

衝撃応答解析における RC 版のモデル化に関する検討

A consideration for modeling of RC slabs for impact response analysis

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
室蘭工業大学大学院	○ 学生会員	鈴木 健之 (Kenshi Suzuki)

1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下において、耐衝撃構造物の設計に関しても性能照査型設計法に移行していくことが必要であると考えられる。そのためには、実験的検討はもちろんのこと数値解析的な検討を援用し、同設計法を確立していくことが肝要である。著者らは過去に RC 部材の衝撃挙動解析に関して、小型部材を対象に各種解析手法の妥当性の検討等を実施しており、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示した¹⁾。また、小型 RC 梁に関する解析手法を踏襲した場合の実規模 RC 桁への適用性に関して、減衰定数や軸方向の要素分割数が数値解析結果に与える影響について精度検討を行っている²⁾。しかしながら、より実構造物に近い RC 版部材に対する衝撃挙動解析手法に関しては、未だ解析事例が少ないのが現状である。

このような背景から、本研究では、RC 版部材に関する衝撃応答解析手法の確立を目的に、四辺支持 RC 版の重錘落下衝撃実験を実施し、併せて数値解析を行い、その結果について実験結果と比較することで、衝撃応答解析における RC 版のモデル化について検討を行った。検討方法は、(1) 軸方向要素長を変化させた場合、(2) 版厚方向の要素長を変化させた場合、(3) 減衰定数を変化させた場合の 8 ケースについて、数値解析結果を実験結果と比較することにより検討を行った。

なお、本数値解析には、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA³⁾を用いている。

2. 実験概要

図-1 には、本数値解析で対象とした RC 版の形状寸法および配筋状況を示している。RC 版の寸法は $2,000 \times 2,000 \times 180$ mm であり、下端鉄筋には D16 を用い、平均かぶりは 40 mm とした。また、鉄筋は四辺の外縁に配置した溝型鋼に溶接することで定着を確保している。試験体の支持条件は、支持間隔を 1,750 mm とした四辺支持とし、支点部は四辺四隅とも上下方向への変位を抑え回転を許容する単純支持に近い支持状態である。重錘落下衝突位置は重錘直径に対する鉄筋間隔の影響が生じないように、RC 版中央部の鉄筋交差位置直上としている。重錘には直径 150 mm の鋼製円柱を用い、質量は 300 kg である。衝撃载荷実験は、所定の高さから重錘を一度だけ自由落下させる単一载荷として実験を行っている。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2 には、本数値解析で用いた RC 版の要素分割状況を示している。解析対象のモデル化は、軸方向鉄筋には 2 節点梁要素、溝型鋼には 4 節点板要素、その他の要素には 8 節点固体要素を適用した。コンクリート要素は、一つの要素が立方体となるように軸方向要素長に合わせて版厚方向の要素長を決定している。数値解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮し、1/4 モデルとした。境界条件は、実験時と同様に上下方向への変位を抑え、支点治具下部の鋼棒において回転のみを許容している。なお、対称面にはシンメトリー条件を入力している。また、コンクリートと重錘および支点治具間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。コンクリートと鉄筋および溝型鋼の間は完全付着としている。衝撃力は衝突位置に配置した重錘に初速度を入力することにより与えている。

