

開削トンネルにおける 合成土留壁隅角部の耐荷力確認実験

大阪建設局建設企画部設計課 袴田文雄
設計課 広瀬鉄夫

要 旨

開削トンネルの側壁を土留壁鋼材と一体化する構造（以下「合成土留壁構造」という。）の場合の隅角部の耐荷力を確認するために、実物の1/2の試験体を作成し、正負繰り返し交番載荷実験を行い、隅角部の鉄筋及びコンクリートの挙動を把握した。

実験に際しては、L1、L2レベルの地震荷重はもとより、主鉄筋の降伏後も載荷を継続し、変形が主鉄筋降伏時の8倍に至って鉄筋が破断するまで載荷することにより本構造がRC構造としての典型的な履歴曲線を示すことを確認した。ひび割れ幅についても地震後も耐久性の観点から供用可能であることが判った。各鉄筋の歪み状況からは、L1、L2レベルの荷重レベルではいずれの鉄筋も降伏に達しなかったことから、今回の実験に用いた試験体は十分過ぎるほどの耐力を有しており、地震後も十分な供用性能を有していることが判った。

キーワード：合成土留壁構造、隅角部耐荷力実験、地震後の供用性能

まえがき

都市高速道路は近年、用地、道路環境上の制約からトンネルで計画される場合が増加している。開削工法で矩形ボックスのトンネルを施工する場合に仮設部材の山留壁としては工費が安く、短い工期で施工可能なソイルセメント柱列壁が多く採用されている。

ソイルセメント柱列壁の鋼材を開削トンネルの鉄筋コンクリート側壁と合成構造とすることが可能となれば、山留壁の鋼材の応力的に余裕のある部分を有効に利用する構造とすることができ、同時に開削施工幅、掘削土量、鉄筋コンクリート量を削減することができる。

阪神高速道路公団では平成10年度から淀川左岸線1期の開削トンネル区間を対象に同構造の検討を開始し、同構造の試設計、確認実験、山留め壁

の芯材建込の試験施工を実施してきた。

このような背景のもとに、平成11年度には合成土留壁検討会（委員長：京都大学 小野紘一教授）を組織し、1年間にわたり合成構造の実現に向けて種々の課題について検討を行った。

これらについて、過年度、金治ら¹⁾や、佐藤、西岡、前川ら²⁾³⁾⁴⁾がその設計概念について報告を行っている。

また、西岡ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾は地震時の合成土留壁の挙動について報告を行っている。

本報告では合成土留壁構造の概要を簡単に再掲し、昨年度行った接合部構造交番載荷試験の結果について報告を行う。

1. 合成土留構造の概要

合成土留壁とは、構造的には山留壁のH型鋼材

とトンネル本体のRC内壁とをスタッドジベルを用いて一体化した合成構造である。設計的には山留壁のソイルセメント部の剛性は無視し、山留壁の鋼材に引張が生じる場合はH鋼のフランジを鉄筋に置き換えて、合成壁を一体のRC構造として考え、応力度照査を行うことを基本とする。図-1にその概要を示す。

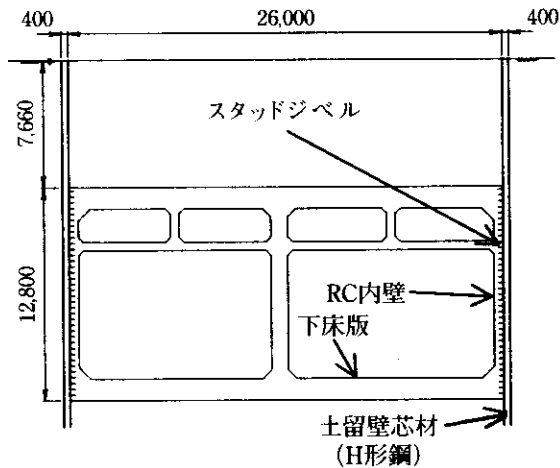


図-1 合成土留壁構造

2. 実験の位置づけおよび目的

平成10年度の実験において合成土留壁一般部を対象とした載荷試験を実施したが、合成土留壁構造の耐震性評価手法の確立のためにはH形鋼と函体上下床版との接合部の耐震性の検討が必要である。そのために本実験は、地震時に正負交番の断面力が発生する合成壁と上下床版のうちより大きな土圧が作用する下床版の接合部に着目し、地震時を想定した正負交番の繰り返し加力を行い、耐荷性状を把握し、接合構造の妥当性確認及び耐震解析（耐震性評価手法）における接合部モデル化のデータをを得ることを目的とした。

