

側壁合成トンネルの設計法向上

神戸管理部 調査設計グループ 中島 隆
大阪建設部 工事企画グループ 溝渕修治
(財) 阪神高速道路管理技術センター 技術部開発研究課 金治英貞

.....

要 旨

側壁合成トンネルは、土留め壁における高剛性のH鋼を有効利用した開削トンネル構造であり、掘削土量、コンクリートおよび鉄筋数量の低減を可能とすることからコスト縮減は勿論のこと事業用地縮減、環境負荷低減にも寄与する構造である。今回、淀川左岸線における断面を対象に弾塑性FEM解析を行い、側壁合成トンネルの地震時を含めた限界状態を把握し、最新の知見をもとに設計施工手引きを更新した。ここでは、既存の実験結果をもとに接合部の設計手法をFEM解析により検証しており、結果として、接続鉄筋、スタッドの削減が可能であることを確認するとともに、設計手法として二重梁モデルが採用できることを示した。

キーワード:開削トンネル、土留本体利用、FEM弾塑性解析、二重梁モデル解析、コスト縮減

はじめに

側壁合成トンネルとは、開削トンネルで仮設土留壁として使用される柱列式地中連続壁の芯材(H鋼)を、スタッド等で函体の側壁と一体化させ、側壁のコンクリート厚を低減した構造である(図-1)。大阪建設部では、平成10年度から淀川左岸線1期を対象として実験、研究を積み重ねてきており、その成果を報告するとともに^{1)~6)}、合成土留壁設計・施工要領(案)(以下「要領」と称す)としてまとめている⁷⁾⁸⁾。これらの取り組みは、土木構造物において我が国でも最初のものであったが、近年、東京電力、NEXCO、民間企業等において技術開発が進んでいる状況にある。

これまでの要領における設計方法は、H鋼を鉄筋に置き換えたRC部材として設計を行う完全一体壁モデルによる弾性解析であった。しかし、前述の実構造物への適用に伴い、日本トンネル技術協会からH鋼とRC側壁の断面力を別々に求める

ことができる設計手法⁹⁾が提案されるとともに、弾塑性まで拡大する場合には二重梁モデルによる弾塑性解析法も提案されている。さらに、既往の隅角部実験において、接合構造の合理化の余地が残されていることがわかってきた。

本論文では、これらの背景を踏まえて、既往実験に基づき、接合鉄筋やスタッドの削減を目指したFEM弾塑性解析を実施するとともに、実用的な二重梁モデルの適用性について検討した。

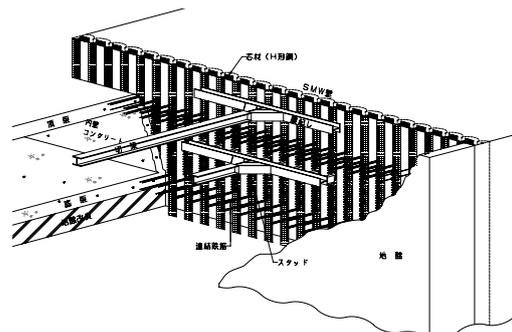


図-1 側壁合成構造(イメージ)

1. FEM弾塑性解析の目的及びフロー

図-2に示すような流れにより検討を行った。まず既往の隅角部試験体の実験結果²⁾と、それをモデル化した弾塑性FEM解析の結果を対比・検証することにより、FEM解析の妥当性を検証すると共に、コスト縮減に繋がる合理化案の検討を行った。次に、モデルを全断面に拡大して弾塑性FEM解析を行い、合理化案適用時の地震時を含めた限界状態を把握し、構造全体の性能を検証すると共に、二重梁モデルでの試算結果と比較した。

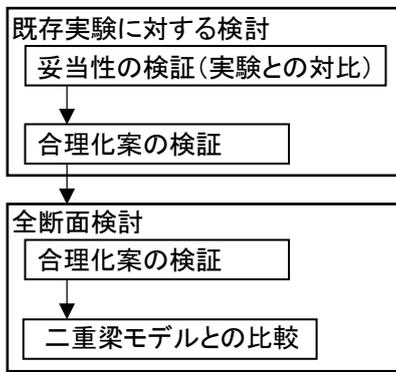


図-2 検討の流れ

2. 既存実験（隅角部試験体）に対する弾塑性FEM解析

2-1 目的及び検討ケース

まず弾塑性FEM解析の妥当性を検証し、次に合理化案としてスタッド・連結鉄筋量を低減したモデルを作成しその影響や、隅角部補強筋（ハンチ鉄筋も含む）の無溶接化による影響を把握することを目的とした。

