

V. 7. 橋梁基礎の補修・補強工法の検討

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 10～平 14

担当チーム：基礎チーム

研究担当者：福井 次郎、西谷 雅弘、
大塚 雅裕、白戸 真大

【要旨】

旧来考慮されていた中小地震に対して耐震設計されたフーチングにはこれまで大きな地震被災事例がないにも関わらず、平成 8 年の道路橋示方書において耐震設計法が大幅に改訂されたことからフーチングが有する耐力が著しく不足していると判定される場合が多かった。しかし、フーチングの補強は、地中部にあることから容易なものではなく、合理的な耐力評価方法を確立することが急務となった。本研究では実験的検討を行うことによりフーチングの耐荷機構を明らかにし、耐力算定法を提案した。提案法は、平成 14 年に改訂された道路橋示方書に採用された。また、既設道路橋基礎の耐震補強法に関する設計法および施工法について検討し、とりまとめた。キーワード：フーチング、有効幅、曲げ耐力、せん断耐力、せん断スパン比

1. はじめに

平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震による橋梁への被害を受けて、平成 8 年に改訂された道路橋示方書（以下、「H8 道示」という）^{1),2)} は大地震に対する耐震設計が整備され、地震時保有水平耐力法が標準的な耐震設計法として導入された。地震時保有水平耐力法では、設計水平震度は大地震に対応する値が直接考慮され、部材の照査は許容応力度照査に代わり耐力照査が導入された。基礎に関しても、橋脚の地震時保有水平耐力以上の保有水平耐力を有するように設計することが原則とされた。

しかし、フーチングの曲げ、およびせん断耐力の評価方法は、地震時のフーチングの荷重状態に適合する実験データが無かったことなどから十分に解明されていなかった。したがって、H8 道示に改訂されたフーチングの設計法は、設計荷重が増大した一方で耐力はかなり安全側の設計法に評価せざるを得なかった。このため、従来基準により設計されたものより寸法だけではなく配筋量も著しく増大する結果となった。また、既設基礎のフーチングも、H8 道示により照査した場合、大規模な補強が必要になると判定されるものも生じた。

しかし、フーチングの地震被災事例はほとんどなく、兵庫県南部地震においても軽微なひび割れが生じたものが数基あったのみである。したがって、H8 道示のフーチングの耐力評価方法は、フーチングの曲げ・せん断耐力を過小評価しているものと考えら

れ、フーチングの耐力評価方法の確立が新設橋の設計および既設橋の耐震補強の判定の観点から強く望まれた。そこで、本研究の第一の目的は、フーチングの耐力評価方法を確立することであった。

また、これまでに建設された多数の橋梁が、今後、老朽化など耐力の低下に伴い、既設橋梁基礎の補修・補強が必要になると予想される。既設橋梁基礎の補修・補強工法としては、これまでのところ、増し杭、フーチング拡大などの工法が採用されることが多いが、既設基礎の補修・補強は施工上の制約条件が厳しいことから、これらの工法では多大な工費、工期を要し、また、周辺の社会環境、一般交通などにも大きな影響を与える。そこで、合理的な補修・補強工法の開発が必要とされてきた。

そこで、本研究の第二の目的は、他の研究課題と連動して開発した既設橋基礎の新しい補修・補強工法の設計手法、および合理的な施工法について検討を行い、とりまとめることであった。

2. 解決すべき主な問題点

フーチングの耐力評価方法に関していくつかある問題点の中で、特に解決する必要があった問題点は以下の通りである。

せん断耐力について：

- (1) H8 道示で導入されたフーチングのせん断耐力算定式ではせん断スパン比が小さいほどフーチング設計せん断耐力を割増すことにされた。

しかし、割増しを検討するための実験データのばらつきが非常に大きかったため、割増し係数はかなり安全側と考えられる値に設定された³⁾。したがって、ばらつきの要因を明らかにし、データの信頼性を向上させ、せん断耐力評価式の精度の向上を図る必要があった。