3. 実験計画

本実験では下記のフローにより隅角部の交番載荷試験を実施することとした。本実験計画の基本的な流れを図-2のフロー図に示す。

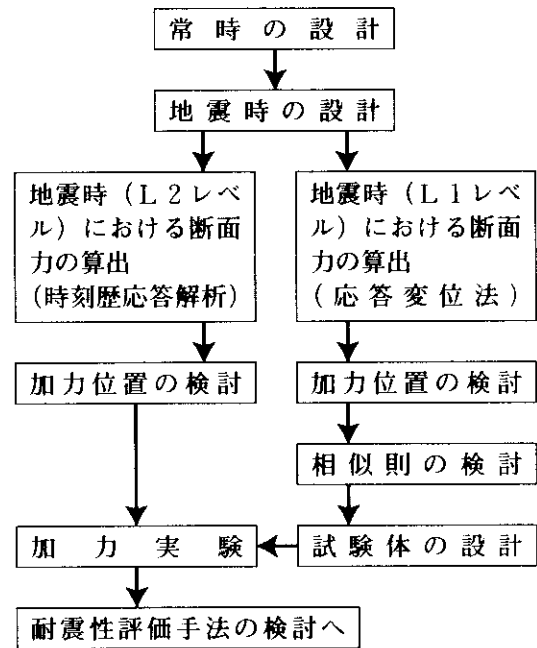


図-2 実験計画フロー

4. 試験体

4-1. 試験体の設計方針

試験体は淀川左岸線の標準的な断面を1/2倍に縮小し、隅角部のみをL字型に切り出して作成した。縮小にあたっては、下記の点に留意した。

- ①コンクリートは、強度に影響の大きい粗骨材の最大寸法を1/2倍に縮小し、10mmのものを使用する。
- ②鉄筋は、鉄筋比を合わせることにする。
- ③H形鋼は、市販品の中から呼び名で1/2倍のものを選定する。
- ④スタッドジベル筋は、1/2倍に縮小できる材料がないので、配置間隔を調整することにより、できる限り鉄筋比を合わせることを基本とする。

構造物全体の挙動を正確に把握するためには、トンネル全体をモデル化し、実際の荷重分布と同様になるような加力を行う必要があるが、本実験は、地震時を想定した正負交番繰り返し荷重が作用した場合の合成壁と下床版の接合構造の耐荷挙動について把握することを主目的としているので、図-3に示すように試験体としてトンネルの一部を切り出した形状のものを使うこととした。