検討ケースは以下に示すとおりである。Case1は既往試験の再現モデルであり、Case-2~4は、合理化案をモデル化したものである。

Case1: コンクリートと定着鉄筋（連結鉄筋及び隅角部補強筋）の接合をバネ要素として考慮

Case2: Case1 からスタッドを半減→スタッドの非線形特性を変更（バネを1/2）

Case3: Case1 から定着鉄筋を半減（バネを1/2）

Case4: Case2+Case3 及び隅角部補強筋の無溶接化（バネ要素を切断）

2-2 モデル化

既往実験の試験体(図-3)をモデル化した。ハンチ部は定ひずみ三角形平面応力要素、H鋼は4節点四角形アイソパラメトリック要素とした。

コンクリートは圧縮軟化塑性及び引張軟化を考慮した。またスタッド、接合鉄筋のせん断、軸非線形バネについては、文献⁹⁾¹⁰⁾から図-4, 5のように設定した。

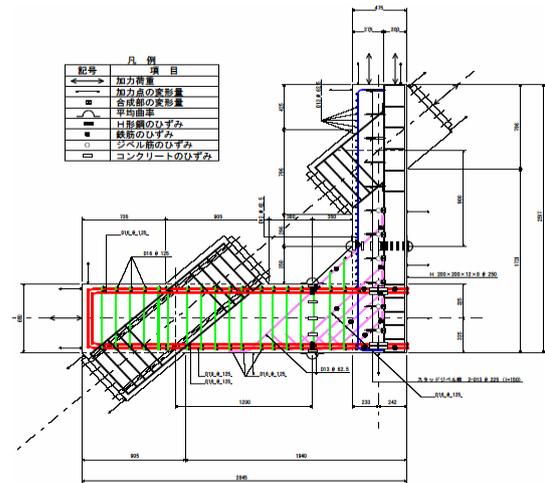


図-3 既往実験の試験体

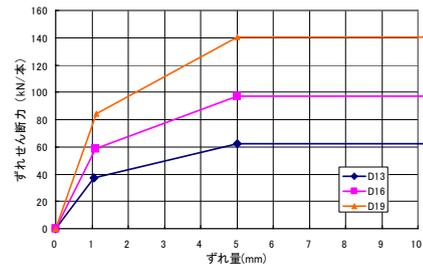


図-4 スタッド、接合鉄筋のせん断非線形モデル

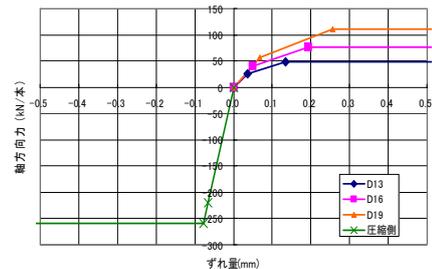


図-5 スタッド、接合鉄筋の軸非線形モデル

2-3 妥当性の検証及び解析結果

解析の結果、Case1～Case1の違いはほとんど見られなかった。以下の報告については、主にCase1及びCase4の結果について述べる。

(1) 荷重と加力点変位の関係

解析結果を図-6及び表-1に示す。過去に実施されているFEM解析では、加力点変位が正曲げで10mm程度、負曲げで4mm程度までしか再現できなかったが、今回の解析ではコンクリートの圧縮・引張軟化をモデル化したことにより、正曲げの加力点変位が27mm程度(4 δ y)まで、負曲げの場合が-27mm(-5 δ y)までほぼ再現できた。また、スタッドおよび接合鉄筋を半減したCase4の最大耐力および変位は、試験体の実験値及びCase1の値とほとんど差異が見られなかった。

表-1 最大耐力(kN)

	正加力		負加力	
	実験	解析	実験	解析
Case1	1248	1235	-717	-758
Case2	—	1235	—	-796
Case3	—	1229	—	-709
Case4	—	1227	—	-791

