

2019 基礎指針へ「追記-その 1」: PHC 杭の杭頭に継手を

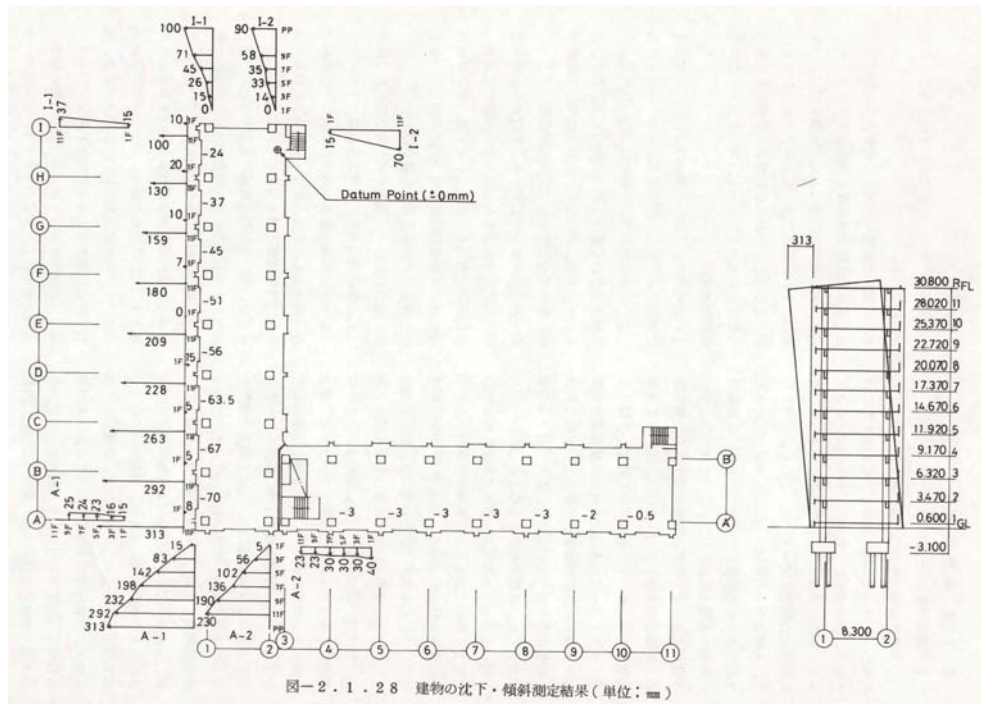
(一社) 基礎構造研究会代表理事 杉村義広

5月24日(金)に建築学会近畿支部構造部会で今年改定出版される予定の基礎指針〔正確には建築基礎構造設計指針〕に対する筆者の感想を述べる機会を得た。実際に出版された後には、その内容を再吟味して何らかの形で公表することを考えているが、ここでは関連して気づいた2つの話題だけを取り出して記述してみたい。

今回は「追記-その1」として、“靱性不足でとくに耐震2次設計では採用できない”との評価が定着してしまったかの印象にあるPHC杭(ある意味ではPRC杭も含まれる)の救いに繋がる可能性について取り上げる。この種の杭について筆者は摩擦杭として使用してはどうかとの提案をして来たが〔例えばいしずえ通信第22号を参照〕、摩擦杭としなくても効果を発揮するかも知れないという内容である。