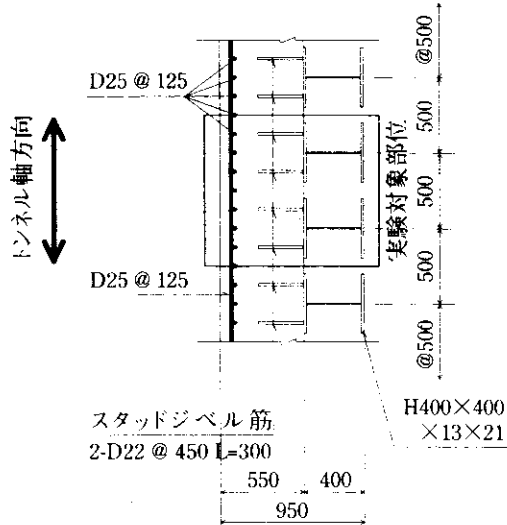


図-3 実験対象部位

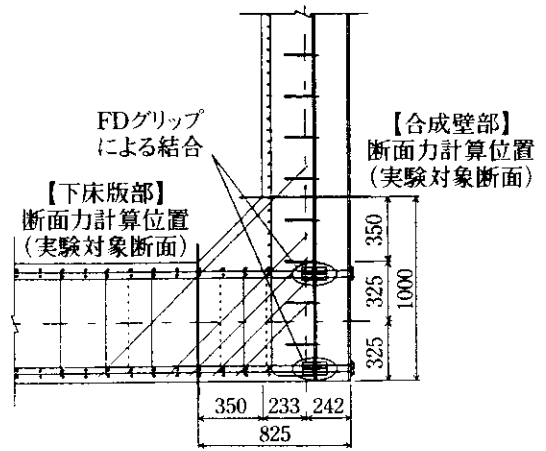
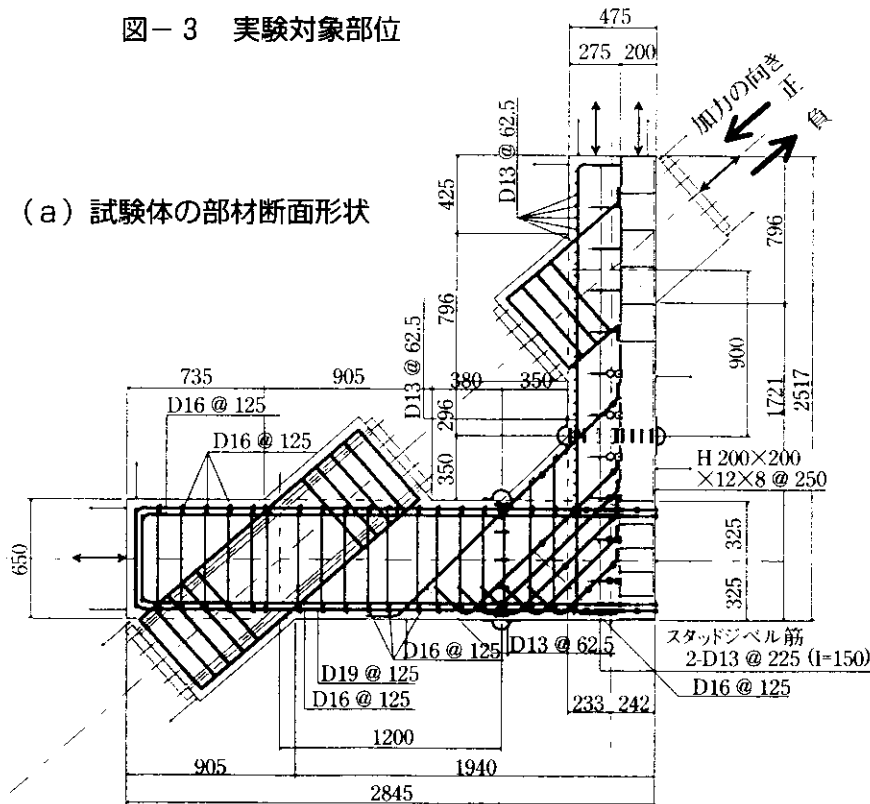


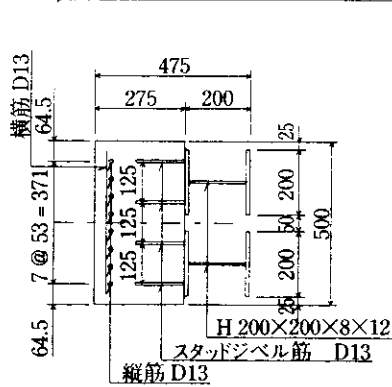
図-4 断面力の計算位置



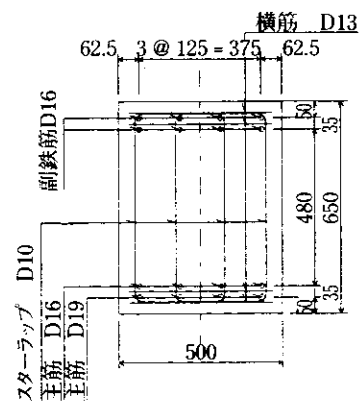
(a) 試験体の部材断面形状

凡例 (図-5(a))

記号	項目
←→	加力荷重
—	加力点の変形量
□	合成部の変形量
~	平均曲率
-	H形鋼のひずみ
•	鉄筋のひずみ
○	ジベル筋のひずみ
□	コンクリートのひずみ



(b) 合成壁部



(c) 下床版部

図-5

4-2. 試験体の設計

試験体は、図-4に示す実験対象断面位置で、実構造物でのL1荷重レベルの応力と等しいような応力を発生できるように形状、及び加力の大きさを決めた。図-5に試験体の断面形状を示す。

