

1. DLW地中連続壁壁間継手の設計について

Design of Vertical Joints for Diaphragm Long Wall Construction System

佐藤 尚隆* 西山 良仁*
内井 栄二*²

要 旨

低コスト化を図るために、地中連続壁のエレメント間の継手として二種類の壁間剛接継手と一種類の壁間鉛直継手を開発した。それぞれ異なる構造性能を有しており、使用用途によって使い分けることを意図している。壁間剛接継手のうち有孔補強鋼板で補強したものは、従来の壁間剛接継手と比較して面外方向の外力に対する構造性能が優れており、開発の主たる成果物として位置づけている。本報では、この新しい壁間剛接継手の構造的な優位性を、従来のものと比較して明確にするとともに、実設計で新しい壁間剛接継手を適用する場合に参考となるケーススタディを示す。

キーワード：地中連続壁／壁間剛接継手／有孔補強鋼板／面外

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造（以下、RC造とする）地中連続壁は、経済性の面から仮設山留め壁として使用される例が多くなっているだけでなく、本体構造物の構造外壁として利用される。地中連続壁を本体構造物として利用するためには、地震時に面内に生じるせん断力に抵抗する耐震壁としての機能と、上部構造物を支持する杭としての機能の他に、土圧・水圧に抵抗する耐力の大きい二方向版耐側圧壁としての機能を合わせ持つことが重要である。

RC造地中連続壁はエレメントと呼ばれる壁体要素が集まって一つの壁体を構成する。各エレメント間の応力の伝達は、鉛直方向の打ち継ぎ面を介して行われる。もし、この応力の伝達が行えなければ、壁体は一体とはならず、各エレメント毎にその鉛直方向の剛性のみで外力に抵抗する一方向版となり、鉛直・水平両方向の剛性を抵抗要素とする二方向版に比べて不経済となる。したがって、地中連続壁を二方向版耐側圧壁として機能させるためには、応力の伝達を確実に行える壁間剛接継手の耐力と剛性とを地中連続壁一般部分と同等かそれ以上に近づけなければならない。

施工上、地中連続壁の剛接継手部の壁筋は、重ね継手によって接続される。上部構造の場合、重ね継手部分は、補強筋等を配して補強することで性能を確保しているが、地中連続壁の場合は、エレメントごとに地上で配筋され鉄筋籠の状態にして、掘削溝に満たされた泥水中に配置

されるため、補強することができない。そのため、既開発の地中連続壁工法では、壁間剛接継手の補強方法が他工法との差別化を図るための開発要因として様々な形で提案されている。本DLW工法でも、使用用途や要求される性能に応じて使い分けできるように、PP型壁間剛接継手（以下、PP型継手とする）、FP型壁間剛接継手（以下、FP型継手とする）と壁間鉛直継手の三種類の継手を開発した。PP型継手は孔の開いた薄肉鋼板（以下、有孔補強鋼板）を用いることで、面外曲げおよび面外せん断性能において高い耐力を有するようにしたものである。一方、FP型継手は従来の構造性能を有する継手として位置づけている。各継手の性能については各種構造実験を通じて確認し、設計式を提案した。

本報では、3種類の継手を使い分ける合理的な設計を実施するために差別化を図ったPP型継手の補強機構の説明を述べ、FP型継手との面外方向の構造性能の違いを明らかにするとともに、地中連続壁にPP型継手を用いる場合の有効性について述べる。

2. 有孔補強鋼板と壁間継手の種類

図-1に有孔補強鋼板の詳細を示す。先行エレメントと後行エレメントの間の仕切鋼板の両端部に直交して取り付けており、コンクリートを密実に打設できるように図のような孔をあけている。コンクリートの設計かぶり厚さは80mmである。