- (2) 地震時の杭の引抜き力によるせん断に対する耐力の評価では、せん断スパン比に応じたせん断耐力の割増しは考慮されなかった。これは、このような載荷状態に対する実験結果が無く、せん断耐力機構が不明であったためである。したがって、杭の引抜き力に起因するせん断力に対するフーチングのせん断耐力機構を把握し、耐力評価方法を確立する必要がある。

曲げ耐力について：

- (1) 地震時の杭の引抜き力により生じるフーチング上面側が引張りになる曲げに関して、フーチング断面の有効幅が許容応力度照査と耐力照査の時で同じとされた。上面鉄筋が降伏する場合には応力が再配分されることから許容応力度に対する照査と曲げ耐力に対する照査では後者の場合の有効幅を大きく取ることが可能であると考えられるが、研究成果が無かった。したがって、杭の引抜き力に起因して上面側が引張りとなる曲げが生じる場合のフーチングの曲げ耐力機構を把握し、耐力評価方法を確立する必要がある。

また、既設橋梁基礎の補修・補強工法に関する設計手法、施工法の開発にあたり、解決する必要があった問題点は以下の通りである。

- (1) 既設杭基礎を補強する際の設計においては、既設杭と補強杭の荷重分担を考慮する必要がある。しかし、既設杭と補強杭の杭径が異なるため、その考え方は明確ではなかった。そこで、載荷試験結果を検証し、合理的な設計を行うための手法を検討する必要がある。
- (2) 既設基礎を補強するにあたっては、桁下空間が狭い、近接構造物があり十分な作業ヤードが確保できないなど、厳しい施工条件下における工事となる。現在、マイクロパイル工法など合理的な施工法が開発されたが、施工法、施工管理手法についてとりまとめる必要がある。また、各工法の現場条件に対する適用性を検討する必要がある。

3. フーチングのせん断耐力

3. 1 フーチングのせん断耐力機構モデル

厚い部材の代表的な耐力モデルにストラット・タイモデルがある。ストラット・タイモデルは、部材内に生じる圧縮応力をコンクリートからなるストラットで、引張り応力を鉄筋からなるタイで受け持つものと単純化し、トラスやアーチ構造のような耐力機構を仮定するモデルである。

図-1は、本研究で想定するストラット・タイモデルによるフーチングの耐力機構モデルである。押し込み杭を有するフーチングは、その押し込み力と柱基部に作用する曲げ圧縮力 C_c によるせん断に対して圧縮力 C_3 、引張り力 T_2 のタイドアーチ的な耐力機構によって抵抗すると考えられる。このような圧縮力によるせん断については既往のディーブビームのせん断載荷実験が数多くあり、せん断耐力はせん断スパン比が小さくなるにつれて増加することが明らかにされている。

一方、引抜き杭を有するフーチングは、その引抜き力 T と柱基部に作用する曲げ引張り力 T_c によるせん断に対して圧縮力 C_1 および C_2 、引張り力 T_1 によるタイドアーチ的な耐力機構により抵抗すると予測される。しかし、このような引張り力によるせん断に関しては研究事例がなく、せん断耐力機構は明らかになっていない。

3. 2 押し込み杭を有するフーチングのせん断耐力^{4),5)}

上述のように、せん断スパン比が小さい部材では、コンクリートのせん断耐力はアーチ効果によってせん断スパン比が小さくなるにつれて増加する。H8道示では、この効果を取り入れて、フーチングのせん断耐力におけるコンクリート負担分 S_{dc} を次式で表している。

$$S_{dc} = c_{dc} S_c \quad (1)$$

$$c_{dc} = \frac{6.3}{1.3 + 0.8(a/d)^2} \quad (2)$$

ここに、 S_c は細長いはりとして評価したときのコンクリート負担分で道路橋示方書の規定に従い評価される設計値、 c_{dc} はせん断スパン比 a/d に応じたせん断耐力の増加を表す係数である種のタイドアーチモデルを仮定したときには $[1 + (a/d)^2]$ に反比例する関数で与えられる。図-2-aに平成8年道示の c_{dc} 式(2)とその設定において参照された実験値を比較した³⁾。縦軸は、実験で観察されたせん断耐力を、はりとしてのコンクリート負担分の計算値 S_c で除したものである。平成8年の改訂では、図-2-aに示す

