し、ワイヤロープを30cm間隔で7本配置した後に、素線径3.2mmの金網を設置した。ワイヤロープには、1本あたり5kN程度の初期張力を導入している。金網は、実構造

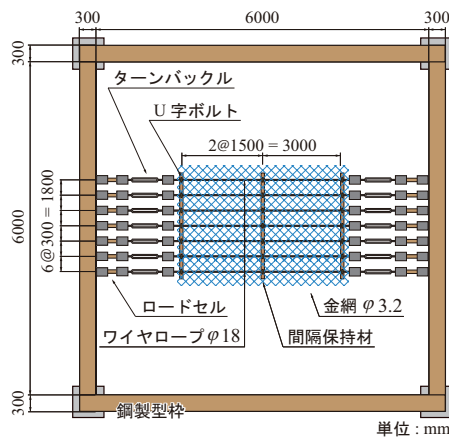


図-1 試験体および鋼製型枠の形状寸法

と同様にワイヤロープの軸方向に展開し、ワイヤロープの上方(重錘衝突側)に設置した。また、重錘衝突時のワイヤロープの開きを抑制するために金網両端部および中央部に間隔保持材を配置している。なお、金網とワイヤロープは、間隔保持材と支柱にU字ボルトを用いて固定しており、両端部のワイヤロープは、写真-1に示すように、シャックル、ターンバックル、連結治具およびロードセルを介して鋼製型枠に接続されている。

2.2 実験方法および測定項目

写真-2には、重錘落下衝撃実験時の状況を示している。実験は、鋼製重錘をトラッククレーンを用いて所定の位置まで吊り上げ、着脱装置を用いて自由落下させることにより実施した。本実験で用いた鋼製重錘は、図-2に示すように質量110kg、直径305mm、高さ240mmであり、重錘先端部が球状となっている。また、重錘は、2本のガイドロープを介して所定の位置に正確に落下するようになっている。