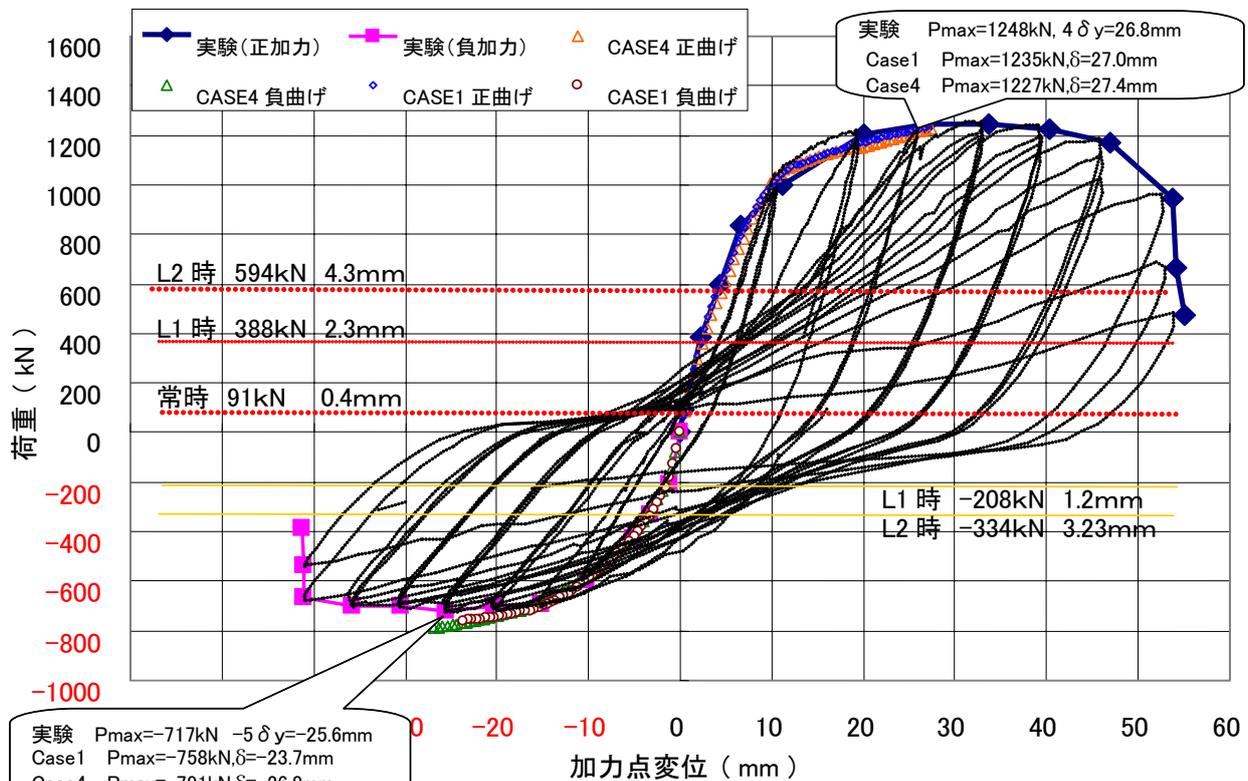


図-6 荷重—加力点変位関係図

(2) スタッド及び接合鉄筋のせん断ずれ, 目開き

スタッドおよび接合鉄筋のせん断ずれ量および目開き量の分布を図-7～9に示す。図-7のCase4におけるスタッドのせん断ずれ量は、最大が0.5mm程度で(短期許容せん断ずれ量1mmの半分)、Case1とほぼ同程度であった、また、最大目開き量は0.6mm程度となり、降伏目開き0.13mmを越えるが、終局目開き量30mmに対しては十分余裕があるため全体系の変形性能には影響を与えていないと考えられる。

図-8の接合鉄筋の軸方向目開き量は、Case1ではハンチ鉄筋および隅角部補強鉄筋の1段目の目開き量が降伏目開き量を超えていたが、Case4では溶接を省略したために、この応力が開放され、接合鉄筋の目開き量は0.10mmから0.163mmと増加するが、降伏目開き量0.192mmに至らなかった。

また、図-9の接合鉄筋のせん断ずれ量についても、Case1ではハンチ筋が短期許容せん断ずれ量程度であったが、Case4では溶接を省略したために開放され、Case4の接合鉄筋のせん断ずれ量が0.2mmから0.4mmと増加するが、短期許容せん断ずれ量1mmに至らなかった。

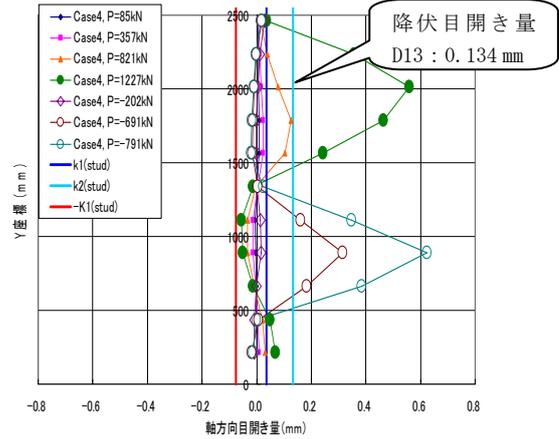
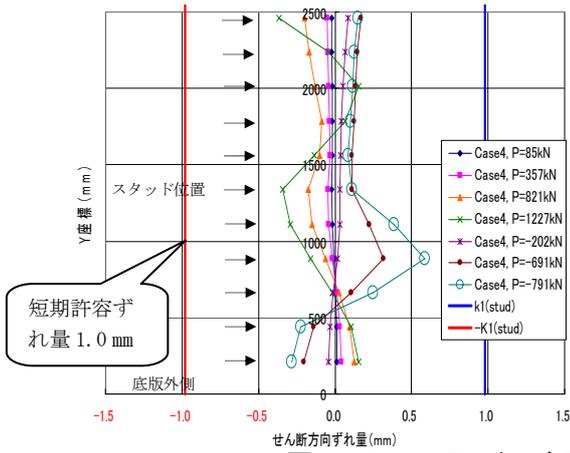