ように実験データのばらつきが大きく、またばらつく理由が明らかにされていなかったことから、データを安全側に包絡する c_{dc} が規定された。

そこで、本研究では、実験データを再収集・追加した上で、実験結果のばらつきに関して要因分析を行った。その結果、有効高に対して軸直角方向幅がある一定の比率以下の供試体を用いた実験は、その他の実験に比べてせん断耐力が小さくなる傾向があることが確認された。フーチングのように軸直角方向幅の広い断面を有する部材のせん断耐力式は、有効高に比して軸直角方向幅が小さいデータを除いて評価することが妥当である。そこで、そのようなデータを無視して評価することにした。図-2-b に結果を示す。このように、データが多数収集できたこと、また、データのばらつきについて要因が明らかになったことから、 c_{dc} を多数のデータの下限値的な式とするのではなく、データのばらつきを統計的に処理して評価するのが合理的である。そこで、平成14年に改訂された道路橋示方書⁹⁾の改定案として、図-2-b に実線で示す式を提案した。

図-2-b の破線が実験データの平均値であり、

$$c_{dc} = \frac{14.0}{1+(a/d)^2} \quad (3)$$

となる。そして、橋脚下部構造に用いられる細長いはりのせん断耐力 S_{dc} を参考に、それと同等の安全余裕度を有するよう設計用の c_{dc} を設定すると次式が得られる。

$$c_{dc} = \frac{7.98}{1+(a/d)^2} \quad (4)$$

そして、最終的にこの式に基づき図-2-b の実線の値が提案された。ただし、アーチ効果を十分に期待するために、フーチングは降伏域で交番荷重を受ける状態には達しないことを前提とした設計を行わなければならない。

3. 3 引抜き杭を有するフーチングのせん断耐力^{7),8),9)}

従来、引抜き杭を有するフーチングのせん断耐力機構は明らかではなかった。この理由は次の通りである。橋梁は上部構造の死荷重が非常に大きいことから、兵庫県南部地震以前に行われていた中小地震に対する耐震設計において引抜き杭によるせん断が問題になることはなかった。したがって、引抜き力によるせん断が、研究対象になることは無かった。

本研究では、引抜き杭を有するフーチングのせん断耐力算定に関する問題を解決するために、引抜き

杭を有するフーチングのせん断破壊に関する載荷実験を行った。実験供試体を図-3 に示す。3 シリーズの実験を行っている。Series A と B は、橋脚と引抜き杭を有するフーチングで構成される部分模型である。評価を簡単にするために2次元模型で実験を行った。引抜き杭に対応する位置に引抜き杭の定着筋を模擬した複数のアンカー鉄筋を埋め込み、そのアンカー鉄筋に直接引張り力を載荷した。Series C は完全な3次元模型である。その頂部に水平力が載荷される橋脚柱と、1列の押込み杭2本と1列の引抜き杭2本を有するフーチングからなる。また、フーチング軸直角方向の橋脚幅と杭中心間隔が異なり、Series A, B では検討できなかったフーチング内の3次元的な荷重分布がせん断耐力に与える影響について検証された。ただし、押込み杭を有する側のせん断破壊により実験が終了することがないように、押込み杭を有する側のせん断スパンを引抜き杭を有する側よりも小さく設定し、大きな耐力を有するようにした。なお、いずれのシリーズにおいてもフーチングはせん断補強鉄筋を含んでいない。

各シリーズでは、有効高を一定にして、柱前面と引抜き力作用位置までの距離 L を変えて実験を行った。ここで、 L は押込み杭を有するフーチングではせん断スパン a に等しいものである。