表-1には、本研究で対象とした実験ケースを一覧に示している。実験は、図-3に示すように重錘がワイヤロープ間の金網に直接作用する場合を想定しており、金網

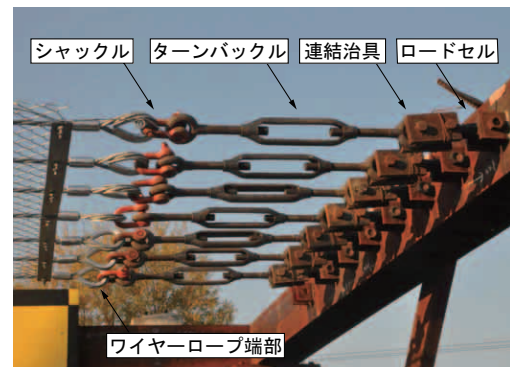


写真-1 ワイヤロープ端部の固定状況

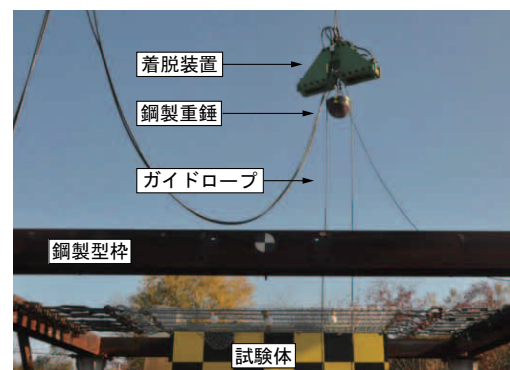


写真-2 実験状況

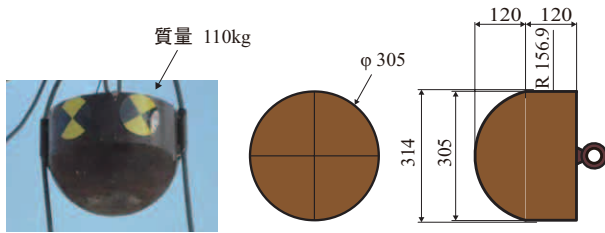


図-2 実験に使用した鋼製重錘の寸法

表-1 実験ケース一覧

実験ケース名	落下高さ (m)	衝突位置	衝突エネルギー (kJ)
S-H10-1	10	①	10.8
S-H2.5-2	2.5	②	2.7

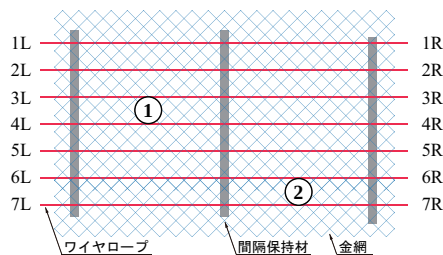


図-3 重錘衝突位置

中央部に重錘を落下させた後に、金網を取り替えずに端部に重錘を落下させた。落下高さ H はそれぞれ 10 m, 2.5 m である。

本実験の測定項目は、(1)高速度カメラによって計測した载荷点変位、(2)ロードセルによるロープ張力、(3)重錘上面に取り付けた加速度計から算出した重錘衝撃力である。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-4には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。鋼製型枠および間隔保持材には4節点シェル要素、金網およびターンバックルには2節点梁要素、それ以外については全て8節点固体要素を用いた。要素の積分点数に関しては、8節点固体要素に対して1点積分、4節点シェル要素に対して断面内板厚方向に3点積分、2節点梁要素に対して4点積分とした。

境界条件は、鋼製型枠支柱底部を完全固定とした。また、シャックル-ターンバックル間およびターンバックル-連結治具間は、完全結合とし剥離やすべりは考慮していない。さらに、連結治具-ロードセル間およびロードセル-鋼製型枠間は、実験ではボルトを用いて結合されていることより、ここではボルトをビーム要素でモデル化し、それぞれ結合している。

本解析では、重錘が傾くことなく理想的な状態で金網に衝突するように重錘中心線の z 軸方向成分のみを可動としている。また、金網の素線間に線と線の接触を、金網とワイヤロープあるいは重錘間には線と面の接触を、それ以外には面と面の接触面を定義した。いずれの接触面においても剥離およびすべりを考慮し、摩擦係数は 0.4 と設定し

総節点数：約 110,000
総要素数：約 92,000

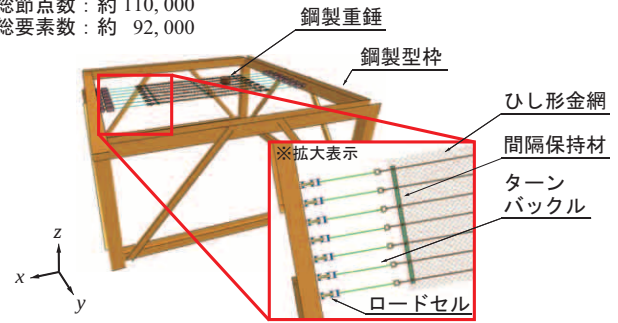


図-4 有限要素モデル

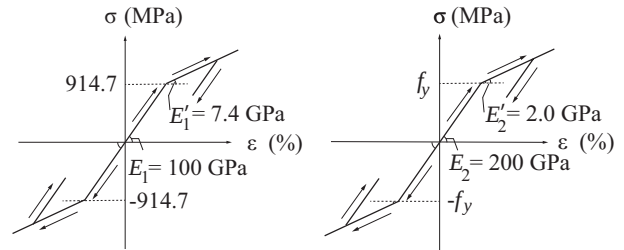


図-5 材料構成則

た。また、重錘の全節点に表-1に示す重錘落下高さに相当する衝突速度を付加させることで実施した。なお、ワイヤロープの初期張力、減衰および重力については考慮していない。

3.2 材料構成則

図-5には、(a)ワイヤロープ、(b)金網および間隔保持材の応力-ひずみ関係を示している。

(a)図に示すワイヤロープの強度特性は落石対策便覧を参考に決定しており、バイリニア型の等方便化則を適用した。1次弾性係数 E_1 、2次弾性係数 E_1' および降伏応力 f_y はそれぞれ $E_1 = 100$ GPa, $E_1' = 7.4$ GPa, $f_y = 914.7$ MPa と設定している。

(b)図に示す金網と間隔保持材についてもワイヤロープと同様な構成則を用いており、弾性係数 $E_2 = 200$ GPa とし、塑性硬化係数 E_2' は弾性係数の 1% とした。なお、金網のJIS規格には、引張強さのみが規定されており、降伏応力に関する規定はない。ここでは、使用した金網の引張強さが 396 MPa (ミルシートによる)であることから、SS400 材相当 (降伏応力 $f_y = 245$ MPa) と判断した。また、間隔保持材の降伏応力に関してもミルシートの値 (降伏応力 $f_y = 385$ MPa) を採用した。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。なお、ワイヤロープ、金網および間隔保持材の密度 ρ_s 、ポアソン比 ν_s には公称値を用いることとし、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³, $\nu_s = 0.3$ とした。