図-2に壁間継手の種類を示す。基本的には壁間剛接

*建築構造研究室 *²建築工法研究室

継手は壁体に生じた面内せん断力、面外せん断力と面外モーメントを壁体エレメント相互に伝達する働きを持っている。FP型継手は、その機能を十分に果たすことのできる従来型の剛接継手であるが、面外力特に面外モーメントが大きな位置では、付着割裂破壊する心配がある。その付着割裂破壊を防止するために有孔補強鋼板を設けた継手がPP型継手である。フランジプレート代わりに、有孔補強鋼板を設けた以外はFP型継手と差異はない。

一方、壁間鉛直継手は面内せん断力だけを伝達する。したがって、その役目をするコッターアングルのみを残し、くし型筋と壁筋の重ね継手長さを $40d$ から $20d$ (d は壁筋の公称径) に低減している。

3. 有孔補強鋼板の補強機構

3.1 概要

有孔補強鋼板の補強効果を確認するために各種構造実験を行った。実験結果から有孔補強鋼板が構造的に果たせる役割は二つあることが分かった。一つは面外モーメントによって発生した引張力を負担する効果、もう一つは仕切鋼板周辺のコンクリートを拘束する効果である。この二つの補強効果の結果、継手部の付着割裂破壊が防止され部材の曲げ性能とせん断耐力の向上が図れることになった。以下に、これらの効果について力学的に説明する。

3.2 引張力負担効果

有孔補強鋼板が引張力を負担できる効果を説明するために、図-3に曲げを受けた時の継手部における引張側の鋼材とコンクリート相互間の引張力の伝達を示す。引張力の釣り合いをみると、PP型継手の場合、壁横筋の引張力 (T_w) に対して、くし型筋の引張力 (T_s) と有孔補強鋼板の引張力 (T_{pl}) の和が釣り合っている。一方FP型継手の場合、 T_w と T_s が釣り合っている。両者の違いは鉄筋もしくは鋼材相互間の引張力の伝達要素となっているコンクリート部での伝達経路が異なることである。重ね継手部の付着割裂破壊は引張力を伝達するコンクリートが破壊されることで起こる現象である。PP型継手では同じ引張力を伝達するコンクリートの領域が、FP型継手と比較して大きくなるため、単位のコンクリートの引張力負担が小さくなって付着割裂破壊を遅延もしくは防止できるのである。また、PP型継手では引張力の作用点が引張縁側に移動するため、断面の応力中心間距離が長くなる。そのため壁一般部と同様に、有効せい (d) を圧縮縁から壁横筋の位置までの距離 (図-4) とすることができ、曲げ耐力の計算上有利となることも確