典型的な破壊性状を図-4 に示す。引抜き杭上面位置のひび割れは橋脚柱前面位置ではフーチング下面には達せず、橋脚の下側の断面まで進展してからフーチング下面(図-1 中 X 点)に達し、また、柱圧縮側基部(図-1 中 Y 点)からも同じ位置へと向かうひび割れが生じた。ひび割れは圧縮主応力に直交する方向(すなわち引張り主応力方向)に開いていると考えて良く、ひび割れに沿って図-4 に矢印で示すような圧縮ストラットが形成されていると考えて良い。したがって、図-1 で設定したストラット・タイモデルによる耐力機構のモデル化は妥当であると考えられる。ただし、ひび割れ形状から分かるように、せん断スパンは柱前面と引抜き力作用位置までの距離 L より長いことが予測された。せん断スパンとして、図-1 に示す引抜き杭位置から点 X の位置までの距離を適切に設定することができれば、押込み杭を有するフーチングのせん断耐力と統一的な式でせん断耐力が評価できると考えられる。

そこで、実験値と計算値を比較した結果を図-5 に示す。計算値の算出は、せん断スパン a の設定方法を図-5 に示すようにいくつか変えて式(1), (3)より

行った。ここに、 t_{cc} は図-1 に示すように柱の断面高である。3次元モデルである Series C の結果、2次元モデルによる Series A, B の結果のいずれについても、 $a = L + 0.5t_{cc}$ および $a = L + d$ とした場合に計算値は実験値を良く予測することが分かる。したがって、フーチング軸直角方向の断面幅が橋脚断面のそれに対して著しく広い柱式橋脚の場合を除けば、せん断耐力の評価において2次元と3次元の取扱いは区別する必要がないと考えられる。

さらに、橋脚杭基礎 18 基に関して、材料非線形を考慮した数値解析を行い、フーチング内部の応力状態やひびわれ分布に基づき圧縮ストラットおよびせん断スパンの評価を行った。18 基のほとんどが一般的な形状を有するものである。また、等価な断面幅を有するような2次元モデルに置き換えている。数値解析の結果、一般の柱およびフーチング形状では $a = L + 0.5t_{cc}$ とすることで、また、壁式橋脚の壁方向の载荷における場合のようにフーチング軸方向の柱幅 t_{cc} が著しく大きい場合には $a = L + d$ とすることで、数値解析により想定される圧縮ストラットの位置やせん断スパンを安全側に評価すると判断できるものであった。

以上の実験、数値解析結果に基づき、今回の改訂では、引抜き杭を有するフーチングのせん断耐力におけるコンクリート負担分も、次式のせん断スパンを用いることで、式(1)および(3)から統一的に評価できることが明らかになった。

$$a = L + \min(0.5t_{cc}, d) \quad (5)$$

そこで、平成 14 年に改訂された道路橋示方書の改定案として、引抜き杭を有するフーチングのせん断耐力は式(1)、(4)、(5)により評価することを提案し、道路橋示方書に導入された。

4. 引抜き杭を有するフーチングの曲げ耐力

引抜き杭を有するフーチングでは上面側が引張りになる。この場合には、橋脚とフーチングの結合部分に大きな引張り力が働き、かつ平面的に引張り応力分布が異なる。しかし、せん断耐力の場合と同様に兵庫県南部地震以前の設計ではこの点が問題になることは無かったため、そのような引張りに対してフーチング上面の鉄筋がどのように働くかは明らかではなかった。そこで、H8 道示では、この载荷に対するフーチング有効幅 b は、旧来の設計において仮定されていた

$$b = t_c + d \quad (6)$$

を、許容応力度法による照査の時だけでなく曲げ耐力による照査の時にも用いることにされた。ここに、 t_c は载荷直角方向の柱幅である。しかし、曲げ耐力を評価するための有効幅は、許容応力度を照査するための有効幅よりも大きく設定できると考えられた。