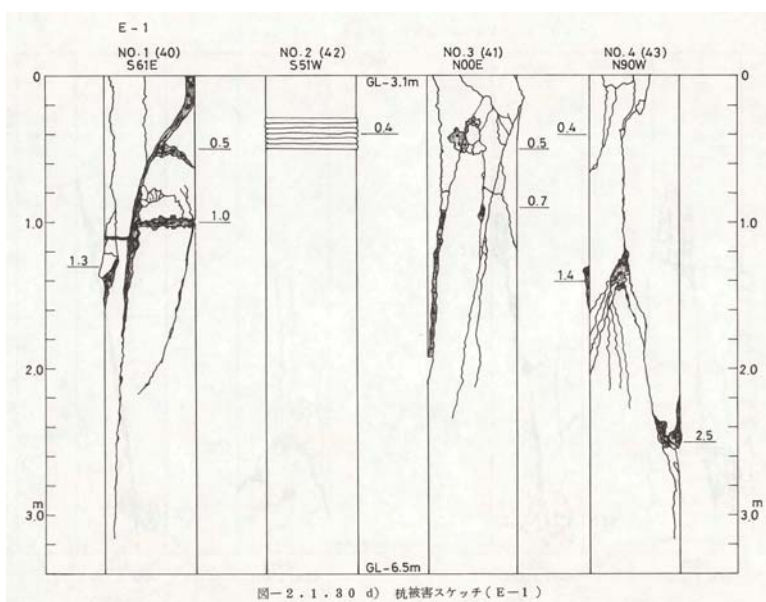
まず1978年の宮城県沖地震まで遡る。あの地震で当時は強い杭であると認識されていたPHC杭(厳密にはコンクリート強度がやや小さいためにPC杭と呼ばれていた時代の杭である)が杭頭部でせん断破壊を生じたために傾いたことが切っ掛けとなって筆者が作業部会のまとめ役を担当した旧建設省の「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」(1984)が作成されたことは忘れられない。その被害様相を紹介した論文を書いたことはあるが、〔例えばいしずえ通信第15号を参照〕、全貌を記録の意味でまとめた報告書〔杉村義広、大岡弘:1978年宮城県沖地震による既製コンクリート杭の被害調査報告、建築研究資料 No.31、建設省建築研究所、1981.7〕から関連の部分を取り出してみると以下のようなものである。

被害のあった建物は11階建てRC造でL字型の平面形をなす仙台市営住宅であり、構造体の施工は終了し、内装等の仕上げを待っている建設途中に地震を経験したものであった。図-2.1.28に示すように、エクспанションジョイントで結ばれた南北方向に1スパン構造をなすA棟が南側へ向かって1/100ほど傾斜した。調査は仙台市によって行われたが、上部構造ではエクспанションジョイント部で衝突したらしき痕跡が認められるだけで、東西方向に1スパン構造をなすB棟は傾斜することもなく無被害であり、このA棟の傾斜だけが目立った被害様相であったために、杭基礎に原因があるのであろうということになり、当時東北大学の志賀敏男教授指導の下に掘削調査が行われている〔志賀敏男:宮城県沖地震における杭の被害とその復旧、建築技術、No.344、pp.78-91、1980〕。その調査が終わった頃と、復旧工事の最中に数度にわたって筆者も見学させてもらったことがあるが、確かに上部構造はエクспанションジョイント部を除いて被害らしきものはなく、A棟の南側の基礎すべてで4本の杭の杭頭部に斜めひび割れが生じていること、それに対して北側の基礎5本の杭は無被害か、入って



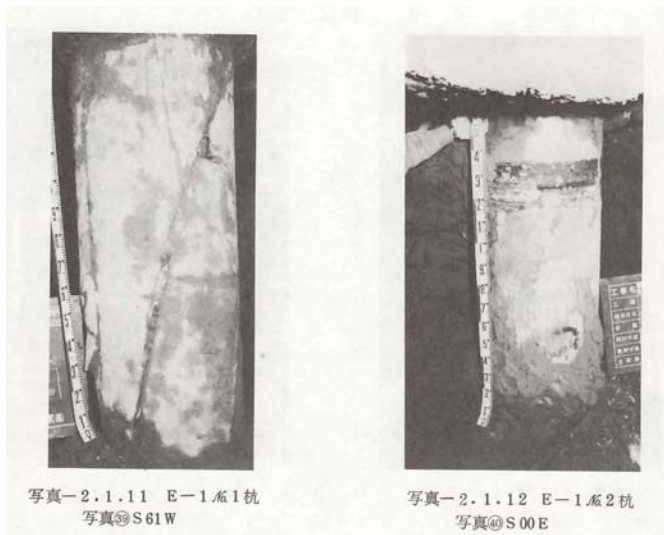
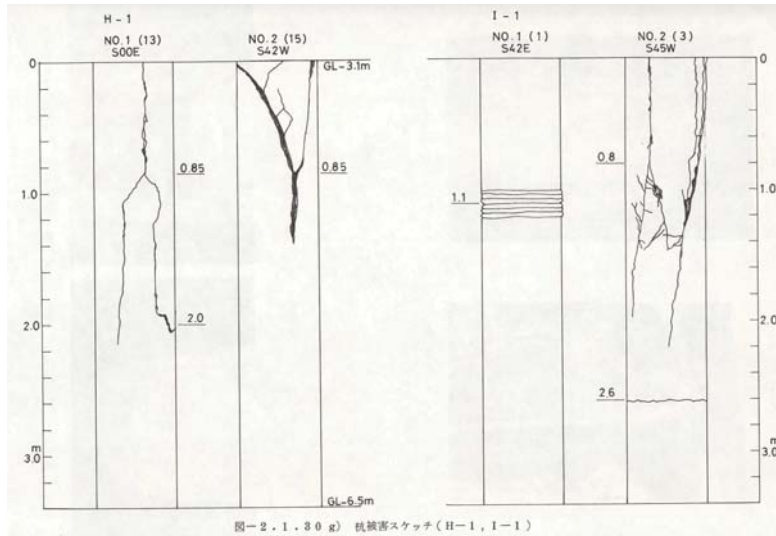
いてもヘアークラック状態の曲げひび割れ程度であるという対照的な状況が観察された〔上記報告書の図面、写真、観察スケッチ等はすべてこの見学を機会にして仙台市から入手したものである〕。