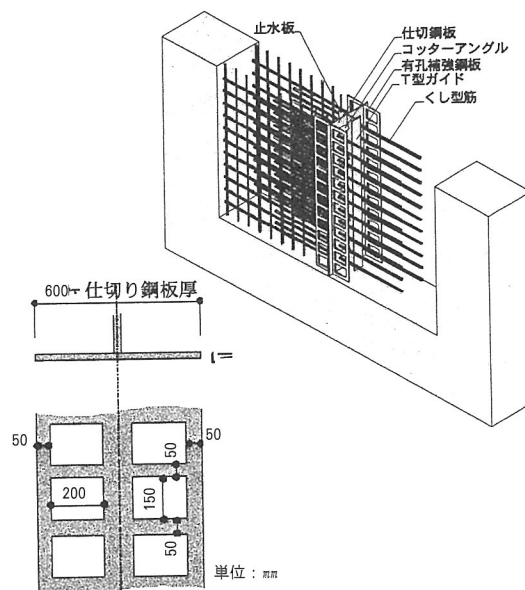


図-1 有孔補強鋼板

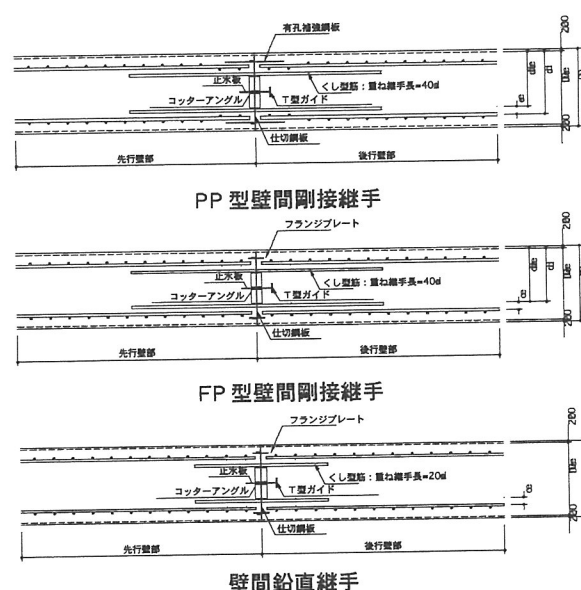


図-2 地中連続壁の壁間継手

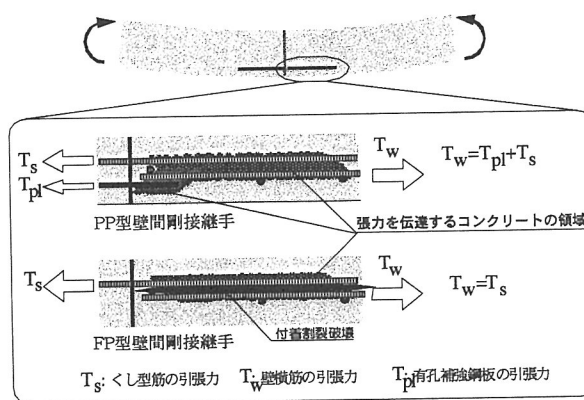


図-3 重ね継手部の張力伝達

認した。

3.3 拘束効果

有孔補強鋼板が仕切鋼板部のコンクリートを拘束する効果を説明する。面外曲げ実験結果から、有孔補強鋼板内部のひずみを測定し、有孔補強鋼板がコンクリートから受ける応力を算出した。図-5に示すように有孔補強鋼板に作用する応力は、その反力としてコンクリートを拘束する。例えば、上部構造の重ね継手では横補強筋を配置することで、重ね継手部のコンクリートを拘束しコンクリート自体の強度を高めて付着割裂を抑止している。これと同じ効果が有孔補強鋼板によっても得られる。面外せん断実験からPP型継手とFP型継手では、コンクリートのせん断力に抵抗するコンクリートの抵抗機構に違いが有ることが分かった。図-6にコンクリートのせん断抵抗機構を示す。PP型継手の場合、部材断面全体に形成されるコンクリートの圧縮束と鋼材によりせん断力が伝達される。これは壁筋の外側に配置された有孔補強鋼板がコンクリートを拘束するためである。したがって、せん断耐力に寄与するコンクリートの割合が大きくなる。一方、FP型継手の場合、形成されるコンクリートの圧縮束が小さくなるため、PP型継手に比べてせん断耐力に寄与するコンクリートの割合が小さくなる。このため、壁筋量と同じ場合PP型継手はFP型継手よりせん断耐力が大きくなるのである。

4. 壁間剛接継手の性能評価

4.1 概要

コンクリートの打ち継ぎ面、壁筋の重ね継手があるために、壁間継手部の面外曲げ強度、面外せん断強度は壁一般部より低減される。継手部と壁一般部の強度の違いを把握するために、ここでは曲げモーメントとせん断力に対するそれぞれの強度比（継手部の強度／壁一般部の強度）を設定し、それぞれ曲げ強度比（ M_{bu}/M_b ）、せん断強度比（ Q_u/Q_b ）と定義する。まず、継手部と壁一般部の曲げ強度とせん断強度の計算法の概略を説明する。

曲げ強度は、壁一般部では通常のはり設計式で計算するが、壁間継手部（重ね継手区間）では、それに加えて付着割裂強度の算定が必要である。したがって、継手部の曲げ強度は、壁一般部の曲げ強度より低くなる。しかし、PP型継手の付着割裂強度はFP型継手の1.3倍になることが実験結果から確かめられており、その分低減の割合は低くなる。