図-7 Case4 のスタッドのせん断ずれ量(左)と目開き量分布(右)

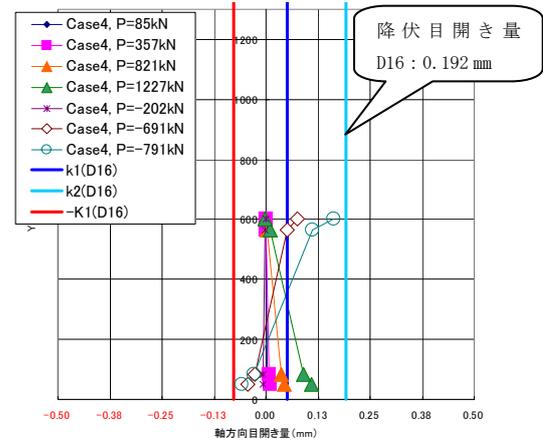
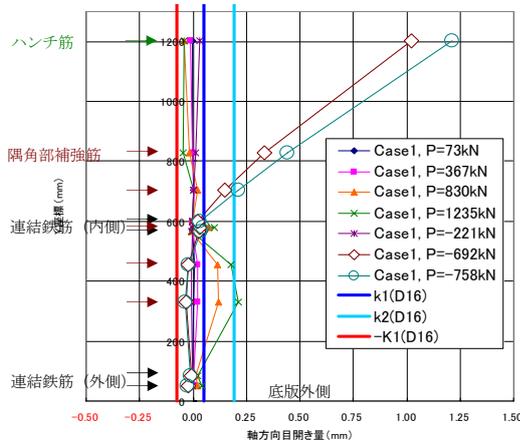


図-8 Case1 と Case4 における接合鉄筋の目開き量分布の比較

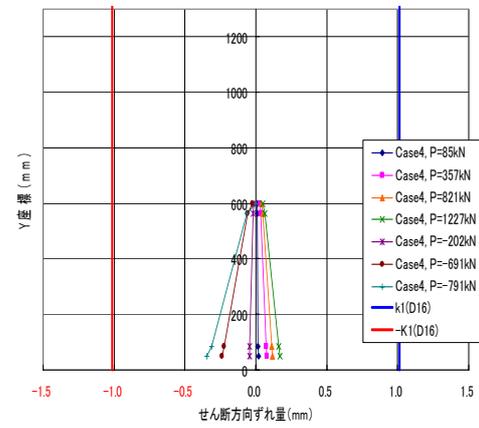
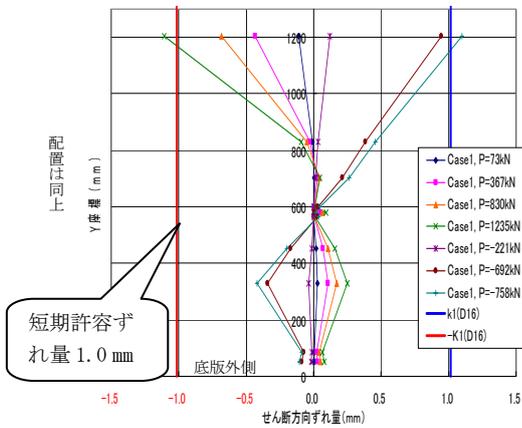


図-9 Case1 と Case4 における接合鉄筋のせん断ずれ量分布比較

以上より、スタッドと接合主鉄筋を半減し、ハンチ筋および隅角部補強鉄筋の溶接を省略しても、構造全体の耐力および変形性能を維持することが確認された。

3. 全断面弾塑性 FEM 解析

3-1 目的及び検討ケース

解析モデルを構造全体系に拡大して弾塑性 FEM 解析を行い、合理化案適用時の地震時を含めた限界状態を把握し、構造全体としての性能を検証することを目的とした。

本報告では、従来の構造細目に従って設計した側壁合成構造の原案と、合理化案の 2 ケースの結果を報告する。(表-2, 図-10 参照)

表-2 原案及び合理化案の概要

	原案	合理化案
連結鉄筋	頂版外2-D32@300 内 D32@300 底版外2-D32@300 内 D32@300 L=4000 (塑性化を考慮)	頂版外2-D32@300 内 D32@600 底版外2-D32@600 内 D32@600 L=40D=1300 (重ね長)
スタッド	異形鉄筋スタッド 2-D25@250	頭付きスタッド 2-D16@250
ハンチ筋 隅角部補強筋	H形鋼に溶接	H形鋼に無溶接
防水工	シート防水	シート防水

