

開削トンネル擁壁部の地震時挙動及びせん断補強方法

早稲田大学大学院 学生会員 ○山村 賢輔

早稲田大学 教授 フェロー会員 清宮 理

1. 研究目的 兵庫県南部地震以前に建設された地下構造物は、せん断補強鉄筋の量が不十分で、レベル2地震に対してせん断耐力が不足し、耐震性能を満たすことが難しいと指摘されている。この指摘を受けて、開削トンネル擁壁部を対象に、構造物の横断面と周辺地盤を一体とした計算モデルをFEM手法で作成し、材料非線形性を考慮した動的解析を行い、モデル各部の地震時挙動を求める。計算結果から、耐力の照査・破壊モードの算出を行い、せん断破壊を起こす危険性を指摘した。その耐震補強方法として、連続壁構造であることや、内空断面を確保する必要から、これまで上部構造物で行われていた補強方法である、コンクリートの増打ちや、RCや鋼板を巻付けてせん断耐力を向上させることは適用できない。また施工性や経済性の問題から、PCの導入や地盤改良といった補強方法も適さない。そこで本研究では、補強鉄筋埋め込みにより、スターラップを配置させるのと同程度のせん断補強効果が得られると考え、静的載荷実験によりその有効性を検証した。

2. 耐震補強方法の概要 今回の側壁部において提案するせん断補強方法を図1に示す。削孔ドリルにより壁表面から反対側の主鉄筋まで孔をあけ、鋼材を挿入し、その後グラウト注入する工法である。補強鉄筋の定着材として2種類（①樹脂型インジェクション、②モルタルカプセル型）の注入剤を使用する。内側と外側の主鉄筋を、壁の厚さ方向のせん断補強鉄筋挿入で、せん断力による斜めひび割れに耐荷する機構とする。このせん断機構と耐力力を、図2に示す、2点支持2点載荷の装置で静的載荷実験を行い検証する。一般に梁モデルが受ける曲げ力とせん断力はせん断スパン比(a/d)の影響が大きく、せん断力の影響を受ける場合は $a/d=2.0$ 以下とされている。そこで a/d をパラメーターとするせん断補強鉄筋無しの試験体による予備載荷実験を行う。耐力算定式にはせん断スパン比の項を含む岡村式を用いた。

$a/d=1.25, 1.75, 2.25$ の3体製作し静的載荷実験を行ったところ、 $a/d=2.25$ は斜め引張破壊を呈し、ほぼ計算耐力通りの最大荷重となったのに対し、 $a/d=1.75$ ではせん断圧縮破壊と上縁部コンクリートの圧壊が同時に起こり、計算耐力より大きな最大荷重となった。また $a/d=1.75$ でアーチアクションを起こしたことから、 $a/d=1.25$ は十分せん断耐力があると判断した。以上から $a/d=2.25$ を斜め引張破壊の伴うせん断破壊モデルとして、せん断補強方法の検討に用いることにした。

3. 耐力比較試験 前施工の場合せん断補強鉄筋はスターラップとし、両端フックにより定着させているのに対し、後施工の場合は直筋を使用して上側をネジ加工し、プレート板を挟んだナット定着とした。まず補強ピッチ200mmで補強した場合の比較を行った。使用材料については、コンクリートの一軸圧縮強度が 31.3N/mm^2 、主鉄筋径はD32とする。せん断補強鉄筋はSD295のD10で降伏点応力は 370N/mm^2 であった。せん断補強鉄筋の配置、コンクリートの変位計位置、補強鉄筋のひずみゲージ位置は図3に、ひび割れ図を図4に示す。



図1 せん断補強概要



図2 静的載荷実験装置

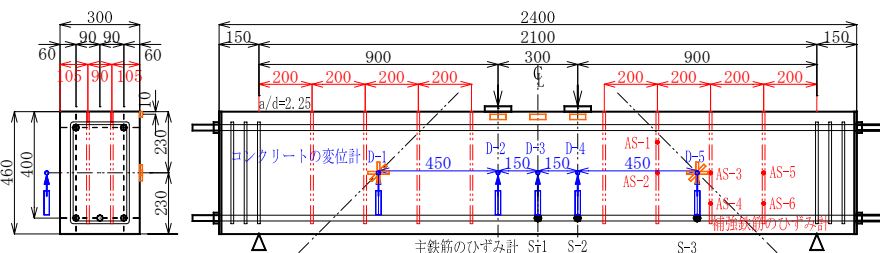


図3 せん断破壊モデル構造図

キーワード 開削トンネル, 静的載荷実験, 補強鉄筋埋め込み, せん断補強

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学理工学部51号館16F-01A 清宮研究室 TEL/FAX03-5286-3852

図5の試験体の荷重－変位関係より、前施工と後施工のせん断補強では、耐力は差が見られないが、その変形性能は前施工の方が大きいことが確認できる。図6のせん断補強鉄筋の最も効果のある位置(AS-2)での荷重－ひずみ関係より、後施工における定着が前施工に比べて定着が不十分で、ひずみがあまり現れなかったことを表している。

本試験の目的はスターラップを前施工した場合と、補強鉄筋埋め込みによる後施工をした場合の、補強効果を比較することである。そのための比較検討項目として、①定着剤（インジェクション、モルタル）、②せん断補強ピッチ(L=175, 200, 300mm)、③補強鉄筋の鉄筋径(D10, D13)、④補強鉄筋の挿入深さ、を考慮した。実験結果を表1に示す。