そこで、図-6 に示すような3次元模型2基を用いて、引抜き杭を有するフーチングの曲げ抵抗機構について実験を行った。さらに、阪神高速道路公団で行われた大型実験事例¹⁰⁾、米国における実験事例¹¹⁾を参考に、また、橋脚とフーチング接合部の引張り破壊に鉄筋が有効であることも考慮して鉄筋量を著しく過小評価することがないように、最終的に曲げ耐力評価のための有効幅として次式を提案した。

$$b = t_c + 1.5d \quad (7)$$

これも平成 14 年道路橋示方書に導入された。

5. 既設橋梁基礎の耐震補強法に関する検討

载荷試験結果と解析結果を踏まえ、既設杭基礎の補強設計には道示²⁾に示される保耐法が適用できることが明らかとなった¹²⁾。また、荷重分担を適切に考慮するには、保耐法のモデルを工夫して対応することも明らかとなった。さらに、各マイクロパイル工法における試験施工結果を踏まえ、適切な施工管理項目と基準値を設定した。これらの成果は、各工法の設計・施工マニュアル¹³⁾に反映された。

6. まとめ

本研究では、フーチングの耐力評価方法について検討を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) フーチングのせん断耐力評価法を明らかにした。
- 2) 引抜き杭を有し、上面側引張りになる曲げを受けるフーチングの曲げ耐力を評価するための有効幅を明らかにした。

以上の項目は全て平成 14 年に改訂された道路橋示方書に反映された。

本研究の成果から、以下の効果が期待される。

- 1) せん断に関して、震度法で設計した断面に対して地震時保有水平耐力法で照査した場合にも、断面の増加、せん断補強鉄筋の配置などの追加的な補強を必要としないフーチング数が多くなる。
- 2) せん断補強鉄筋を必要とする場合も、平均で約 4 割の補強鉄筋量で済む。
- 3) これらのコスト縮減効果を新設橋脚フーチング 1 基あたりの工費に換算すると、2%~3%の減が予