次に、壁体のせん断強度は、コンクリートの許容せん断応力に基づく計算式を用いているためコンクリートの

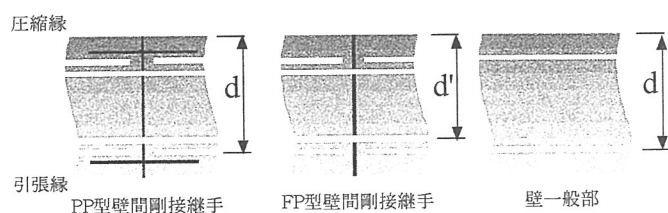


図-4 曲げ計算に用いる有効せい

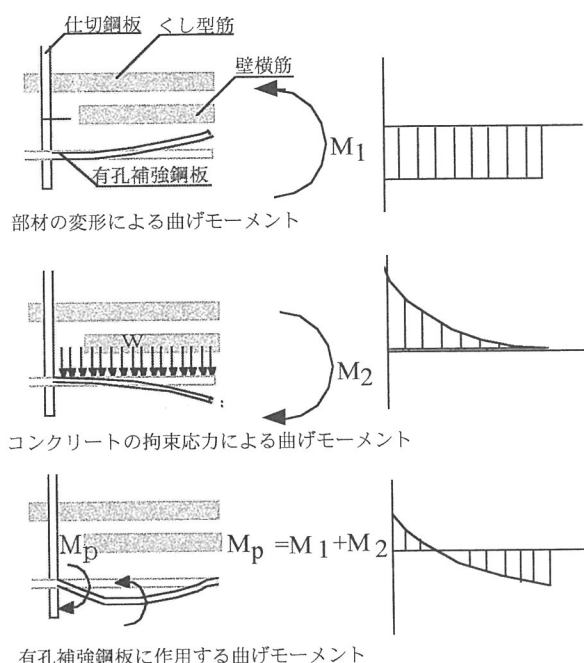


図-5 有孔補強鋼板によるコンクリート拘束効果

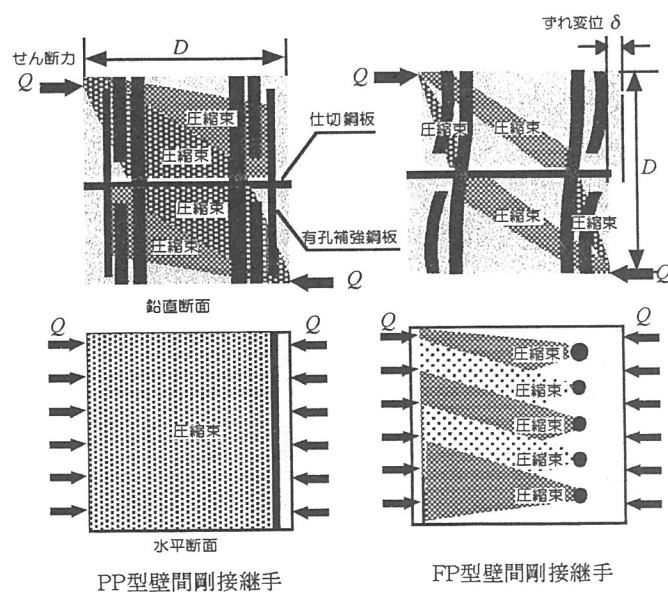


図-6 コンクリートのせん断抵抗機構

圧縮強度が同じであれば、壁体のすべての個所で同じになる。しかし、継手部分では、施工上、一般の柱・梁のようなせん断補強筋を配置できないことから、短期の場合においても、長期の許容せん断応力度を用いて安全側に計算することとした。したがって、継手部のせん断強度は壁一般部の $\frac{1}{4}$ と評価する。また、仕切鋼板部のせん断強度についてはPP型継手は壁一般部と同等以上であるが、FP型継手ではくし型筋量に依存し壁一般部より低くなる場合が多い。