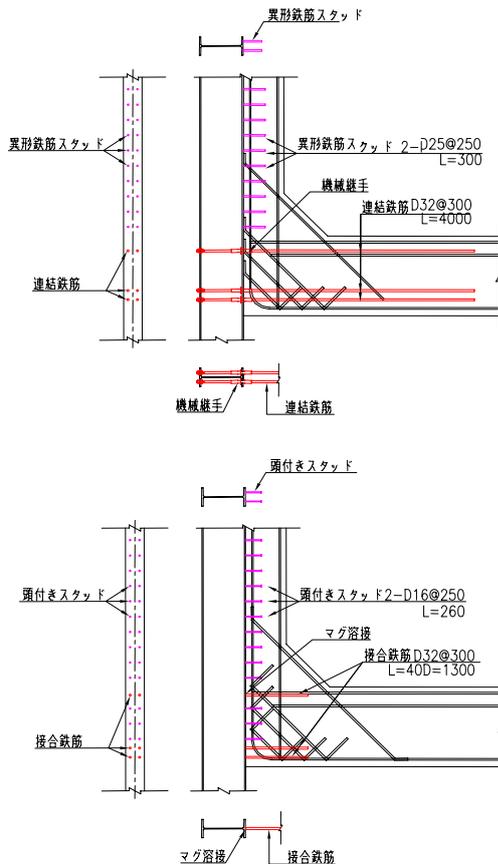


図-10 原案(上), 合理化案(下) 構造比較図

3-2 モデル化

隅角部モデルをベースとしそれを開削トンネル全断面に拡大した。検討断面には淀川左岸線1期の断面を用いた。

3-3 解析結果

(1) 荷重ファクター- α - 層間変形角 θ 曲線

荷重ファクター- α (L2 地震時を1倍とし終局まで増加) と層間変形角 θ 及び壁の相対変位 δ との

関係を図-11 に示す。また、損傷過程の比較を図-12 に示す。これらの図から、下記のことが確認できた。

a) 塑性化状態

原案, 合理化案とも $\alpha=0.6$ 付近で中壁頂版ハンチ始点から発生し, 相対変位は $1 \delta y=37 \text{ mm}$ ($\theta y=0.36\%$) 程度であった。その後 $\alpha=1.6$ 付近で, 側壁部, 頂版など7ヶ所が塑性化し, 終局状態に達した。

b) 変形性能

合理化案はスタッド半減により, 重ね梁的傾向で合成壁の剛性がやや小さくなるため, 中壁の地震時荷重の分担が大きくなり, 原案よりやや早めに降伏するが, 変形能力は増加している。最終耐力はほぼ同等であった。

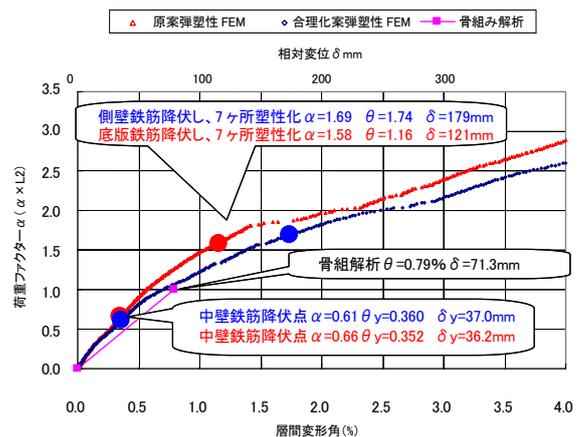


図-11 荷重ファクター- α - 層間変形角 θ 関係図

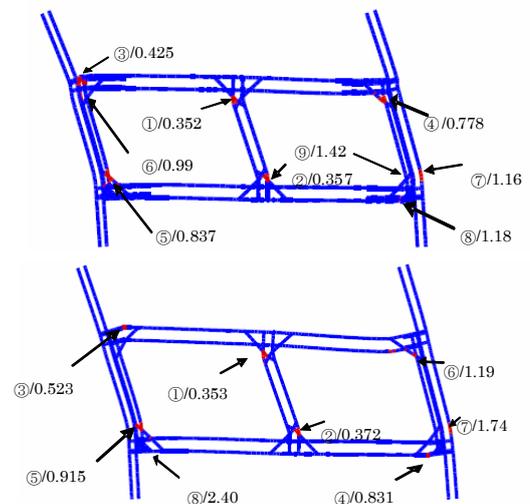


図-12 損傷過程の比較 上:原案 下:合理化案 (○数字:降伏順序/層間変形角 θ を示す)

(2) 常時, 地震時(L2)の応力, ひずみ

各状態における鉄筋およびコンクリートのひずみを表-3に示す. 解析の結果, 以下のことが確認できた.