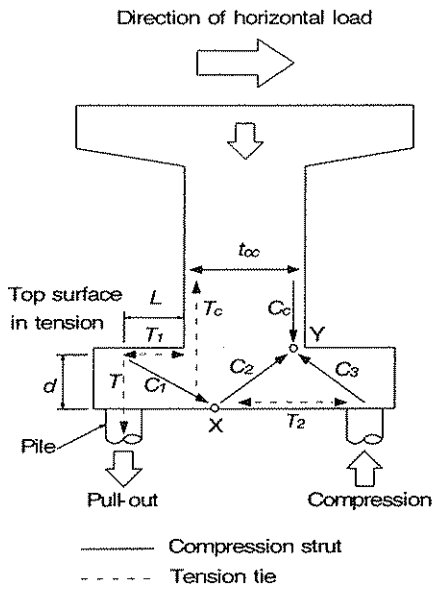


図-1 ストラット・タイモデルによるフーチングのせん断耐荷機構のモデル

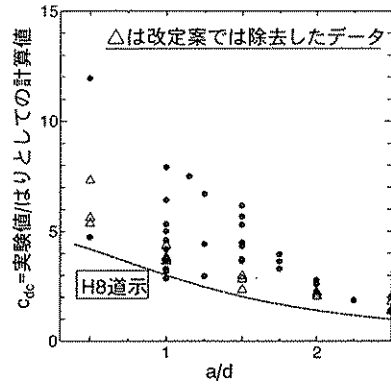


図-2-a H8道示における c_{dc} の設定

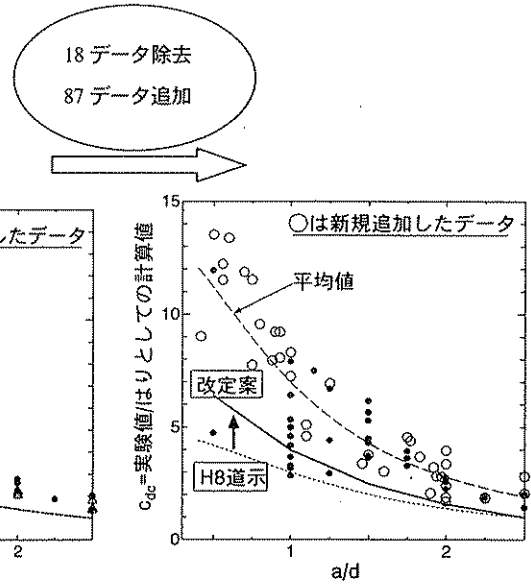
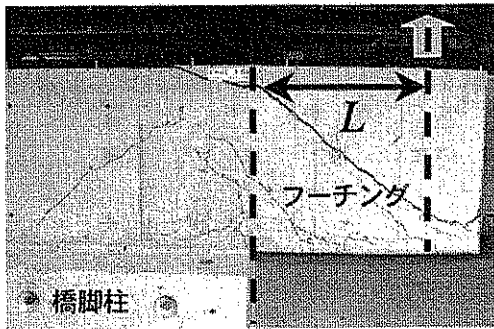
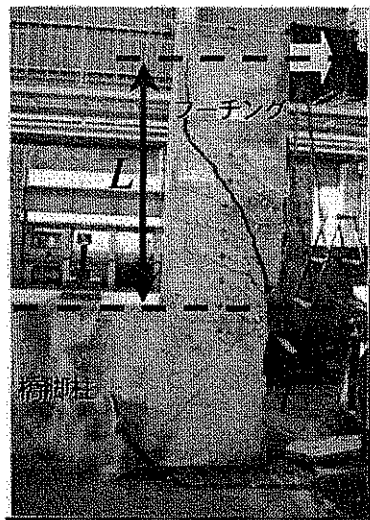


図-2-b 本研究において提案した c_{dc} の改定案

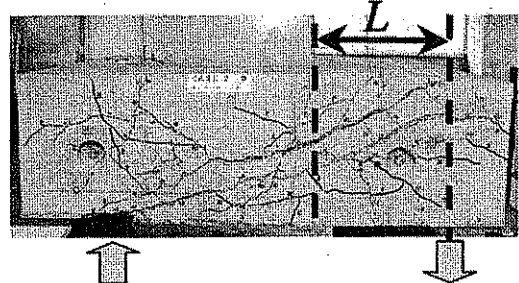
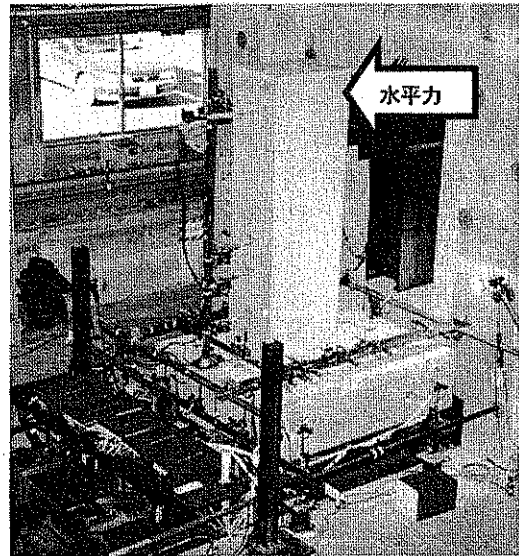
図-2 せん断スパン比 a/d に応じたせん断耐力の割増し係数 c_{dc}



Series A : 2次元部分模型、3 供試体



Series B : 2次元部分模型、4 供試体



Series C : 3次元模型、2 供試体

図-3 引抜き杭を有するフーチングのせん断耐荷機構に関する実験

測される。

- 4) フーチングの施工性が大幅に向上する。
- 5) 曲げに関しても、1~2割程度のフーチングで、主鉄筋径が1ランク低下した。したがって、その分のコスト縮減が期待できる。

これらの成果はもちろん既設橋梁のフーチングの補強を経済的にするものである。

また、既設基礎の新しい補修・補強工法の設計手法、および合理的な施工法について検討した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 既設橋基礎を補強する際の設計においては、既設構造物と新設構造物の重量など、荷重分担を適切に考慮することにより、合理的な設計が可能である。
- 2) レベル 2 地震時における耐震性能の照査にあたっては、既設橋基礎の耐力、損傷度を適切に考慮し、反映させる必要がある。
- 3) 桁下空間、作業ヤード幅などの施工条件や地盤条件など、既設基礎の現場条件に対し、各補強工法の適用性を明らかにした。