図-7に壁一般部の強度を1.0としたPP型継手と、FP型継手の曲げ強度比とせん断強度比について示す。図のようにFP型継手の強度は壁一般部およびPP型継手より低いため、継手の配置計画では、応力の小さな所に限定しなければならなくなり、設計の自由度を妨げる要因となっている。以下に強度比を用いてPP型継手と、FP型継手の継手配置可能な位置を明らかにするとともに、PP型継手の使用による壁厚の低減の可能性について検討する。

4.2 強度比の検討

実際に施工される地中連続壁を対象として面外曲げ強度比と面外せん断強度比を計算する。検討対象とした壁体の因子を表-1に示す。固定因子はコンクリート設計基準強度 (F_c) が 27N/mm^2 、壁横筋の種類がSD295、計算上のシャースパン比 (M/Qd) が3.0である。 M/Qd の算定に必要な外力状態と支持条件を図-8に示す。外力は等分布荷重(w)とし、スパン長が ℓ の両端固定の梁と仮定する。 M と Q は梁端部の曲げモーメントとせん断力を用いる。変動因子は壁厚が500mm、600mm、700mm、800mm、900mm、1,000mm、1,200mm、1,500mm、引張鉄筋比(p_t)が0.1%~0.9%、壁横筋径がD22、D25、D29、D32、D35、D38、D41、壁横筋ピッチが137mm~300mmである。

PP型継手とFP型継手の曲げ強度比とせん断強度比を

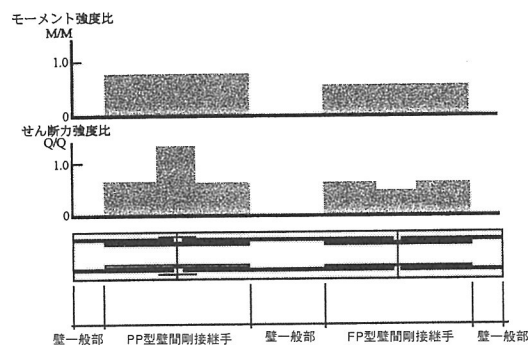


図-7 各部の強度比

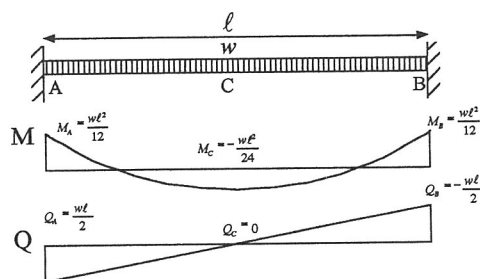


図-8 仮定した外力状態と支持条件

表-1 検討対象壁体の因子

固定因子	
$F_c(\text{N/mm}^2)$	27
壁筋の種類	SD295
シャースパン比	3.0
変動因子	
壁厚(mm)	500-1,500
引張鉄筋比(%)	0.1-0.9
壁横筋ピッチ(mm)	137-300
鉄筋径	D22-D41
継手形式	PP型、FP型

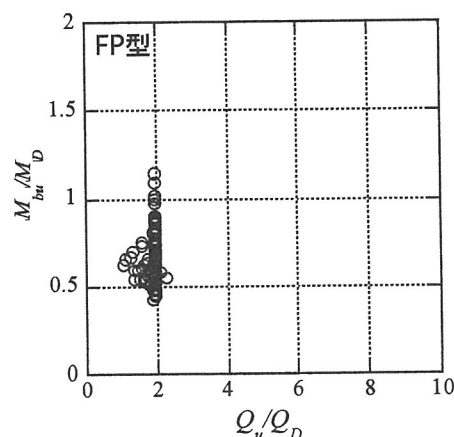
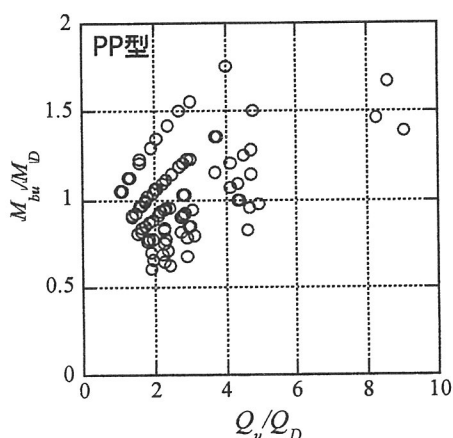