①②で比較したとき、補強鉄筋径はD10で、実験における最大荷重をせん断耐力とした。設計耐力に対する実測値との割合は最低でも96%あり、岡村式のせん断耐力算定式による設計値をよく表している。また前施工試験体に対して、後施工試験体の最大荷重は最低で85%あり、後施工でせん断補強する場合でも耐力的には大きな低下はないと考える。③についてせん断補強鉄筋にD13を使用した試験体に関して、試験耐力に対する実測値との割合は、前施工の場合で128%、後施工の場合で85%であった。前施工試験体の最大荷重が極端に上がったため、前施工試験体の最大荷重に対する後施工試験体の最大荷重の割合が66%となったと考えられる。実際の構造物においては、補強鉄筋の鉄筋径は断面欠損を伴わない程度の適切なものを選択する必要がある。④については、施工する際に主鉄筋の鉄筋径が大きいことや主鉄筋の位置がずれて建設されていることが原因で、補強鉄筋に十分な定着長が取れない可能性がある。補強鉄筋挿入深さのせん断耐力に与える影響を考慮した実験を行った。補強鉄筋の挿入位置をL=420, 390, 340mmとし、奥側の主鉄筋の位置までと短いもの長いもので比較したが、耐力は予想と逆に低下しなかった。

4. 結論 今回検討した開削トンネル擁壁部の耐震補強方法として、せん断鉄筋埋め込みはその効果において、スターラップによる通常の補強のせん断耐力と同様の耐力向上が見込めた。ただし最大で6割程度にまでせん断耐力が低下する可能性があり、せん断補強鉄筋の本数を増加して補強設計を行う必要がある。これまでせん断補強方法として今回のような異形鉄筋を埋め込むことは、コアコンクリートの拘束効果が得られず効果が少ないためふさわしくないと考えられてきた。しかし実験の結果、版構造ではその拘束効果の耐力に対する影響はわずかであることがわかった。耐力性能よりも変形性能が支配的な地下構造物では、拘束効果の変形性能を確保する必要がある。しかし解析の結果より、破壊モードはせん断破壊が先行しているがせん断耐力の不足分はわずかである。このような場合の補強方法として、補強鉄筋を埋め込むことでその不足分を補うことができるというのが結論である。

参考文献 ・岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，pp. 193, 1984.
・山村賢輔，清宮理，小林亨：開削トンネル擁壁部の地震時挙動及びせん断補強方法，第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp. 225-230, 2002. 2.

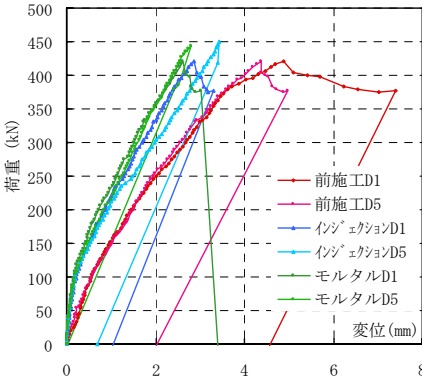
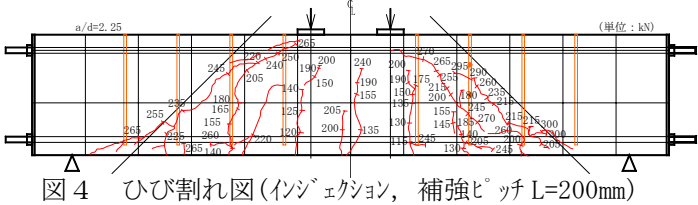


図5 荷重－変位図

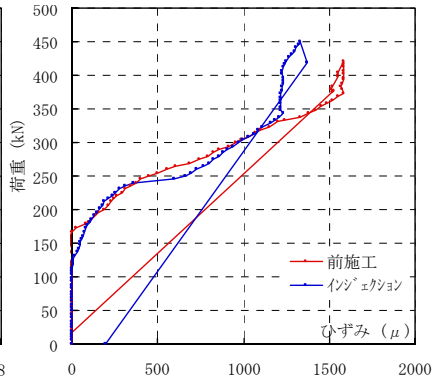


図6 荷重－ひずみ図

表1 耐力比較試験実験結果

試験 ケース	補強方法	補強 ピッチ (mm)	せん断 耐力の 設計値 (kN)	実験の せん断 耐力 (kN)	設計耐力 に対する割 合(%)	後補強 効果(%) = 実験値 / 設計値
	せん断補強材					
NO.1	せん断補強無し	-	246	235	96	-
NO.2	前施工	175	433	495	114	100
NO.3	後施工：インジェクション			421	97	85
NO.4	後施工：モルタル	200	411	469	108	95
NO.5	前施工			421	103	100
NO.6	後施工：インジェクション			451	110	107
NO.7	後施工：モルタル	300	358	444	108	105
NO.8	前施工			353	99	100
NO.9	後施工：インジェクション			353	99	100
NO.10	後施工：モルタル	300	490	335	94	95
NO.11	前施工			627	128	100
NO.12	後施工：インジェクション	200	384	417	85	66
NO.13	前施工			390	106	100
NO.14	後施工：モルタル，L=420			345	90	83
NO.15	後施工：モルタル，L=390			408	106	99
NO.16	後施工：モルタル，L=340			490	128	118