表-1 には、本数値解析で対象とした数値解析ケース

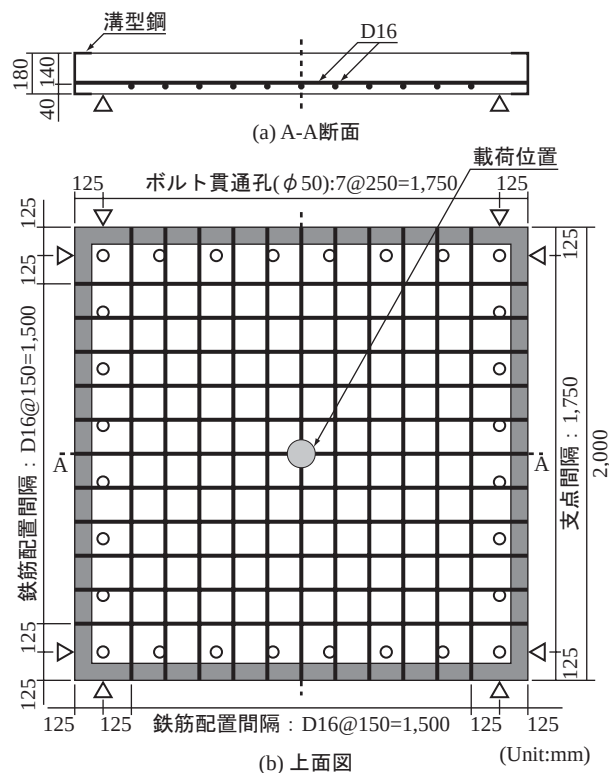


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

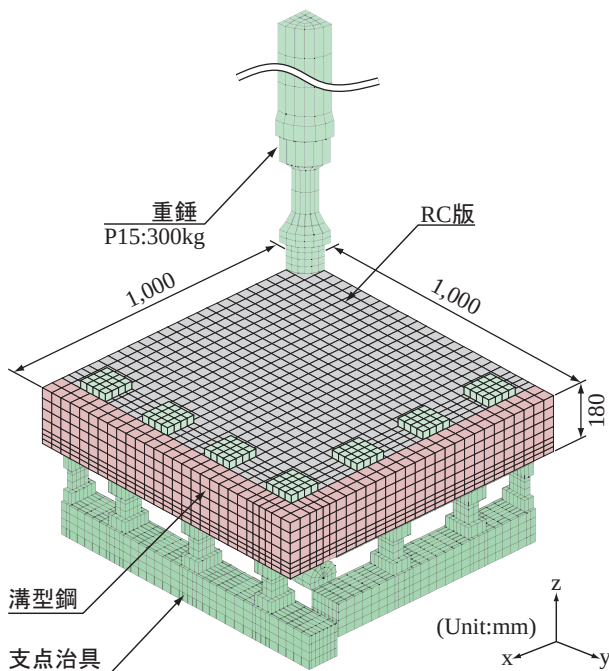


図-2 要素分割状況

表-1 数値解析ケース一覧

ケース名	軸方向 要素長 (mm)	版厚方向 要素長 (mm)	減衰 定数 (%)	総節 点数	総要 素数
EL25-0.5	25.0	26.4	0.5	22,449	19,773
EL30-0.5	30.0	33.0		16,568	14,121
EL37.5-0.5	37.5			14,048	11,804
EL50-0.5	50.0	44.0		10,708	8,675
EL37.5-0.5-R	37.5	10.0		22,458	20,281
EL37.5-0.0		33.0	0.0	14,048	11,804
EL37.5-1.0			1.0		
EL37.5-1.5			1.5		

覧を示している。表中、第一項目のELに付随する数字は軸方向要素長(mm)を示しており、第二項目には減衰定数(%)を示している。また、第三項目のRは版厚方向の要素長を10mmとしたケースである。数値解析モデルの総節点数および総要素数は表の通りである。減衰定数は、質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して0.0～1.5%と設定している。なお、本数値解析は、重錘がRC版に衝突した時点を0msとし、RC版の挙動が定常状態に至るまでの100ms間について実施した。

3.2 材料物性モデル

図-3には、各材料の応力-ひずみ関係を示している。

図-3(a)に示すように、コンクリート要素の応力-ひずみ関係は、圧縮側に関しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、圧縮強度を降伏強度とする完全弾塑性性のバイリニア型を適用している。コンクリートの圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500\mu$ に達した状態でコンクリートが降伏すると仮定している。引張側に関しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないとするカットオフを

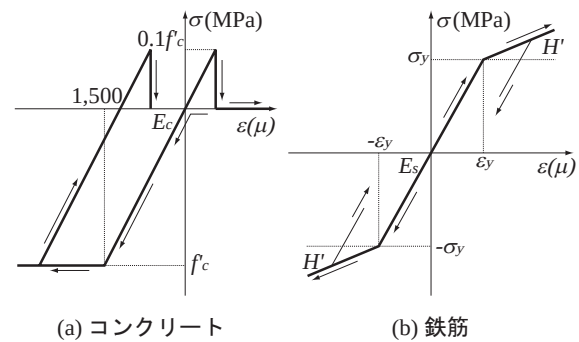


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 数値解析に用いた各材料の力学的特性値

材料	密度 ρ (ton/m ³)	圧縮/降伏 強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	27.2	18.3	0.167
鉄筋	7.85	345	206	0.3
重錘	6.86	-	206	0.3