また、鋼製型枠、ロードセル、ターンバックルおよびシャックルに関しては、実験時に塑性化していないことを確認していることから、弾性体と仮定し、密度 ρ_s 、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s にはそれぞれ公称値を用い、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³, $E_s = 200$ GPa, $\nu_s = 0.3$ とした。また、重錘も同様に弾性体と仮定し、密度については重錘質量 110 kg となるように解析モデルの体積で除した値を入力している。

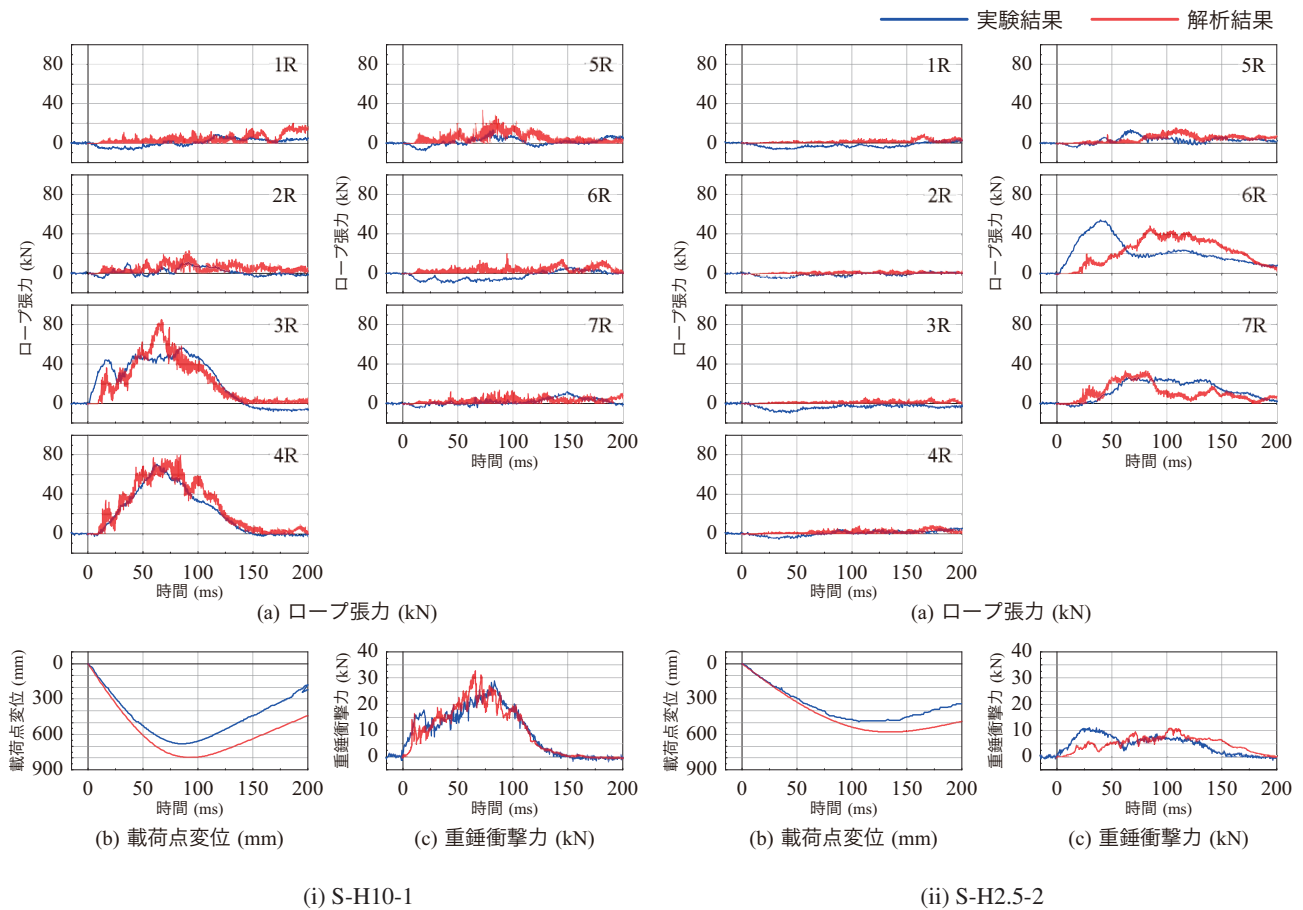


図-6 各種時刻歴応答波形

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種時刻歴応答波形

図-6は、本研究で対象とした2ケースにおけるロープ張力、荷点変位および重錘衝撃力の実験結果と解析結果を比較する形で示したものである。青線は実験結果を、赤線は解析結果を示している。なお、ロープ張力はロープの両端に設置したロードセルにて測定したが、いずれのケースにおいても左右でほぼ同等の波形性状を示したことから、ここでは片側の測定結果(1R~7R、図-3参照)のみを示している。また、荷点変位は、重錘落下位置直下における金網の鉛直方向変位である。実験結果における重錘衝撃力は、重錘上面に取り付けた加速度計からの加速度波形に重錘質量(110kg)を乗じることで評価し、解析結果の衝撃力は、重錘と金網の接触反力の総和として算出した。なお、横軸は重錘が金網に衝突した時刻を零としている。