その中で E-1 通りの基礎のスケッチを図 2.1.30d) に示す。ほかの 3 本の杭が杭頭部斜めひび割れ〔中には縦ひび割れに近いものも含まれている〕が生じているのに、1 本だけがたまたま基礎スラブ下端から 40cm の位置に継手〔当時は溶接継手が使われていた〕があったために斜めひび割れが生じるのを免れた例がある。この建物の杭の施工方法は掘削後に PHC 杭をたて込み、最終的に 2m ほど打ち込む方法が用いられているが、たまたま打ち込まれ過ぎたために急遽上部杭が増し打ちされたものと推定される。この継手部が杭本体部よりも耐震性能〔むしろ変形性能か〕が高かったためにひび割れ発生を免れたものと推定される。



実は、これだけでなく I-1 通りの基礎でも基礎スラブ下端から 1.1m の位置に継手が存在

していたために、ほかの3本の杭が被害を受けているのに対してこの杭は無被害であった例が認められている。スケッチは2本ずつの杭についてだけであるが、隣のH-1通りの基礎とともに描かれたものを図2.1.30g)に示す。また、E-1通りの基礎のNo.1とNo.2の杭を写真-2.1.11と写真-2.1.12に比較して示す。



A棟の南側基礎の杭36本中2本〔5.6%〕が杭頭部に継手があったことが理由でせん断破壊を免れたという事実は、本体構造と同等またはそれ以上の耐力を持つべきであると規定された継手が、実は本体以上の耐力〔耐力もさることながら靱性と言った方がよいかも知れないが〕を持っていたことの証明であるとも言える。

この事実から発想を得て杭頭部に継手を配置したものを耐震杭、通常のPHC杭を標準杭と呼び、両者を一つの基礎スラブで繋いだ2本杭の水平交番载荷試験を行ったことがある〔杉村義広、佐々木建一、佐藤宏和、佐々木達夫：耐震継手を持つPHC杭の軸力変動下における水平交番载荷試験、日本建築学会構造系論文集、第513号、pp.105-111、1998.11〕。図-1と図-2に示すように、この試験では単純に水平交番载荷をするだけでは面白くないので、地震時に軸力変動を受けながら水平力も経験する杭基礎、すなわち前面杭は押込み杭となり、後面杭は引抜き杭となる条件を実