定義している。なお、引張強度は既往の研究¹⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。また、降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用している。

図-3(b)に示すように、鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係は、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏の判定には、von Misesの降伏条件を採用している。塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の1%と仮定している。

表-2には、本数値解析に用いた各材料の力学的特性値を示している。なお、重錘の密度は、重錘質量を数値解析モデルにおける重錘の体積で除すことで求めている。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 各種応答波形

図-4には、各種応答波形を測定項目ごとに実験結果と数値解析結果を重ねて示している。なお、数値解析結果における支点反力は、実験時のロードセルの位置における軸力を支点反力として求めている。応答変位波形に関して、(c)には載荷点、(d)(e)にはそれぞれ載荷点より250mmおよび500mm離れた位置の変位波形を示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力波形における実験結果は、重錘衝突直後に振幅が大きく周期の短い第1波と第1波に比べ振幅が小さく周期の長い第2波で構成されている。

次に解析結果に着目すると、最大値は全ての解析ケースにおいてほぼ同程度の値を示しており、実験結果の7割程度である。また、軸方向および版厚方向の要素長が小さくなるほど、第2波目のピークが小さくなり、波動継続時間が長くなる傾向がある。減衰定数を変化させた場合は、いずれの解析ケースにおいても同様の波形性状を示している。

図-4(b)より、支点反力波形における実験結果は、重錘衝突時より約2ms程度遅れて第1波が発生し、波動継続時間は7～8ms程度である。

次に解析結果に着目すると、軸方向および版厚方向の要素長が小さくなるほど、最大値は小さくなり、波動継続時

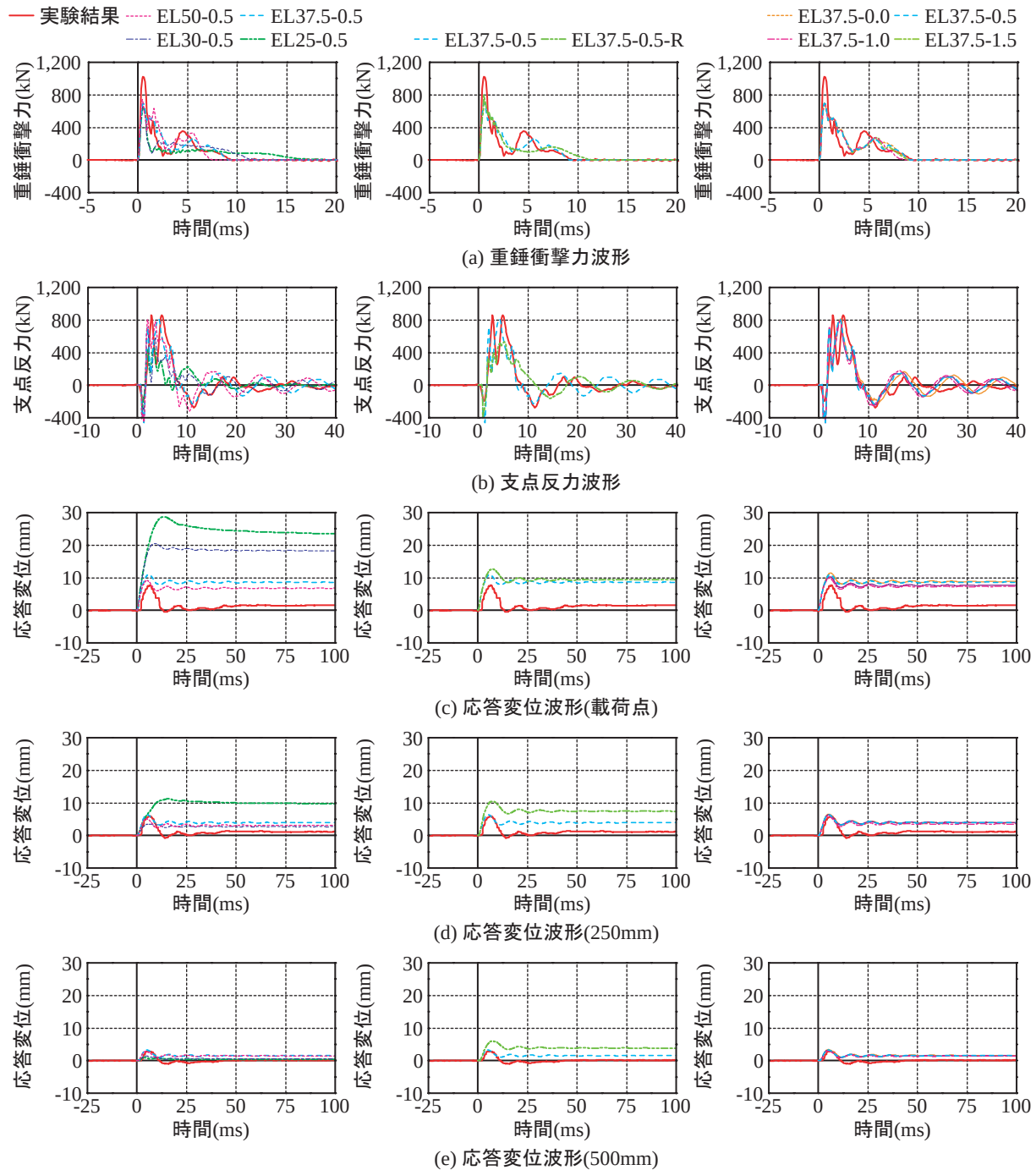


図-4 各種応答波形

間も短くなる傾向がある。減衰定数を変化させた場合は、重錘衝撃力と同様にいずれの解析ケースにおいても同様の波形性状を示している。

図-4(c)～(e)より、応答変位波形における実験結果は、重錘衝突直後に正弦半波状の第1波が発生し、その後、わずかな振動状態を呈し、載荷点において約1.5 mmの残留変位が生じている。

次に解析結果に着目すると、軸方向および版厚方向の要素長が小さくなるほど、最大値、残留変位共に大きくなる傾向がある。最大変位に着目すると、載荷点ではいずれの解析ケースにおいても、解析結果が過大評価となるが、変位計測位置が250 mm、500 mm地点では、EL37.5-0.5が実験結果とほぼ同程度の値を示している。また、残留変位に

着目すると、解析ケース・要素長によらず解析結果が過大評価となる。減衰定数を変化させた場合には、載荷点変位の残留成分に若干の差が生じるものの、いずれの解析ケースにおいても同様の波形性状を示している。これは、RC版の押し抜きせん断により、重錘衝突後の第1波以降はほぼ振動状態を呈していないためであると考えられる。

なお、本ケース内では、重錘衝撃力、支点反力および応答変位においてEL37.5-0.5が最も実験結果を再現している。

4.2 ひび割れ分布性状

図-5には、実験結果から得られるひび割れ分布図と数値解析結果から得られる載荷点最大変位時におけるRC版裏面および切断面の第一主応力分布図を示している。図中、赤色の領域(コンクリート要素の第一主応力が-0.001