(1) ロープ張力

図-6(a)に示すロープ張力に着目すると、実験結果では、いずれのケースも重錘落下位置近傍の2本のワイヤロープ(S-H10-1:3R・4R, S-H2.5-2:6R・7R)に大きな張力が発生している。最大ロープ張力を見ると、中央に荷重したS-H10-1では70kN程度(4R)、端部に荷重したS-H2.5-2では55kN程度(6R)となっている。また、中央荷重であるS-H10-1の場合には、衝突位置近傍の2本のロープ(3R, 4R)張力はほぼ同程度であるものの、端部荷重であるS-H2.5-2の場合には、2本のロープ(6R, 7R)張力に差が生じている。

一方、解析結果を見ると、実験結果と同様に主に重錘落下位置近傍の2本のロープに大きな張力が発生しており、

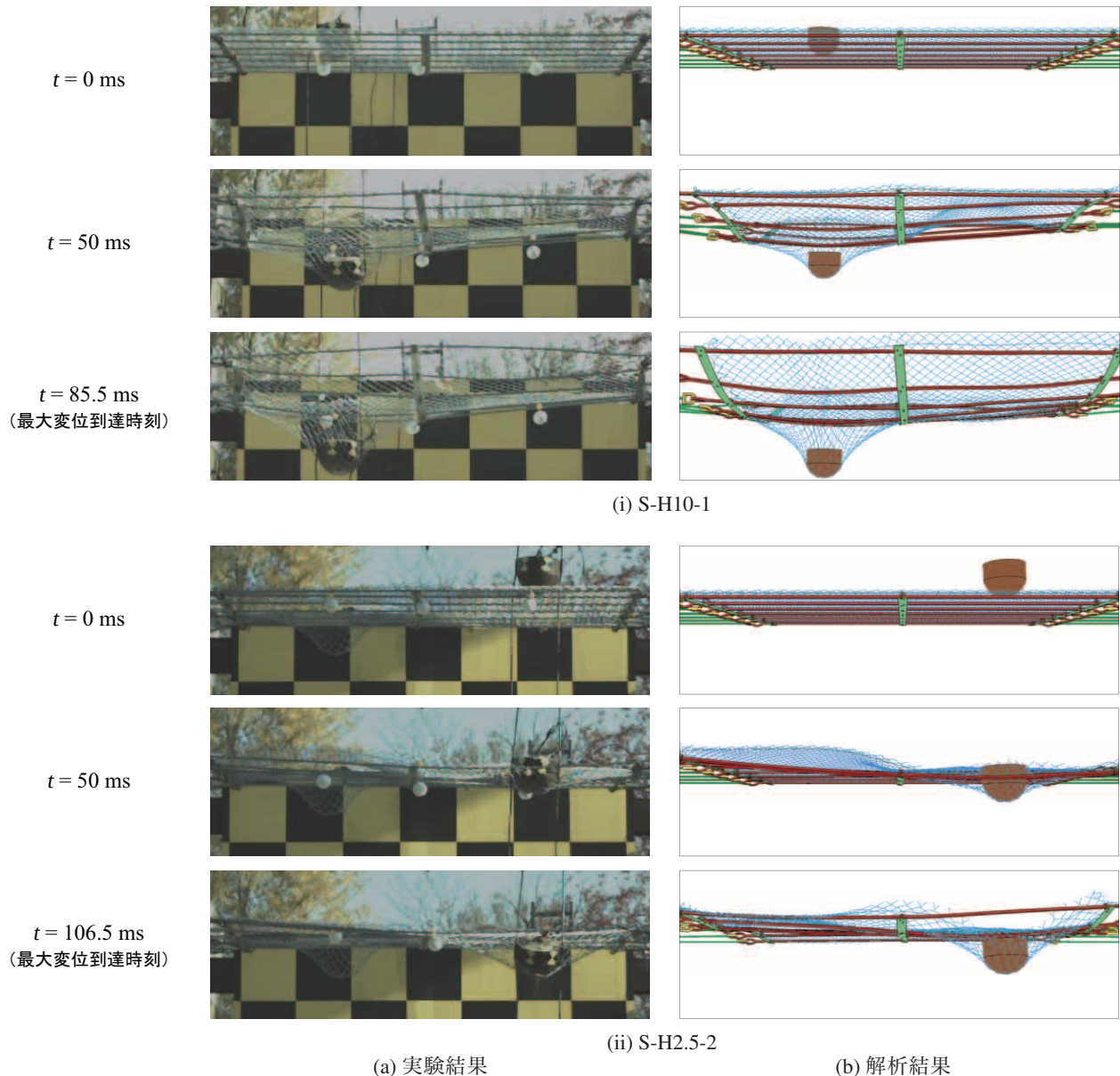
いずれのケースにおいても最大ロープ張力および作用継続時間を概ね再現していることが分かる。端部荷重であるS-H2.5-2の場合には、重錘落下位置近傍の2本のロープ張力は、実験結果と比較して必ずしも波形性状は対応していない。しかしながら、2本のロープの最大張力について、解析結果と実験結果を比較すると、両者ともに6Rの方が大きく示されており、定性的には実験結果を再現できているものと考えられる。なお、2本のロープ張力を比較した場合に、端部ロープ(7R)が6Rよりも小さく評価されているが、これは端部ロープにかかる金網の領域が小さく、重錘衝突後に重錘が金網を巻き込むことによって、金網が端部ロープから外れることが一つの要因と考えられる。