図-9 曲げ強度比とせん断強度比

図-9に示す。両継手とも大部分のせん断強度比が1.0を超す。これはシャースパン比が3.0と設定しているため設計用曲げモーメントに対して設計用せん断力が低くなる傾向にあるからである。PP型継手の曲げ強度比は、0.5~1.7の間で分布している。一方FP型継手では、PP型継手の場合より低い0.4~1.1の間で分布している。これは付着割裂強度で曲げ強度が決まっているからである。そのため、付着割裂強度を大きく設定できるPP型継手の方が、曲げ強度比が高くなる。図-10に壁厚に対する曲げ強度比を示す。両継手とも壁厚が厚くなるほど強度比が小さくなる傾向にある。FP型継手の場合壁厚が1,000mmを超すと各壁厚の強度比の下限値が0.5を下回る。図-11に p_t に対する曲げ強度比を示す。両継手とも引張鉄筋比が高くなるほど強度比が小さくなっている。FP型継手の場合 p_t が0.3%を超すと強度比が0.5を下回る壁体が表れてくる。 p_t が0.5%を超す壁体の個体数が少ないのは壁筋ピッチの制限から、検討の対象外となったからである。

4.3 継手配置の自由度

壁体を受ける面外方向の外力と発生する応力は前述の図-8に示すように仮定する。したがって、応力が最も大きくなる部分は、連壁コーナー部あるいは後打ち躯体柱部分である。この部分には継手を配置することを避けて、壁一般部を配置するように構造計画される。通常RC部材は曲げ降伏型に設計される。地中連続壁も最も大きな曲げモーメントを受ける部位が曲げ降伏する状態を終局状態として設計する。したがって、壁体端部での曲げモーメントが曲げ強度に達したときの状態が壁体の終局状態になる。せん断強度に対しても同様である。壁体端部を壁一般部の構造とすると、強度比によって壁体内で継手配置可能な領域を求めることができる。図-12に曲げ強度比とせん断強度比の違いによる壁体内での継手配置可能な範囲を示す。それぞれの配置可能範囲は、外力による内部応力の分布に対応する。曲げモーメントの場合、その範囲は、二次曲線で描かれ、強度比が0.5~1.0の間では、強度比が小さくなるほど減少し、強度比が0.5より小さくなるとモーメントの正負が反転する位置に収束していく。せん断力の場合、その範囲は、直線で描かれ、強度比が小さくなるにつれてスパン中央部に収束する。例えば曲げ強度比が45%せん断強度比が67%のときはそれぞれ斜線で描かれた範囲に継手を配置することが可能である。両方を満たす領域が最終的に継手配置可能となり図中の下に描いたようになる。