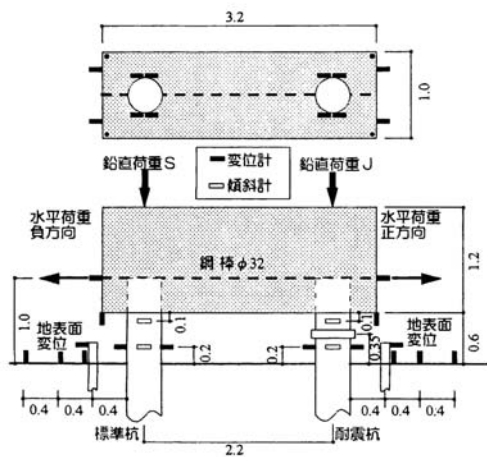


図1 試験体の概要

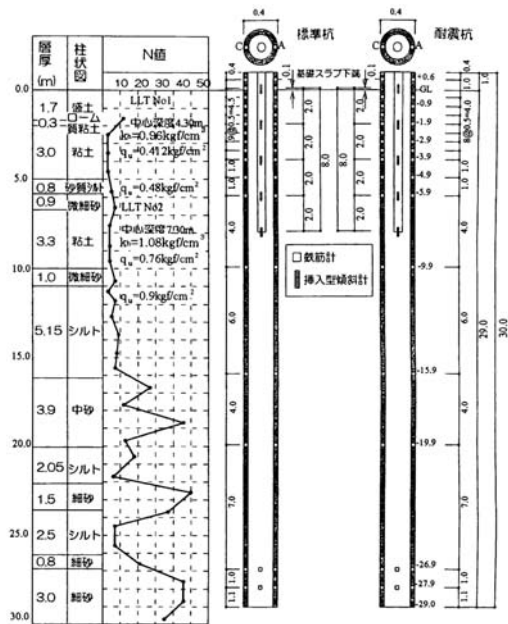


図2 地盤構成と杭の計測状況との関係

現するべく、二つの杭に軸力変動を与える加力方式を採用したのである。継手もペアリングジョイントと呼ばれる無溶接継手として開発された新しい工法によるもので、その継手を含む杭の鉛直支持力に関して現場実験による開発研究がなされていたものであるが、そのような杭ならば是非軸力変動下における水平挙動も合わせて検討してはどうかと提案した結果、その提案を受け入れてくれた茅田正明氏〔当時前田製品販売株式会社〕の協力で実現したわけで、筆者としては今でも忘れられない実験である。水平力の増大に伴う軸力の変動加力方法の詳細は論文を参照していただきたい。

余談ではあるが、PHC 杭は変形性能に問題があることが次第に分かって来ていたので、幼少の頃に竹細工で蛇のように曲がるおもちゃを横に振って遊んだことを思い出していたのである。よろよろと呼んでいたように記憶しているが、この論文を書く際にインターネットなどで調べたところ、インドの蛇使いが笛を吹いてコブラを操る様子がそのおおもとであるらしいことが分かった。そこで「竹細工の蛇笛のように」と表現することにしたが、例えば長さ 2m 程度の PHC 杭をこの種の継手で繋いで支持層まで届く杭とすれば、個々の PHC 杭本体部分は靱性に乏しくとも、継手部分で変形性能を稼ぐことが出来るではないか、との発想を提案したことがある。しかし、さすがに 2m 程度の PHC 杭の製作が難しいこと、20m 程度の支持杭であれば 20 個近くの継手を必要とすることで採算上問題があるということになって、このアイデアは没となってしまったが、“それならばせめて杭頭部に継手を配置すれば、宮城県沖地震の際の市営住宅の例のようにもろい壊れ方をさせないで済むのではないか”との発想に結び着いたわけである。

図-1 や図-2 に示したように、この実験では継手部を含む杭頭付近の観察を容易にするために敢えて突出杭としたことや、周辺地盤の変位の測定を追加したこと、杭体内のひずみ分布

は杭頭から杭先端まで測定するなどの工夫を加えることにした。したがって、かなり多くの有力な情報を得ることが出来たのであるが、それらは論文を参照していただくことにし、ここでの最大の関心である軸力作用下での杭の軸ひずみと曲げひずみを示す図-10 に絞って考察してみよう。