(2) 荷点変位

図-6(b)に示す荷点変位に着目すると、実験結果では、落下高さが大きいS-H10-1の方が最大変位が大きく、またその到達時間が早い。解析結果では、いずれのケースにおいても波形の立ち上がりは良く一致しているものの、最大変位に関しては、実験結果よりも大きく示されていることが分かる。なお、解析結果の最大変位は、実験結果と比較して両者ともに20%程度大きくなっている。

(3) 重錘衝撃力

図-6(c)に示す重錘衝撃力に着目すると、実験結果では、いずれのケースも継続時間が150ms程度となっていることが分かる。最大重錘衝撃力はS-H10-1の場合には約30kN、S-H2.5-2の場合には約10kNとなっている。解析結果を見ると、S-H10-1の場合には実験結果の波形性状をほぼ適切に再現していることが分かる。一方、S-H2.5-2の場合



図－7 実験時最大変位到達時刻における変形状況比較

には、波形の立ち上がりに差異が見られるものの、最大値に関しては大略再現可能であるものと考えられる。

4.2 変形状況の比較

図－7には、重錘衝突時から実験時の最大変位到達時刻（S-H10-1：85.5 ms、S-H2.5-2：106.5 ms）までの金網やワイヤロープなどの変形状況を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。図より、解析結果は、重錘衝突時から最大変位到達時に至るまで実験結果の金網やワイヤロープの変形を大略再現していることが分かる。また、端部载荷のS-H2.5-2の場合には、金網が端部ロープから外れている様子が確認される。

5. まとめ

- 1) 本数値解析手法を適用することにより、ワイヤロープ張力、载荷点変位および重錘衝撃力を大略再現可能である。
- 2) 金網やワイヤロープの変形状況に関しても、実験結果

を概ね再現可能である。

今後は、他の実験ケースを対象に同様な数値解析を実施し、実験結果との比較によって、解析精度の向上を試みる予定である。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 荒木恒也，今野久志，西 弘明，小室雅人：従来型落石防護柵の重錘衝突実験，土木学会北海道支部論文報告集，第73号，A-22 (CD-ROM)，2017.1
- 3) 今野久志，小室雅人，西 弘明，荒木恒也，岸 徳光：従来型落石防護柵に用いられる間隔保持材の設置効果に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第25巻，pp. 151-158，2017.11
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.