しかし、一律に1/2倍の縮小を行っているので、想定した地震時荷重レベル(L1)以外の荷重レベルでは、必ずしも動的解析によって得られた実構

造物の断面力の組み合わせ(M, S, N)を加力することはできない。そこで、他の荷重レベルでは曲げモーメントを合わせるように加力を制御した。

なお図-5(a)には、後述する各種計測装置の配置も併せて示した。コンクリートの物性を表-1に示す。また、鉄筋はSD345、H型鋼はSS400を使用した。

表-1 コンクリートの物性

セメントの種類	普通ポルトランド
呼び強度	30N/mm ²
スランプ	8 cm
粗骨材の最大寸法	10mm

5. 加力実験

加力装置の概要を図-6、写真-1に示す。

常時荷重を越える荷重レベルにおける加力の繰り返し回数は3回とした。加力によって試験体に発生する断面力のイメージを図-7に示す。

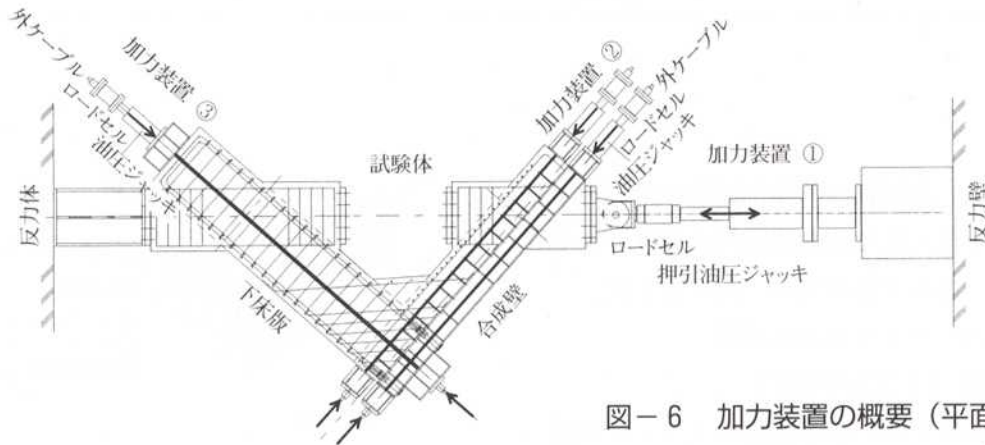


図-6 加力装置の概要(平面図)



写真-1 加力装置設置状況

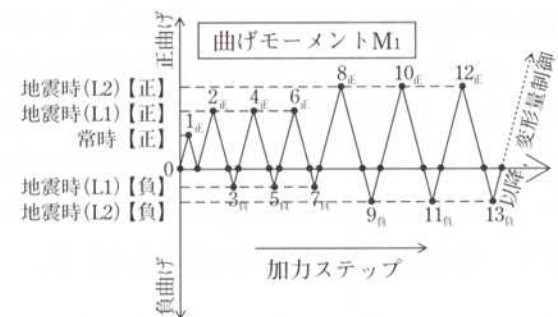


図-7 加力により試験体に発生する断面力のイメージ

6. 計測

計測は、合成壁部、下床版部の実験対象断面における応力、変形量その他、隅角部に配置されたハ

ンチ筋の挙動を確認することを目的とした。

表-2に計測項目を、前述の図-5(a)に計測位置を示す。

表-2 計測項目

計測項目		計測機器	仕様	点数	備考
加力荷重	曲げ, せん断	ロードセル	100tf	1	引張・圧縮型
	軸力(壁部)	ロードセル	30tf	4	圧縮型
	軸力(床部)	ロードセル	50tf	2	
変形量	加力点他	変位計	200mm他	16	
	合成部	変位計	25mm	6	ずれ
		変位計	10mm	6	目開き
平均曲率	実験対象断面	パイ型変位計	PI-2-50	8	
鋼材歪み	H形鋼	歪みゲージ	YFLA-5-5JRT	54	3軸ゲージ
	鉄筋	歪みゲージ	YFLA-5-5JRT	36	1軸ゲージ
	ジベル筋	歪みゲージ	YFLA-5-5JRT	12	1軸ゲージ
コンクリート表面歪み		歪みゲージ	PL-60	9	
計				154	
ひび割れ状況		スクラッチ、クラックゲージ		—	
実験状況		カメラ		2	
		ビデオ		2	

7. 解析

本実験では、各材料は非線形領域まで到達するので、解析手法としては非線形性を考慮できるものを用いた。解析手法は次の2通りとした。

- ①ファイバーモデルによる解析
- ②FEM解析(2次元非線形)