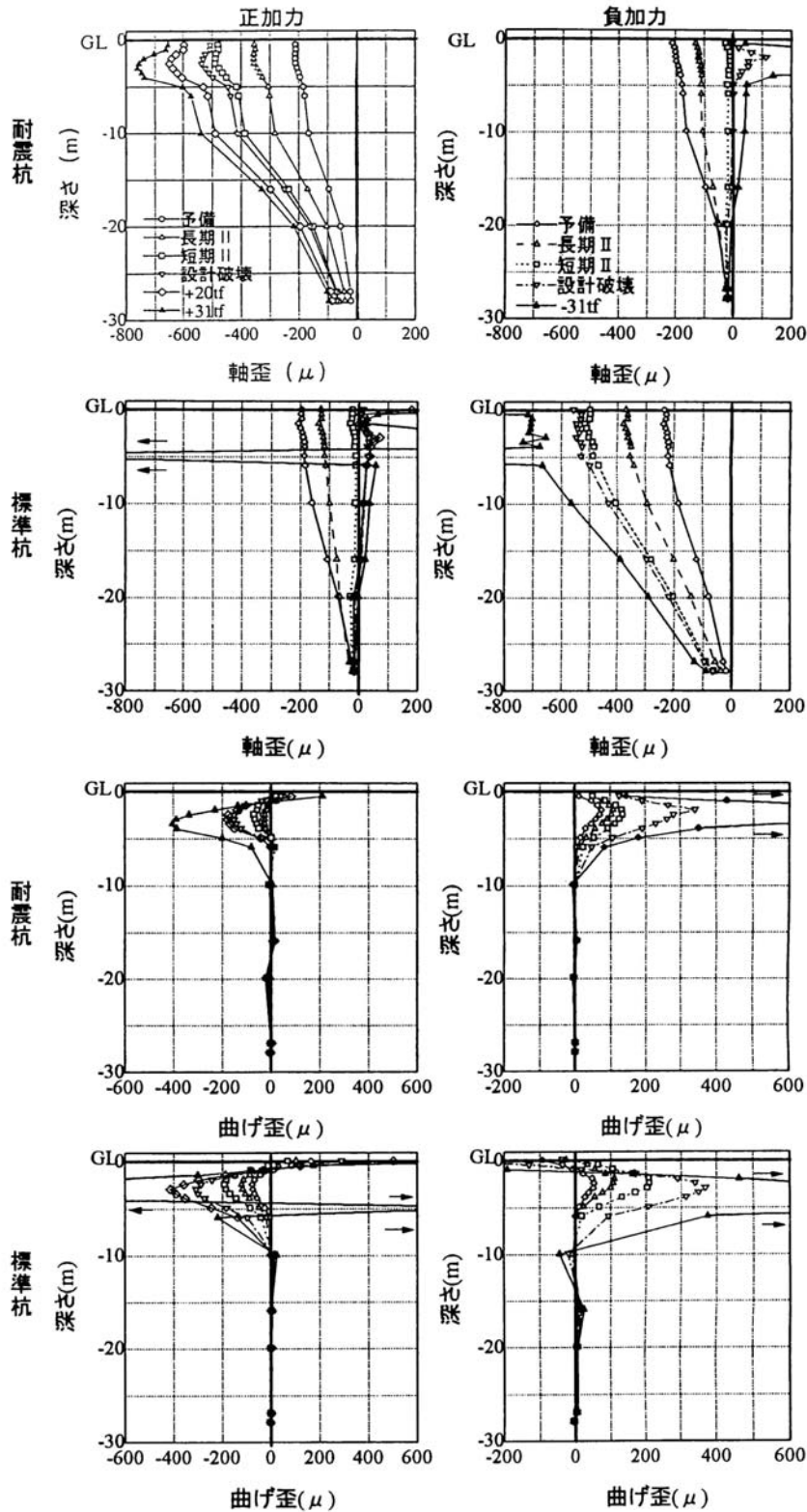


図10 杭の軸歪および曲げ歪分布

この図で、正加力とは耐震杭が前面杭となる方向であり、負加力は反対に標準杭が前面になる方向を示している。例えば、正加力時の耐震杭軸ひずみの図では6本の分布が見られるが、小さい方から 1) 予備サイクル均等軸力 60t 下で水平力 7.5t 時、以後、変動軸力下で、2) 長期水平力 7.5t 時、3) 短期水平力 10t 時、4) 設計破壊水平力 17.5t 時、5) 破壊 20t 時、6) 破壊 31t 時の順に示しているが、予備サイクルでは杭頭で予想される軸ひずみ 200 μ 程度、逆三角形分布となることが認められる。長期サイクルあたりから徐々に杭頭部付近の分布が乱れるが、最終の破壊 31t 時までなんとか測定値が得られている。それに対して、標準杭は予備サイクルでは耐震杭とほぼ同様の軸ひずみ分布を示した後、長期サイクルでは軸力を減少させたのに対応して軸ひずみが減少し〔その値は耐震杭の半分程度と見られる〕、以後、軸ひずみがほぼゼロ、あるいは杭頭部付近では引張りひずみとなる傾向を示した後、破壊 31t 時には深さ 5m あたりでひずみ計が破断していることが見られる。