前述の強度比の計算結果から、せん断強度比は小さくても0.8程度でありほとんどの場合1.0を超えているの

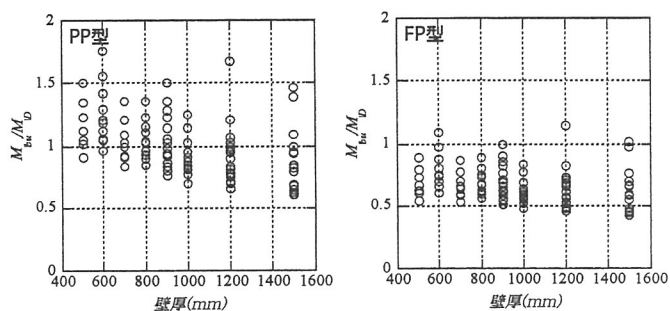


図-10 壁厚に対する曲げ強度比

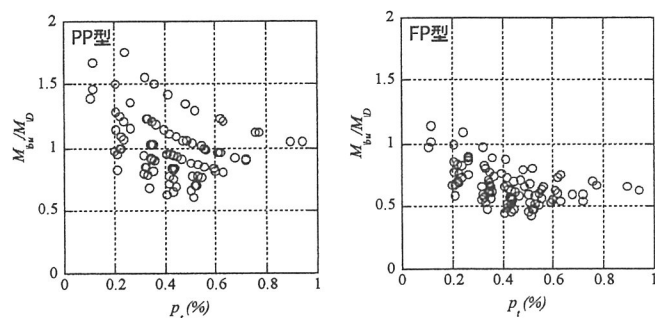


図-11 p_t に対する曲げ強度比

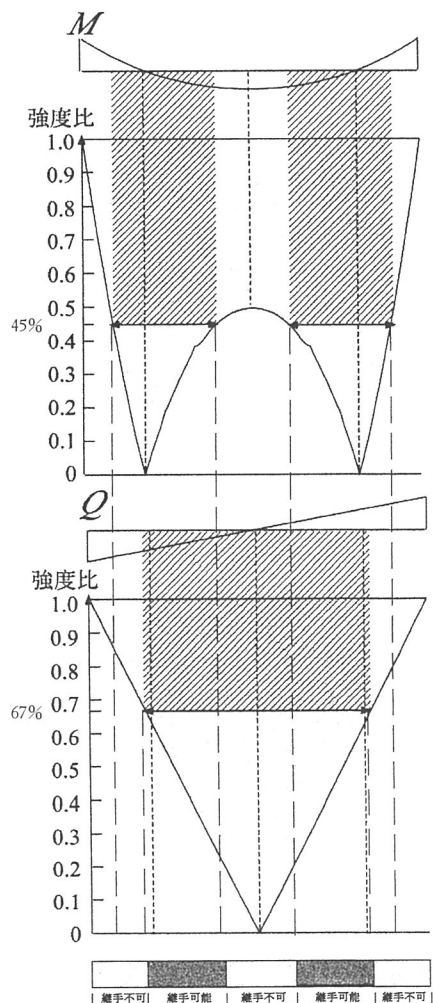


図-12 強度比と継手配置可能な領域

で継手の配置に対する影響は少ない。しかし、曲げ強度比が0.5を下回ると継手配置可能な領域が限定されてくる。図-13にロ型の地中連続壁を想定し、曲げモーメント強度比が0.5の場合と、0.4の場合の継手配置可能領域を示す。この図から強度比が0.5以上であれば、コーナー部以外は、どこにでも継手配置が可能であるが、0.5以下になると制限を受ける位置が増えている。検討対象とした壁体のうち、FP型継手では曲げモーメント強度比が0.5を下回るものがあったが、PP型継手では、すべて0.5を上回った。このことからPP型継手を使用すると継手の配置計画の自由度が向上することが分かる。

4.4 壁厚の低減

継手配置の自由度が向上するだけでなく、壁厚をより薄くする設計が可能である。比較的大きなシャースパン比でせん断強度に余裕がある。壁厚500mm～1,500mm、の壁体の付着割裂強度 M_{bu} 、壁一般部の曲げ強度 M_D 、と曲げ強度比の関係を図-14に示す。図中の直線Aは、継手部に要求される曲げ強度（1,000kN・m）とする。これを満たす継手はFP型継手では壁厚1,500mmであるが、PP型継手を使用すると壁厚1,200mmとなり300mm薄くなる。曲げ強度の改善の様子を図-15に示す。全壁体を薄くした場合、当然のことながら壁一般部の曲げ強度は小さくなる。（曲げ強度分布Aから曲げ強度分布B参照）しかし、壁横筋の量を増やしたり、降伏強度の高い鉄筋を使用して曲げ強度を上昇させることが可能である。（曲げ強度分布C参照）したがって、PP型継手を使用して、継手部の強度を高めることによって壁厚を低減させる設計が可能となる。