ファイバーモデルによる解析のイメージを図-8に示す。ファイバーモデルとは、対象断面をその軸方向に棒要素、板要素を束ねたものにモデル化し、それらの要素それぞれに剛性を設定できるものであり、FEMより低コスト、低労力で解析が可能な手法である。これらのモデルによる解析値と、実験から得られた値とを比べることにより解析モデル適用の可否を判断することとした。

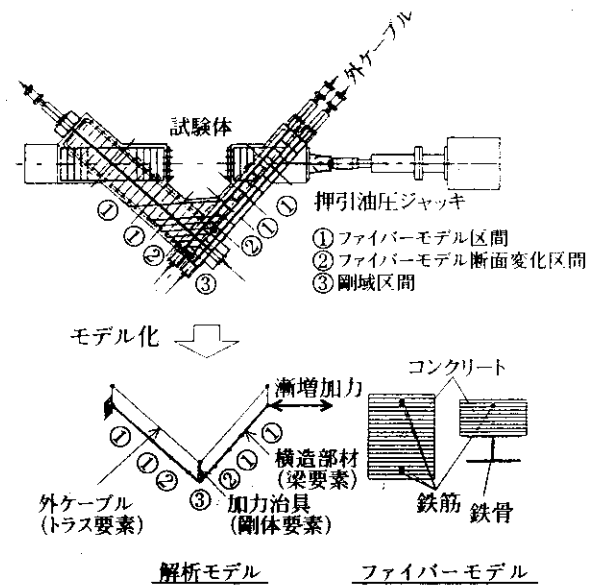


図-8 ファイバーモデルによる解析

8. 実験結果及び考察

8-1. 実験状況, 試験体の破壊状況

最終的な試験体の破壊状況を写真-2に、荷重と加力点変位の関係のグラフを図-9にそれぞれ示す。

試験体は、L1地震時レベルの正曲げ加力中にひび割れが発生し、加力点変位が+1 δy 、-3

δy のときに下床版の主鉄筋、副鉄筋がそれぞれ降伏した(すなわち、主鉄筋降伏時の加力点変位を+1 δy とする)。なお、ここに主鉄筋、副鉄筋とは、それぞれ下床版の下側の2段の軸方向鉄筋、上側の2段の軸方向鉄筋を指す。

主鉄筋・副鉄筋の降伏後は、徐々に剛性が低下し、+4 δy 、-5 δy でそれぞれ正負の最大荷重となった。その後、緩やかな荷重低下を伴いな



写真-2 試験体の破壊状況

から変形が進行し、+6 δy の加力中に圧縮側の

コンクリートの剥離が始まった。

続いて、+8 δy の加力中に、圧縮側の副鉄筋の座屈・コンクリートの剥離により、大きな荷重低下を示した。また、-8 δy の加力中に副鉄筋が破断（破断音確認）して、極度な荷重低下が起こり終局に至った。図-9からわかるように、本構造はRC構造特有の典型的な紡錘形の履歴曲線を示しており、本構造が合成壁（SRC構造）と下床版（RC構造）の接合構造であるにもかかわらず、RC構造特有の挙動を示したことは下床版に対して合成壁が十分過ぎる耐荷力を有しているためであると考えられる。