上記の結果等を踏まえ、既設基礎を補強する際の設計手法、施工法を提案した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、1996.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 IV 下部構造編、1996.12.
- 3) 七沢利明、増井直樹：「部材設計に関する一般事項」、基礎工、Vol. 25, No. 2, pp. 9-14, 1997.2.
- 4) 白戸真大、福井次郎、幸左賢二、梅原剛：「ディープビーム・フーチングのせん断耐力算定法に関する研究」、構造工学論文集、Vol. 47A, pp. 1315-1325, 2001.3.
- 5) 福井次郎、白戸真大、梅原剛：「ディープビームやフーチングのせん断耐力に関する研究」、土木研究所資料、第 3841 号、2001.11.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、2002.3.
- 7) 白戸真大、川本篤志、福井次郎、幸左賢二：「上面側が引張りになる場合のフーチングのせん断耐力算定式」、構造工学論文集、土木学会、Vol. 48A, pp. 1211-1220, 2002.3.
- 8) 白戸真大、古荘伸一郎、福井次郎、加藤秀章：「引張り力による曲げ・せん断を受けるフーチングの限界状態に関する実験的研究」、構造工学論文集、土木学会、Vol. 47A, pp. 1327-1338, 2001.3.
- 9) 福井次郎、加藤秀章、白戸真大、大越盛幸、古荘伸一郎、川本篤志：「上面側が主鉄筋となる場合のフーチングの耐力算定法に関する実験的研究」、土木研究所資料、第 3781

号、2001.2.

- 10) 幸左賢二、藤井康男、水田崇志、森田修二：「地震時のフーチング損傷メカニズムに関する研究」、土木学会論文集、No. 655/V-48, pp. 63-73, 2000.8.
- 11) Priestly, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M.: Seismic design and retrofit of bridges, John Wiley & Sons, 1996.
- 12) 西谷雅弘、梅原剛、福井次郎、渡辺達也：「径の異なる群杭模型に関する静的水平載荷実験」、構造工学論文集、土木学会、Vol. 49A, pp. 455-464, 2003.3.
- 13) 土木研究所：「既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書」、第 282 号、2002.9.

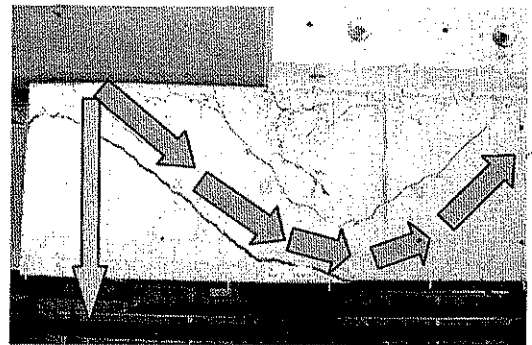


図4 典型的な破壊性状 (写真は 180 度回転させてある)

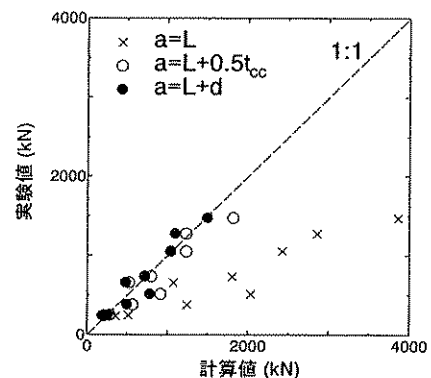


図5 実験値と計算値の比較

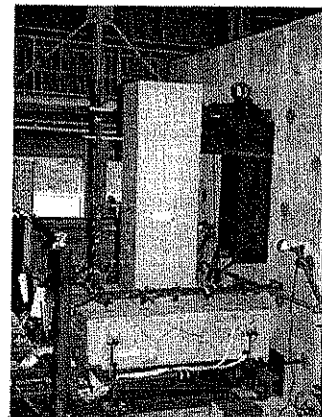


図6 引抜き杭を有するフーチングの曲げ耐荷機構に関する実験