5. まとめ

地中連続壁の設計において、新しく開発したPP型壁間剛接継手を使用すれば、従来の継手を使用した場合より有利な設計ができることが分かった。

- PP型壁間剛接継手を使用した場合、曲げ強度比が向上して、従来の設計で問題となっていた継手の配置領域の制限がなくなり、継手の配置計画の自由度を向上させることができる。
- PP型壁間剛接継手を使用すると、壁体に簡単な補強を加えただけで、壁厚を300mm程度薄く設計することが可能となる。

〔謝 辞〕

この解析は、DLW工法研究会（浅沼組、新井組、大日本土木、松村組、不動建設、三菱建設）で行った構造実験結果を使用しました。ここに深く感謝致します。

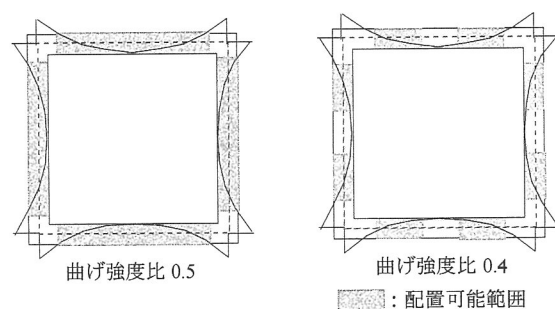


図-13 強度比の違いによる継手配置可能領域

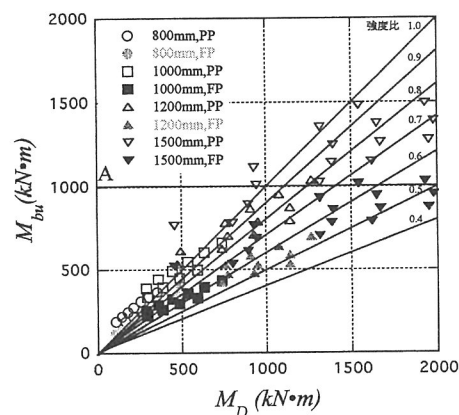


図-14 M_{bu} 、 M_D 、と曲げ強度比の関係

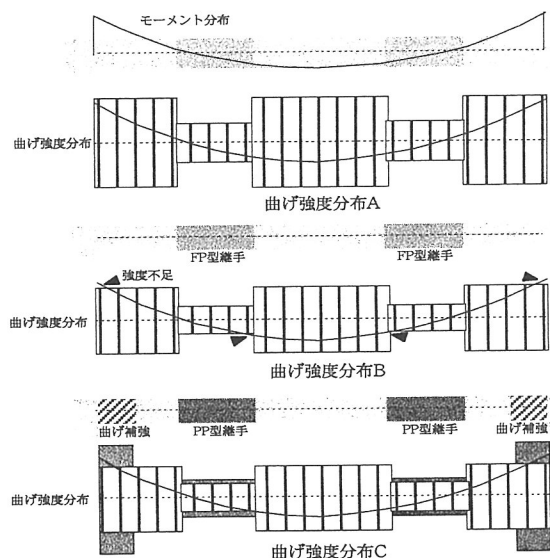


図-15 曲げ強度の改善による壁厚低減

〔参考文献〕

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1988.
- 2) DLW工法研究会：地中連続壁-DLW工法-設計・施工指針、1999.11.
- 3) 佐藤 尚隆、熊田 誠謙：RC 地中連続壁の構造性能に関する研究（その8 壁間継手部の面外せん断抵抗機構）、日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.617-618, 1999. 9.