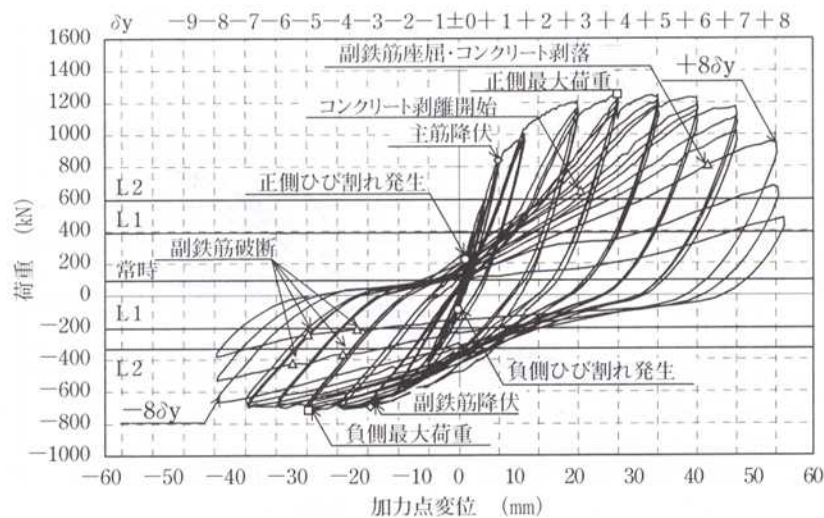


図-9 荷重と加力点変位の関係

8-2. ひび割れ発生状況

各加力ステップにおけるひび割れ発生状況は、±L2地震時レベルの荷重まではひび割れ幅が小さく、それ以降に極端にひび割れ幅が大きくなった。例として図-10に内側隅角部でのひび割れ幅の進行状況を示す。そのひび割れ幅を耐久性からみた許容値⁸⁾と照らし合わせると、概ね±2 δy までは許容値(0.10mm)以下であることが判った。このことから本構造は耐久性を考慮した供用性能という観点からも十分な性能を有していることが判った。

8-3. 解析手法の妥当性について

荷重と加力点変位の実験結果及び解析結果を図-11に示す。図から、ファイバーモデルによる解析結果は、変形を過小評価するものの、耐荷力(降伏点)については十分な精度で計算できることが判った。変形については、固定端の回転バネや、ハンチ部における剛域の取り方などについて検討することにより、更に精度のよい計算が可能になると思われる。2次元FEM解析による解析結果も実験結果をよくシミュレートしていることが判った。