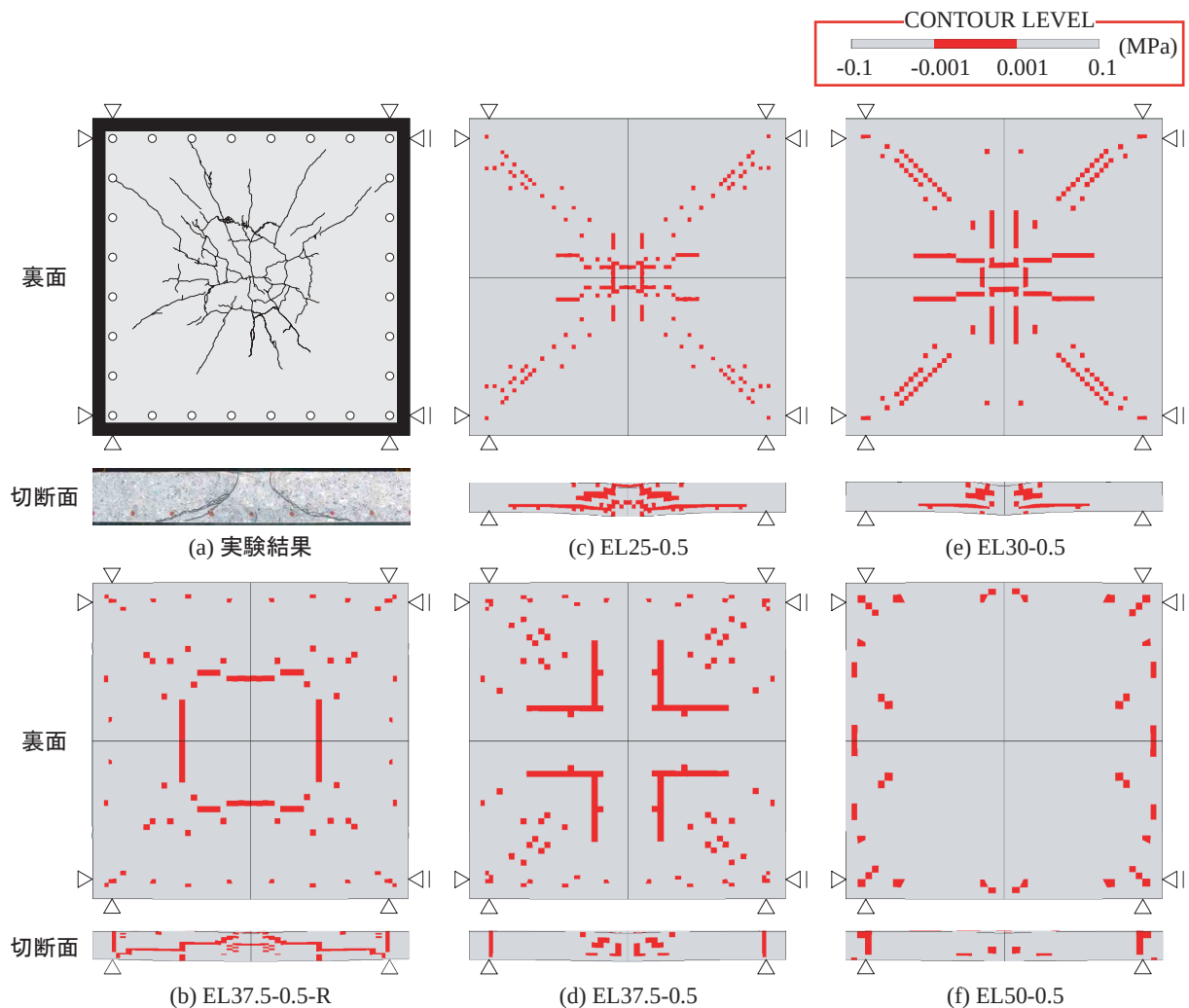


図-5 ひび割れ分布性状

～0.001 MPa の範囲) は応力零近傍要素を示しており、最大変位時において大きな変形を示す領域ではひび割れが発生しているものとして評価することが可能である。なお、ここでは EL25/30/37.5/37.5-R/50-0.5 について記載している。

図-5(a)より、実験結果における RC 版裏面には円形のひび割れ、対角線上にはねじりおよび曲げによるひび割れが発生している。また、切断面には載荷点から裏面に斜めに進展する押し抜きせん断によるひび割れが確認できる。

図-5(b)～(f)より、裏面および切断面において軸方向および版厚方向の要素長が小さくなるほどひび割れが多く発生している様子がわかる。切断面を見ると、載荷点から斜めに進展するひび割れが確認できるが、EL37.5-0.5-R では載荷点から支点到ひび割れが進展している。これは、切断面において要素が長方形となり、ひび割れが水平方向に進展しやすいためであると考えられる。裏面ではいずれの解析ケースにおいても実験結果に見られる円形のひび割れは確認できない。また、EL25/30-0.5 では鉄筋の配筋位置に水平に発生するひび割れが確認できる。

5. まとめ

本研究では、RC 版の押し抜きせん断破壊挙動を適切に再現可能な数値解析手法の確立を目的として、重錘落下衝撃荷重を受ける四辺支持 RC 版のモデル化に関して、軸方

向および版厚方向の要素長を変化させた場合と減衰定数を変化させた場合について数値解析を実施し、実験結果と比較する形で検討を行った。以下に本研究で得られた事項を整理する。

- (1) 軸方向および版厚方向の要素長が小さくなると、剛性が低く評価される傾向にある。
- (2) 押し抜きせん断破壊を適切に再現するためには、軸方向および版厚方向の要素長を同程度にする必要があり、本検討の範囲内では、要素長 37.5 mm が最も実験結果を再現できる。
- (3) 四辺支持 RC 版の数値解析結果において減衰定数はほぼ影響しない。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 安藤 智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 2) 岸 徳光, Abdul Qadir Bhatti, 今野 久志, 岡田 慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 3) John O. Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.6