表-3 鉄筋及びコンクリートのひずみ(最大値)

		原案	合理化案
常時	鉄筋	1.4×10^{-4}	1.6×10^{-4}
	コンクリート		
	圧縮	4.1×10^{-5}	5.8×10^{-5}
	引張	1.7×10^{-4}	1.9×10^{-4}
地震時(L2)	鉄筋	2.0×10^{-3}	2.7×10^{-2}
	コンクリート		
	圧縮	4.3×10^{-3}	6.7×10^{-3}
	引張	2.2×10^{-2}	3.1×10^{-2}

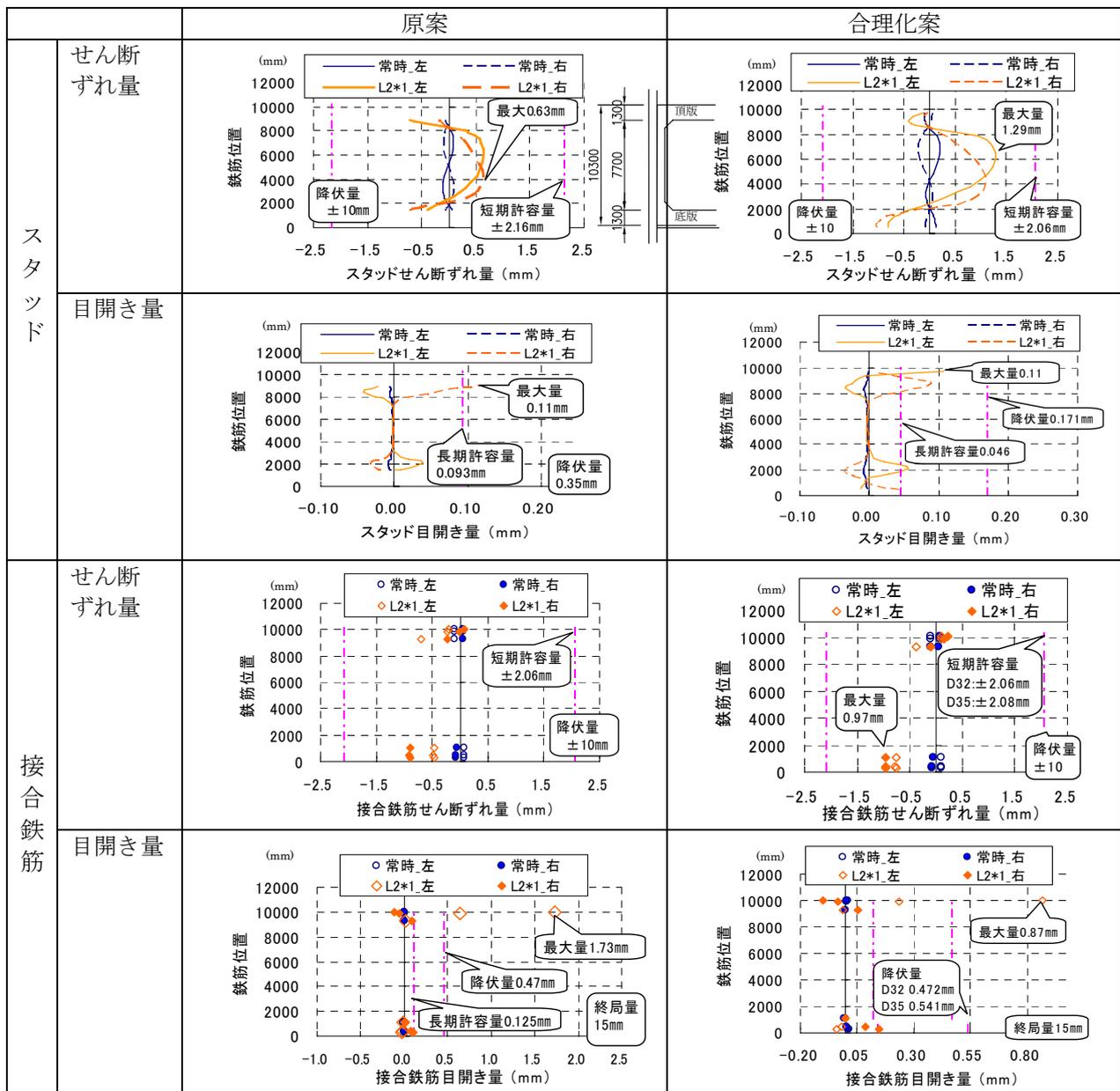
a)常時における鉄筋, コンクリートの応力

合理化案の鉄筋の応力度は底版中壁下の外側が最大 $\sigma_{st}=31N/mm^2$, コンクリートの最大圧縮応力度は $\sigma_c=9.5N/mm^2$ となり, 原案($\sigma_{st}=27N/mm^2$, $\sigma_c=9.7N/mm^2$)とほぼ同じ傾向であった.

b)常時, L2地震動時における鉄筋, コンクリートのひずみ

常時及びL2地震動時において, ひずみレベルは原案, 合理化案ともほぼ同等であった. また両案とも中壁上下端ハンチ始点部主筋および, 頂版上主筋が降伏点に達し, 3箇所が塑性化していた.