一方、負加力では、標準杭の軸ひずみ分布が正加力の耐震杭とほぼ対応して軸ひずみは杭頭で 200 μ を少し超える程度となるが、杭先端まで逆三角形分布となっていることが認められる〔ただし、破壊 20t 時は省略されているので5本の分布線が示され、破壊 31t 時の 5m 付近は軸ひずみ計が死んでいる〕。それに対して、標準杭は予備サイクルでは耐震杭とほぼ同様の軸ひずみ分布を示していること、長期サイクルでは軸ひずみが減少していること、それ以後はほぼゼロの分布となっていることなどは、正加力の耐震杭と同様の傾向にあり、設計破壊サイクルでは杭頭部で引張りひずみとなり、破壊 31t 時には急激に増大していることが明らかである。

以上の軸ひずみは、標準杭が耐震杭よりもやや値が大きいという傾向があるものの両者はほぼ同じような分布を示していると言えるのに対して、曲げひずみは明らかな差異が認められるのが特徴的である。それらの特徴点を挙げてみると、1) 正加力における曲げひずみは、各サイクルとも標準杭の方が耐震杭よりも大きくなっていること、2) 耐震杭の曲げひずみは、各サイクルとも正加力よりも負加力の方が大きいこと、3) 標準杭の曲げひずみは、設計破壊サイクルまでは正加力と比べて負加力の方が大きい、それを超えて破壊 31t 時には正加力で急に大きくなるという反転現象を起こしていること、などがある。

1) の点は、標準杭の杭頭回転拘束度が固定に近いのに対し、耐震杭の杭頭回転拘束度はむしろピンに近く挙動していることを示している〔この点は負加力の耐震杭と標準杭の曲げひずみの図からも類推出来ることである〕。2) の点は、前面杭となった標準杭の回転拘束度が大きいのに引き摺られる形で後面杭の耐震杭も正加力時より大きい曲げひずみを示す結果となったと考えられる。このことから、前面杭の回転拘束度によって曲げモーメントは制御されているものと推定される。すなわち、正加力時には耐震杭の回転拘束度によって制御されるものの、後面杭となった標準杭の回転拘束度が大きいために曲げひずみは耐震杭よりも大きくなり、負加力時には前面杭としての標準杭の回転拘束度が大きいためにさらに大きい曲げひずみが生じ、それにつられて耐震杭も正加力時より大きい曲げひずみになったものと推定される。3) の点は最終的に後面杭となった標準杭の方が大きな曲げひずみになることで図-11 に示すような標準杭の杭頭付近に斜めひび割れが生じる最終状況となっている〔前面杭である耐震杭の継

手は実験終了後に解体した結果、何らの損傷も受けていないことが確認されている。

以上の点は、設計上、非常に重要な情報を提供していると言える。PHC 杭の杭頭部に継手を配置することで変形性能が向上するだけでなく、杭頭回転拘束度を小さくする効果も発揮して杭頭曲げモーメントを小さめに抑えることで、もろい壊れ方を避けることが出来る可能性を秘めているからである。このことによって、最早使うことは出来ないとの評

価が定説となっている PHC 杭を救うことが出来るかも知れないので、構造設計者は是非このアイデアを活かして設計として実現していただきたいと願う。低層の倉庫などを皮切りにして実績を積むことで、次第に小規模のアパートなどにも応用して行く道が開けるかも知れないからである。

〔注〕論文では、正加力破壊 31t 時の標準杭の破壊現象について、GL-2.9m 位置の測定結果から計算される軸力と曲げモーメントを算出し、最終的に破壊の $N-M$ インターアクションカーブを飛び出すことを確認している。また、GL-5m 付近の軸ひずみが異常に大きくなって破断した点については、すでに破壊 20t 時に推定ひび割れひずみ 350μ に達していることから、この破壊とは別の何らかの変状があったとも推定している。

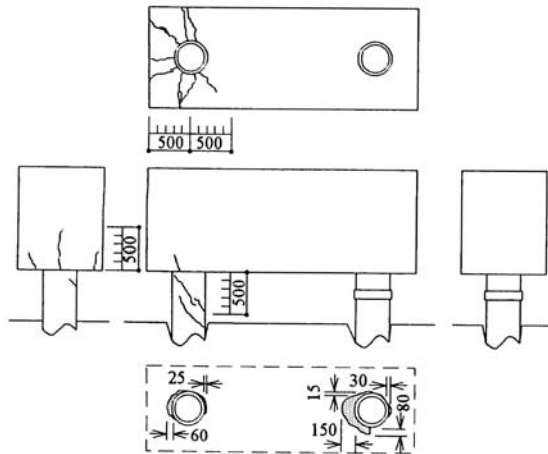


図11 試験体の最終破壊状況