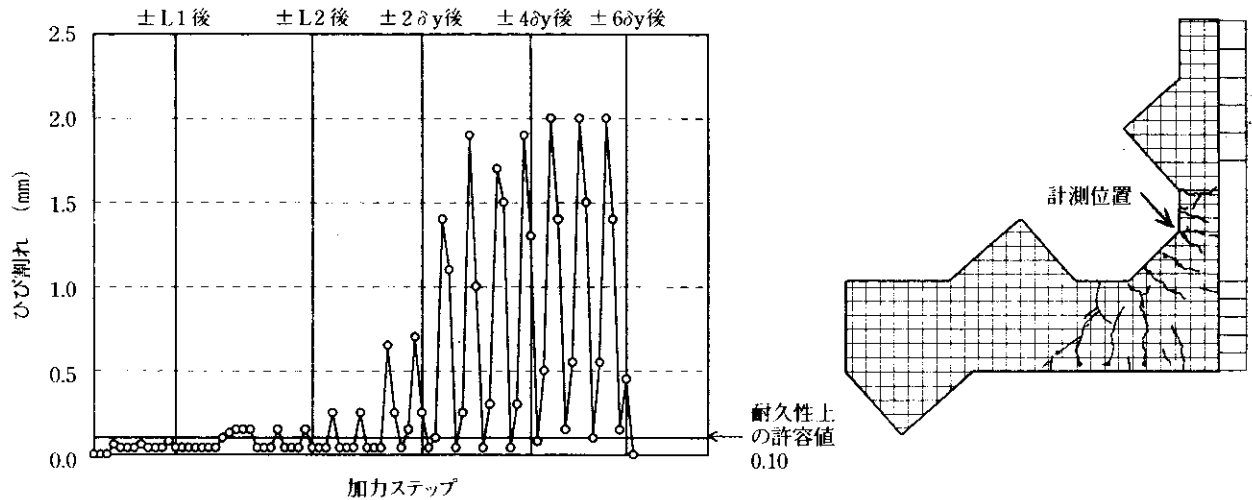


図-10 内側隅角部のひび割れ幅進行状況及びその位置

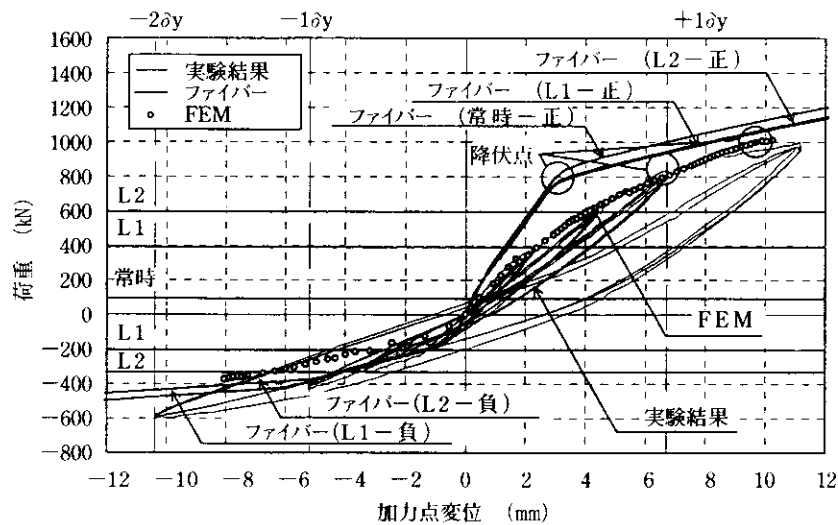


図-11 解析と実験の比較

9. まとめ

今回の実験及び解析により得られた知見を整理すると、次のとおりとなる。

- ・本試験体は、正負交番加力によって下床版の軸方向鉄筋が破断して終局に至ったが、特に脆性的な破壊を示すことはなく、 $\pm 8 \delta y$ の十分な変形性能を有していた。
- ・L1, L2の荷重レベルでは若干ひび割れが発生するが、L2除荷後のひび割れ幅は0.05mm以下であり、耐久性について特に問題のないレベルにとどまったことから、地震後の供用性能の観点から特に問題がないと言える。

- ・ファイバーモデルによる解析は、変形を過小評価するものの、耐荷力については十分な精度で計算できることが判った。
- ・2次元FEM解析により、合成土留壁と下床版の接合部の構造を精度良くシミュレーションできることが判った。

10. 今後の課題

平成10年度に行った一般部での実験及び今回行った隅角部の実験により、合成土留壁構造は鉄筋コンクリート構造物として設計可能であり、かつ地震時の耐震性も有していることがわかった。し

かし、実施に当たっては防水の問題、躯体中央部のたわみの影響検討とその対策、隅角部の配筋方法、H形鋼と床版の接合構造、土留壁鋼材の建込精度などの問題が残されており、今後更なる検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 金治, 前川, 佐藤: 開削トンネルにおける合成土留壁構造の設計概念と合成効果確認実験, 阪神高速道路公団技報第18号, 平成12年6月
- 2) 佐藤, 中村, 金治: 連続等厚土留壁の芯材と開削トンネル側壁の合成構造に関する実験, 第11回日本道路会議一般論文集 (B), 4051, pp. 188-189, 平成11年
- 3) KANAJI, SUDA, ONO, " Feasibility—Study of a Proposed Cut and Cover Tunnel Structure Applying Steel—R/C Composite Wall", Proceedings of 6th ASCCS Conference, Vol.1 pp.189-196, March, 2000
- 4) 佐藤, 青木, 丸岡, 加倉井: ソイルセメント柱列壁の鋼材を用いた合成地下壁工法, 基礎工, 平成6年5月号pp.49-55
- 5) NISHIOKA, MAEKAWA, " Seismic Study on a Cut and Cover Tunnel with Composite Walls", 10th Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA) Conference, September, 2000
- 6) 前川, 西岡, 古市: 土留壁を本体利用した開削トンネルの隅角部耐荷力試験, 第55回土木学会年次学術講演会, 発表番号V-611, 平成12年
- 7) 塩崎, 西岡, 前川, 齋藤, 砂坂: 土留壁を本体利用した開削トンネルの地震時挙動について, 第55回土木学会年次学術講演会, 発表番号I-B485, 平成12年
- 8) 日本コンクリート工学協会, コンクリートのひびわれ調査, 補修・補強指針 付: ひびわれの調査と補修・補強事例

Experiment to test corner strength of earth-retaining walls with integrated steel in cut and cover tunnel construction.

Fumio Hakamata, Tetuo Hirose

We carried out an alternate loading experiment to test the corner strength of the opening of a cut and cover tunnel that had side walls consisting of earth-retaining walls with integrated steel (referred to hereafter as composite earth-retaining wall). In the experiment, to investigate the behaviour of the both the concrete and steel reinforcement in the corner, we constructed a half-scale test piece and subjected it to repeated positive and minus loading.

During the actual test procedures, starting L1 and L2, we applied incremental levels of seismic loading and repeated this until the structure fractured when L8, that is eight times the original level, was reached. We confirmed that the hysteretic curves displayed by the test piece were typical of an RC (reinforced concrete) structure. Observation of the width of the cracks also suggested that this type of structure would remain serviceable after an earthquake. Judging from the distortion of the of the reinforcements, none yielded at loading levels L1 or L2. We concluded that this type of structure is adequate to the current situation and would remain serviceable after an earthquake.

Keywords: composite earth-retaining wall, actual corner loading capacity, post-earthquake serviceability.