表-4 スタッド, 接合鉄筋の比較



(3) スタッド, 接合鉄筋

スタッド, 接合鉄筋のずれせん断, 目開き量を表-4 に示す. なお, 表中の右・左の表示は左右の壁を意味する. 以下に, 主な結果を述べる.

- ・スタッドのせん断ずれ量, 目開き量は, 常時は許容値内で問題無かった. L2 地震時においては, 合理化案の方が増加しているが, 降伏には至っておらず, 十分に余裕があった.
- ・接合鉄筋のせん断ずれ量は, 原案, 合理化案ともほぼ同一の値で降伏には至っていない. また, 目開き量は, 合理化案の方が小さく, 頂板上側を除き降伏していなかった.

4. 二重梁モデルによる試算結果

原案を二重梁モデルによる方法¹¹⁾¹²⁾で試算した結果を図-13, 14 に示す. 図-13 より, 二重梁モデルは, コンクリートの引張剛性を無視しているた

め, 層間変形角 θ が他の解析方法より大きめとなるが, L2 レベルまでなら大きな差異はなく, ほぼ FEM 解析を再現していることが確認された. また, スタッドおよび接合鉄筋の L2 地震動時のせん断ずれ量は短期許容値以内となり, 目開き量は上部で降伏目開き量をやや超えるが, その他は降伏目開き量以内と, FEM 解析とほぼ同等な傾向を示しており, 二重梁モデルの妥当性が確認出来た.

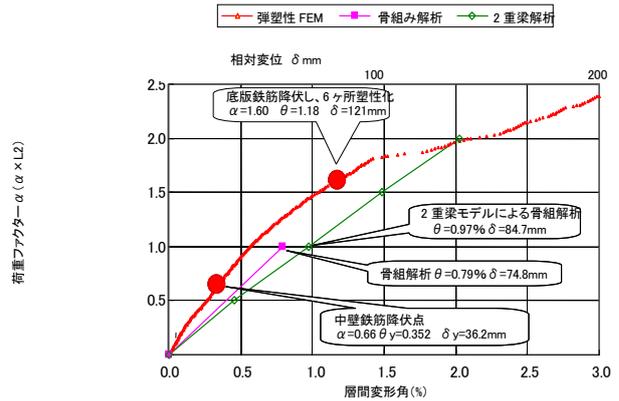


図-13 荷重係数 α - 層間変形角 θ 関係図

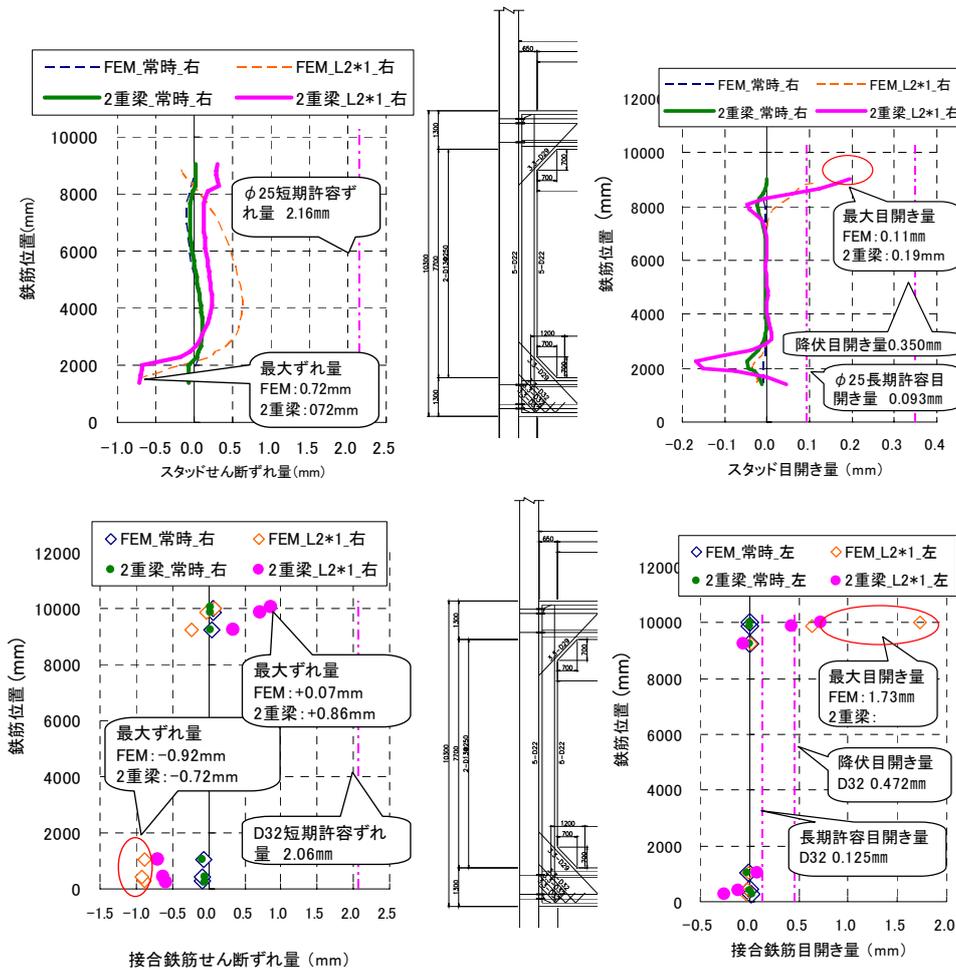


図-14 二重梁と弾塑性 FEM の比較

5. まとめ

本論文では、既存の実験結果をもとに淀川左岸線の側壁合成トンネルを対象に FEM 解析を実施し、合理化構造を検討した。得られた結論は下記のとおりである。

- 1) 合理化構造の崩壊メカニズムと変形性能に関して、構造系全体の塑性化は中壁から発生し、原案とほぼ同等の変形性能を有する。
- 2) 合理化構造の耐力についても、原案とほぼ同等の最終耐力を有する。ただし、スタッド量の半減により、中壁はやや早めに降伏する。
- 3) 合理化構造のスタッドおよび接合鉄筋におけるずれ量、目開き量は増加するが、設計荷重では頂板上側接合鉄筋を除き、降伏しない。
- 4) 合理的設計を可能とする二重梁モデルによる方法は、FEM 弾塑性解析とほぼ同等な傾向を示し、本モデルによる設計法は妥当である。

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 18 号, p18-25, 2000.6
- 2) 袴田, 広瀬: 開削トンネルにおける合成土留壁隅角部の耐力確認実験, 阪神高速道路公団技報 19 号, p12-19, 2001.2
- 3) 橋本, 毛利, 伊藤: 開削トンネルにおける土留壁本体利用について, 阪神高速道路公団第 35 回技術研究発表会論文集
- 4) 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
- 5) 塩崎, 西岡, 前川, 斎藤, 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
- 6) 金治, 中島, 尾関: 側壁合成トンネルの変遷とコスト分析, 阪神高速道路公団第 37 回技術研究発表会論文集
- 7) 阪神高速道路公団: 合成土留壁設計・施工要領(案), H12.10
- 8) 阪神高速道路公団: 合成土留壁設計・施工要領(案), H16.3
- 9) 吉武, 前, 小川, 磯田, 山野: 土留め壁の H 形鋼芯材を用いた合成壁のシアコネクタに関する押抜き試験, 構造工学論文集 Vol. 51A, 2005.4.4
- 10) 社団法人日本トンネル技術協会: “H 形鋼を芯材とする土留め壁本体利用の設計手引き”, 2002.7
- 11) 小川, 前, 吉武, 河野: 土留め壁の H 形鋼芯材を用いた合成壁の構造解析方法, 土木学会第 58 回年次学術講演会
- 12) 田中, 小川, 吉武, 前: 土留め壁の芯材を本体利用した隅角部を有する合成壁の構造解析方法, 土木学会第 59 回年次学術講演会

DESIGN IMPROVEMENTS OF A CUT AND COVER TUNNEL WITH HYBRID WALLS

Takashi NAKASHIMA, Shuuji MIZOBUCHI and Hidesada KANAJI

A cut and cover tunnel with hybrid walls using high rigidity steels of temporary walls was developed as a way to minimize construction cost, required right-of-way and environmental burden. Elasto-plastic FEM analysis was carried out on the Hanshin Expressway Yodogawa Sagan Route to evaluate limit state of the hybrid walls under seismic load. Design improvements were made based on the new findings and reflected in the revised design and construction manual. The FEM analyses with varied parameters of connection rebars and studs verified that these members may be reduced safely and proved the applicability of the double beam model consisting of H-shaped steel beam and reinforcement concrete.

中島 隆



阪神高速道路株式会社

神戸管理部 調査設計グループ
Takashi Nakashima

溝渕 修治



阪神高速道路株式会社

大阪建設部 工事企画グループ
Shuuji Mizobuchi

金治 英貞



(財) 阪神高速道路管理技術センター

技術部 開発研究課
Hidesada Kanaji